

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Российская академия наук
Российский фонд фундаментальных исследований
ОАО «Российские железные дороги»
АО «Вертолеты России»
Российский национальный комитет по трибологии
Межведомственный научный совет по трибологии при РАН
Ростовский государственный университет путей сообщения
РРОО «Ассоциация выпускников РГУПС»
ОО «Российская академия транспорта»

**Международная научная конференция
«Механика и трибология транспортных систем»
(МехТрибоТранс–2016)**

Сборник докладов
Том 2

*8-10 ноября 2016 г.
Г. Ростов-на-Дону*

УДК 621.891: 531

Механика и трибология транспортных систем: сборник докладов международной научной конференции, Ростов-на-Дону, 8 – 10 ноября 2016 г.: в 2 т. – Ростов н/Д: ФГБОУ ВО РГУПС. – 2016. – Т. 2 – 318 с.

ISBN 978-5-88814-459-6

В сборник докладов международной научной конференции «Механика и трибология транспортных систем» (МехТрибоТранс-2016) вошли секционные доклады по следующим направлениям:

- инновационное развитие транспортного комплекса Российской Федерации;
- механика транспортных систем;
- проблемы трения, износа, смазочных материалов и смазки;
- механика контактного взаимодействия;
- новые износостойкие материалы и упрочняющие технологии;
- методы и средства испытаний на трение и износ;
- экологические и экономические проблемы транспортных трибосистем.

Международная научная конференция «Механика и трибология транспортных систем» (МехТрибоТранс-2016). (г. Ростов-на-Дону, 8 – 10 ноября 2016 г.) поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 16-08-20779

ISBN 978-5-88814-459-6

© Ростовский государственный университет
путей сообщения, 2016

СЕКЦИЯ 4
МЕХАНИКА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

УДК 629.4.001.57+06

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОРМОЗНЫХ ПРОЦЕССОВ В
ГРУЗОВОМ ПОЕЗДЕ**

В.Д. Верескун, Д.Е. Притыкин

*ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»,
г. Ростов-на-Дону, Россия*

Введение. Задачи динамики подвижного состава в общем, и продольной динамики в частности, предусматривают применение комплексного подхода к их решению, заключающегося в рассмотрении не только модели механической части поезда, но и в описании поведения сопряженных с ней систем тягового электрического привода, микропроцессорной системы управления, а также пневматического тормозного оборудования. Таким образом, создание адекватной динамической модели поезда является междисциплинарной проблемой.

Если говорить о моделировании торможения поезда, то, несмотря на колоссально возросшую в последние годы мощность современных ЭВМ, проблема создания точных, и вместе с тем быстродействующих алгоритмов моделирования динамического состояния подвижного состава остается актуальной, так как совместное решение уравнений движения и уравнений газодинамических процессов в тормозной магистрали является трудоемкой вычислительной задачей. Зачастую, например, при создании тренажерных комплексов подвижного состава, требуется решать описанные задачи в реальном масштабе времени, что предъявляет дополнительные требования к быстродействию, точности и устойчивости применяемых численных методов.

На сегодняшний день вопросы формального описания газодинамических процессов в тормозной магистрали поезда являются достаточно проработанными. Для этого используются различные подходы, опирающиеся на непосредственное решение уравнений Навье-Стокса [1]; операторные методы, основанные на представлении элементов тормозной магистрали линейными моделями в виде передаточных функций [2]; методики преобразования уравнений газовой динамики, основанные на различного рода допущениях, с целью упрощения вычислительной процедуры [3], [4].

С точки зрения создания быстродействующего алгоритма расчета динамического состояния поезда при торможении, пригодной для использования в моделирующих системах реального времени, большой интерес представляет методика описания тормозных процессов, предложенная в [4] и обоснованная в работе [5]. Эта методика хорошо согласуется с экспериментом [6], обеспечивая при этом низкие затраты вычислительных ресурсов ЭВМ.

Результаты, полученные авторами в настоящей работе, основываются на методике [4]. Предложена модификация этой методики, с целью реализации полной модели тормозных процессов в грузовом поезде во всех режимах торможения и отпуска.

1. Постановка задачи. Динамическая модель грузового поезда в режиме торможения

При решении задач продольной динамики поезда обычно прибегают к следующего рода допущениям [7], [8]:

- упрощенное представление рельсовых экипажей, при котором пренебрегают их поперечной и вертикальной динамикой;
- отдельный экипаж может состоять из любого числа тел, соединенных силовыми

элементами;

- все тела, входящие в модели экипажей, движутся поступательно вдоль одной прямой;
- движение в кривых моделируется дополнительной силой сопротивления, зависящей от массы экипажа и радиуса кривой;
- при движении на наклонных участках пути, дополнительно вводится продольная составляющая силы тяжести, учитывающая характер вертикального профиля пути.

С учетом этих допущений, рассмотрим грузовой поезд в режиме торможения, как механическую систему, движение которой описывается нелинейными дифференциальными уравнениями вида

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{k}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{Q}(u(t)), \tag{1}$$

где $\mathbf{q}(t) = [q_1(t), \dots, q_s(t)]^T$ – вектор-столбец обобщенных координат (S – число степеней свободы), в качестве которых обычно выбираются перемещения подвижных единиц и относительные перемещения составляющих их масс; $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ – инерционная матрица; $\mathbf{k}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ – нелинейная вектор-функция, включающая в себя силы основного и дополнительного сопротивления движению и характеристики межвагонных связей; $\mathbf{Q}(u(t))$ – вектор-столбец усилий, развиваемых автоматическими тормозами поезда; $u(t)$ – скалярная функция, задающая управляющее воздействие, представляющая собой зависимость от времени положения поездного крана машиниста.

Тормозное усилие, развиваемое тормозами k -й подвижной единицы (ПЕ), по характеру своего изменения, представляет собой силу сухого трения, направление которой определяется направлением вектора скорости ПЕ и в общем случае разделяется на трение скольжения и трение покоя. Трение покоя является реакцией, величина которой определяется векторной суммой приложенных к ПЕ активных сил и подлежит определению в процессе решения уравнений движения, что зачастую приводит к неопределенности, связанной с возникновением в системе избыточных связей. К тому же, перечисленные свойства тормозной силы приводят к чрезвычайному усложнению вычислительной процедуры и затратам машинного времени. Поэтому, рассматриваемую тормозную силу переведем в разряд активных сил, используя известную аппроксимацию

$$Q_k(u(t)) = \begin{cases} -\frac{B_{\max}(v, K(u(t)))}{\varepsilon_v} v, & |v| \leq \varepsilon_v \\ -B_{\max}(v, K(u(t)))v, & |v| > \varepsilon_v \end{cases} \tag{2}$$

где $B_{\max}(v, K(u(t)))$ – предельная тормозная сила, связанная с предельной силой трения покоя колодок о бандаж, вычисляемая по формуле

$$B_{\max} = n_c n_s \varphi(v, K(u(t)))K(u(t))$$

в соответствии с методикой, предлагаемой в [9]; ε_v – точность, задающая скорость экипажа, при которой его можно считать покоящимся; v – проекция вектора скорости экипажа на путь; $K(u(t))$ – действительная сила нажатия одной тормозной колодки на бандаж; $\varphi(v, K(u(t)))$ – коэффициент трения колодок о бандаж; n_c – число тормозных цилиндров, установленных на ПЕ; n_s – число колодок, механически связанных с одним тормозным цилиндром (ТЦ). Характерный вид зависимости (2) от скорости экипажа представлен на рисунке 1.

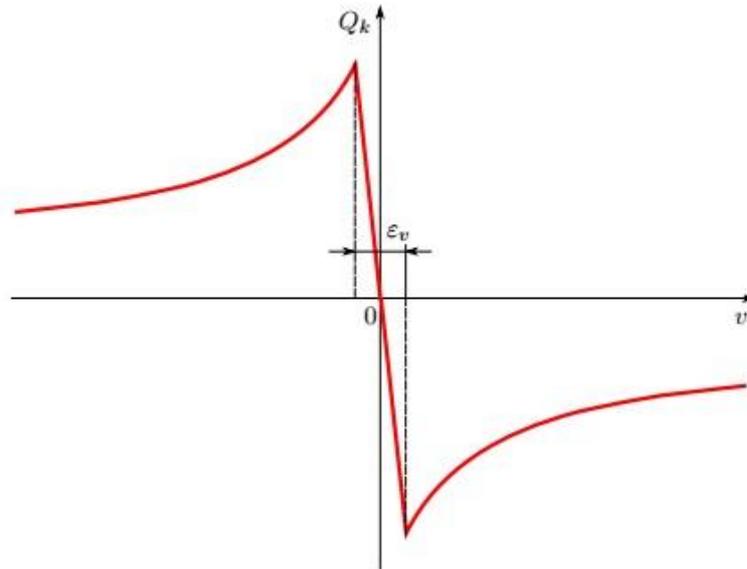


Рис. 1 – Зависимость усилия, развиваемого тормозами экипажа, от скорости, при фиксированной силе нажатия колодок

Сила нажатия тормозных колодок на ось, согласно [2], определяется выражением

$$K(u(t)) = \begin{cases} \left(\frac{\pi D^2}{4} p_c(u(t)) - F_0 \right) \frac{\eta i_p}{n_s}, & \frac{\pi D^2}{4} p_c(u(t)) \geq F_0 \\ 0, & \frac{\pi D^2}{4} p_c(u(t)) < F_0 \end{cases} \quad (3)$$

где $p_c(u(t))$ – давление в тормозном цилиндре, Па; D – диаметр тормозного цилиндра, м; F_0 – эквивалентное усилие, действующее со стороны отпускных пружин ТЦ и рычажной передачи, а так же регулятора тормозной передачи, Н; η – КПД тормозной рычажной передачи; i_p – коэффициент усиления тормозной передачи. Выражение (3) учитывает, что для создания ненулевого нажатия колодки на бандаж необходимо достаточное давление, для преодоления усилия возвратных пружин, размещенных в ТЦ и в рычажной передаче (рисунок 2).

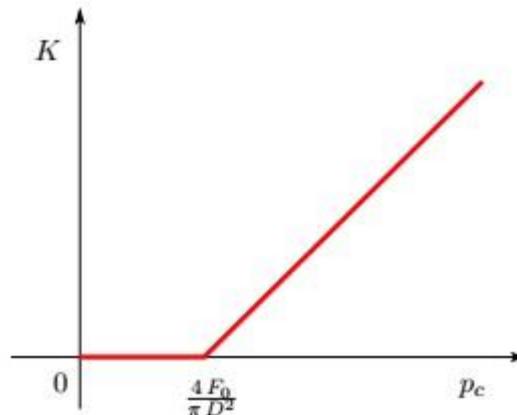


Рис. 2 – Зависимость действительного нажатия колодки на бандаж от давления в тормозном цилиндре

Давления в тормозном цилиндре каждой ПЕ зависит от режима работы установленного на ней воздухораспределителя (ВР). Этот режим определяется глубиной и темпом разрядки и

зарядки тормозной магистрали (ТМ) в точке соединения ВР с ТМ.

В режиме торможения давление в ТЦ зависит от глубины разрядки ТМ и положения режимного переключателя (рисунок 3). Положение режимного переключателя устанавливается в зависимости от нагрузки на ось колесной пары подвижной единицы.

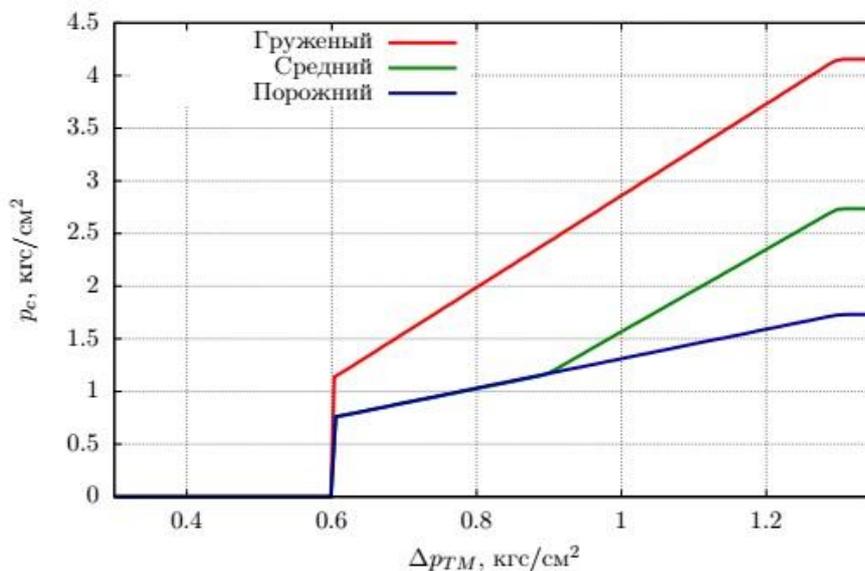


Рис. 3 – Зависимость давления в тормозном цилиндре от глубины разрядки тормозной магистрали и положения режимного переключателя при торможении для грузового воздухораспределителя усл. №483

На вагонах, оснащенных авторежимом, регулировка давления в ТЦ осуществляется автоматически, в соответствии с зависимостью на рисунке 3.

2. Модель газодинамических процессов в тормозной магистрали

Отдельной задачей является описание процессов, происходящих в тормозной магистрали грузового поезда. Для описания изменения давления в ТМ в различных режимах работы автоматического тормоза в работе [4] предлагается использовать следующее дифференциальное уравнение

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c_0 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - Q(x) - V(x, t) \quad (4)$$

где $p = p(x, t)$ – давление в ТМ; $c_0 = c^2/2a$, где c – скорость звука в воздухе, a – характеристика сопротивления трения, зависящая от параметров ТМ; $Q(x)$ – функция, учитывающие утечки из тормозной сети, распределенные по длине ТМ; $V(x, t)$ – функция, учитывающая темп изменения давления в ТМ при её дополнительной разрядке воздухораспределителем. Уравнение (4) следует дополнить начальными условиями

$$p(x) = p(x, 0), \quad \frac{\partial p(x, 0)}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

характеризующими начальное распределение давления в ТМ и начальный темп его изменения; и граничным условием слева.

$$p(0, t) = p_0(t) \quad (6)$$

где функция $p_0(t)$ характеризует изменение давления в начале тормозной магистрали, характер которого задается положением поездного крана машиниста, а так же граничным условием справа.

$$\frac{\partial p(L,t)}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

где L – длина тормозной магистрали. Это граничное условие выражает тот факт, что ТМ заглушена со стороны, противоположной от крана машиниста.

Функция $V(x,t)$ характеризует величину темпа дополнительной разрядки ТМ воздухораспределителем. При срабатывании ВР №483 на торможение, он осуществляет дополнительную разрядку ТМ на глубину 0,4 – 0,5 МПа, тем самым поддерживая высокую скорость срабатывания тормозных приборов по всей длине поезда. На ВР №483 это позволяет достичь скорости распространения тормозной волны равной 280 м/с при полном служебном торможении и до 300 м/с при экстренном торможении.

Уравнение (4), с учетом условий (5) – (7) решается численно. При решении данного уравнения использован метод конечных разностей с неявной схемой. Неявная схема применяется для обеспечения высокой устойчивости численного решения, в том числе и при решении уравнения (4) в реальном масштабе времени.

3. Оценка адекватности модели процесса торможения поезда

Для проверки адекватности построенной модели проведена серия вычислительных экспериментов. Выполнено моделирование процесса торможения поезда при различных начальных условиях, определена величина тормозного пути, произведено сравнение полученных тормозных путей с нормативными номограммами [9], используемыми при тормозных расчетах. Параметры модели поезда, использованные при проведении эксперимента, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры математической модели поезда и метода решения уравнений движения

Параметр	Значение
Параметры поезда	
Число вагонов	60
Тип вагонов	полувагон четырехосный
Длина по осям автосцепок, м	14,7
Масса тары, т	25
Грузоподъемность, т	65
Распределение груза	равномерно
Тип тормозных колодок	чугунные стандартные
Режим работы воздухораспределителя	груженный
Зарядное давление ТМ, МПа	0,55
Настройки решателя ОДУ	
Метод	Рунге-Кутты-Фельберга 5 порядка (RK5)
Максимальный шаг интегрирования, с	0,001
Локальная погрешность	$1 \cdot 10^{-9}$
Условие остановки решателя	скорость первого вагона менее 0,001 м/с

В таблицах 2 и 3 а так же на рисунках 4 и 5. приведены результаты для полного служебного торможения (ПСТ) грузового поезда с параметрами из таблицы 1. Для значения расчетного тормозного коэффициента $\rho_p = 0,35$, приведены тормозные пути при торможении на площадке (рисунок 4) и на спуске с уклоном $i = -0,014$ (рисунок 5).

Таблица 2 – Полное служебное торможение при $\vartheta_p = 0.35$, $i = 0$

v , км/ч	по номограмме, м	расчетный, м	Δ_s , м	ε_s , %
30	123	115.4	-7.6	6.14
35	160	157.2	-2.8	1.76
40	204	204.7	0.7	0.33
45	254	257.2	3.2	1.26
50	310	313.7	3.7	1.18
55	373	375.9	2.9	0.78
60	443	444.7	1.7	0.38
65	520	520.8	0.8	0.16
70	605	604.1	-0.9	0.15
75	696	695.9	-0.1	0.01
80	796	797.3	1.3	0.16
85	903	906.8	3.8	0.42
90	1017	1024.3	7.3	0.72
95	1139	1149.7	10.7	0.94
100	1269	1283.8	14.8	1.17
105	1407	1425.9	18.9	1.34
110	1553	1575.9	22.9	1.48
115	1706	1733.8	27.8	1.63
120	1867	1900.6	33.6	1.80

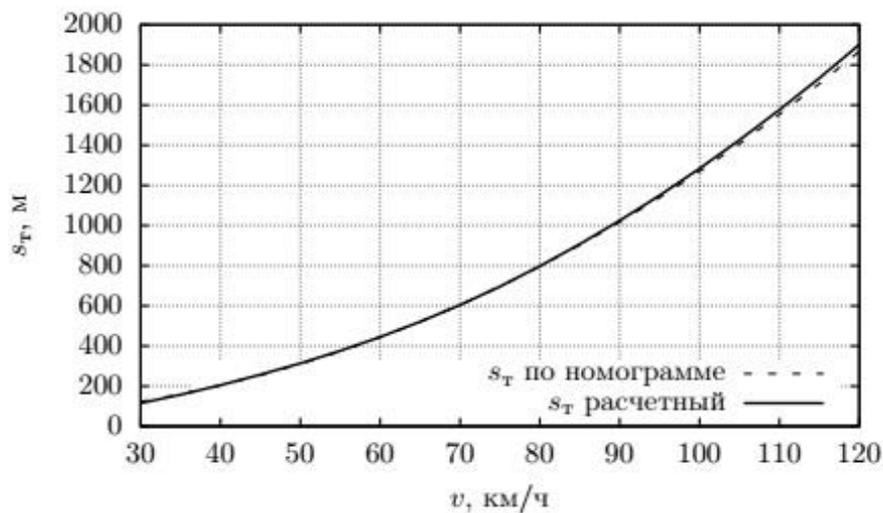


Рис. 4 – Тормозной путь грузового поезда на площадке при ПСТ

Таблица 3 – Полное служебное торможение при $\vartheta_p = 0.35$, $i = -0.014$

v , км/ч	по номограмме, м	расчетный, м	Δ_s , м	ε_s , %
30	168	176.2	8.2	4.88
35	222	233.0	11.0	4.98
40	286	297.3	11.3	3.94
45	361	371.9	10.9	3.03
50	446	457.5	11.5	2.58
55	544	559.1	15.1	2.78

60	654	675.7	21.7	3.31
65	776	806.3	30.3	3.91
70	912	950.6	38.6	4.23
75	1062	1107.7	45.7	4.30
80	1226	1280.9	54.9	4.47
85	1404	1469.2	65.2	4.64
90	1597	1674.7	77.7	4.86
95	1806	1899.3	93.3	5.17
100	2029	2141.6	112.6	5.55
105	2267	2400.2	133.2	5.88
110	2522	2678.1	156.1	6.19
115	2791	2977.4	186.4	6.68
120	3076	3294.6	218.6	7.11

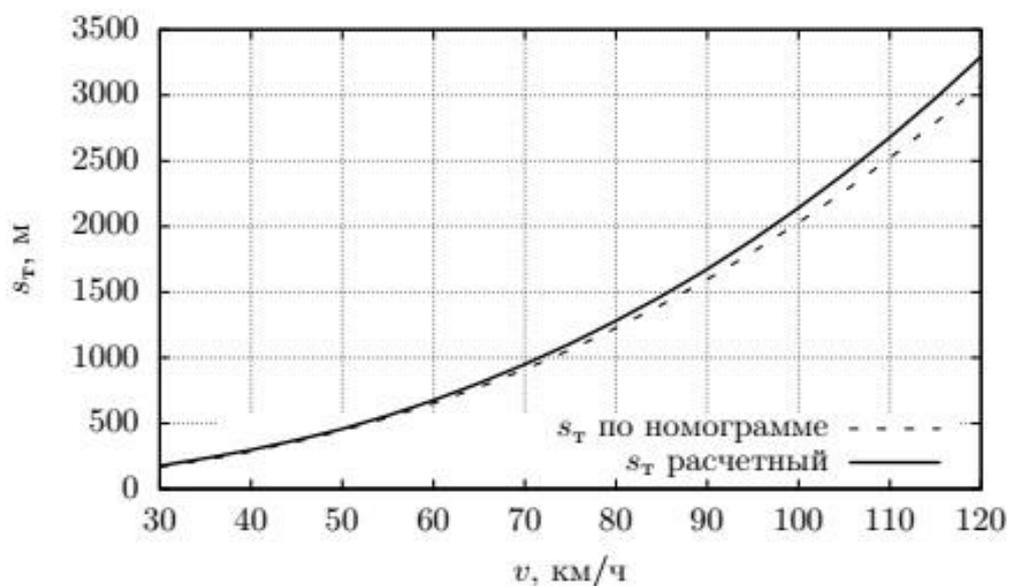


Рис. 5 – Тормозной путь грузового поезда на спуске $i=-0,014$ при ПСТ

Анализ результатов вычислительных экспериментов (рисунок 6) дает среднее значение абсолютной погрешности расчета тормозного пути

$$\bar{\Delta}_s = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (s_{m,k} - s_{m,k}^H) = 15,9 \text{ , м}$$

где $N = 304$ – объем выборки; $s_{m,k}$ – расчетное значение тормозного пути; $s_{m,k}^H$ – нормативное значение тормозного пути. Среднеквадратическое отклонение абсолютной погрешности расчета тормозного пути

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{N-1} (s_{m,k} - s_{m,k}^H - \bar{\Delta}_s)^2} = 29,5 \text{ , м}$$

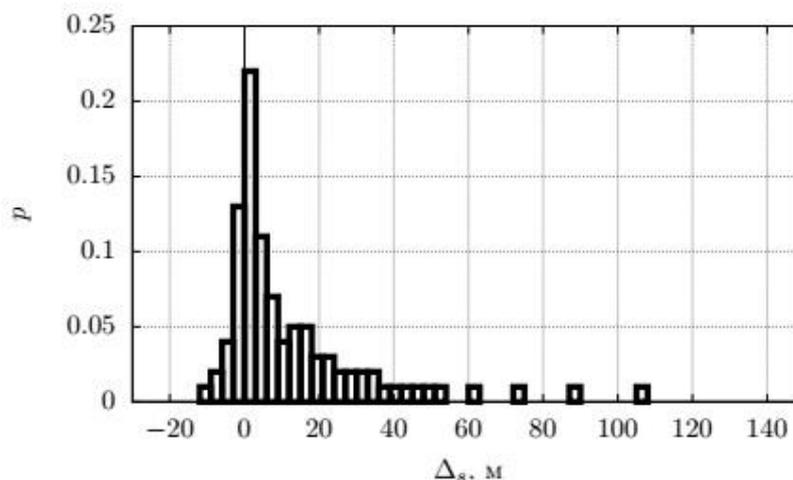


Рис. 6 - Распределение плотности вероятности отклонения расчетного тормозного пути от нормативного

Таким образом, полученный результат можно назвать приемлемым, а построенную математическую модель достаточно точно отражающей динамику процесса торможения поезда.

Заключение. Рассмотрен процесс торможения грузового поезда. Построена математическая модель движения поезда при торможении, учитывающее динамическое состояние его механической части, а так же газодинамические процессы в тормозной магистрали. Модель газодинамических процессов, предлагаемая в [4] уточнена, путем пересмотра вида функции $V(x,t)$, учитывающей темп дополнительной разрядки тормозной магистрали. Построенная логическая модель работы воздухораспределителя, учитывающая, что начало дополнительной разрядки тормозной магистрали происходит при переключении ВР в режим торможения, а её окончание при снижении давления в ТМ на заданную величину. Такая логика работы модели ВР более точно отражает реальные процессы в применяемых на подвижном составе тормозных приборах усл. №483.

Выполнена проверка точности и адекватности модели тормозных процессов путем сравнения нормативных тормозных путей по номограммам из [9] со значениями, получаемыми при математическом моделировании. Полученные результаты отражают динамику торможения грузового поезда с достаточной степенью точности и могут быть использованы для теоретического исследования динамики поезда, а так же при создании тренажерных комплексов подвижного состава.

Библиографический список

1. Бубнов В.Ю. Уменьшение продольных усилий в автосцепках вагонов при движении тяжеловесных и длинносоставных грузовых поездов : Дисс. . . кандидата наук / В.Ю. Бубнов ; Петербургский государственный университет путей сообщения. — Санкт-Петербург, 2005.
2. Попов В.Е. Повышение эффективности тормозных систем подвижного состава на основе совершенствования процессов управления автотормозами грузовых поездов : Дисс... доктора технических наук / В.Е. Попов ; МИИТ. — М., 1992.
3. Сергеев П.Б. Разработка методов расчета рациональных режимов пневматического торможения грузовых поездов : Дисс. . . кандидата наук / П.Б. Сергеев ; Омский государственный университет путей сообщения. — Омск, 2004.
4. Охотников А.В. Газодинамические процессы в тормозной сети грузового поезда при торможении: Рекомендации по математическому моделированию. — Ростов-на-Дону : РИИЖТ, 1989. — 25 с.
5. Карминский Д.Э., Шевченко К.Д. Теоретический расчет изменения давления в

тормозной магистрали с учетом утечек воздуха // Труды РИИЖТ. — 1972. — № 82. — С. 78–94.

6. Баллон Л.В., Верескун В.Д., Климанская Е.В. Верификация математической модели тормозов карьерного поезда с использованием физического моделирования пневматической сети на тормозной станции // Вестник РГУПС. — 2008. — № 3. — С. 21–25.

7. Вершинский С. В., Данилов В. Н., Хусидов В. Д. Динамика вагонов: Учебник для вузов ж.-д. трансп. / Под ред. С.В. Вершинского. – М.: Транспорт, 1991. – 360 с.

8. Универсальный механизм 7.0. Моделирование динамики поезда: Руководство пользователя. — 2014.

9. Гребенюк П. Т., Долганов А. Н., Сворцова А. И. Тяговые расчеты. — М. : Транспорт, 1987. — 272 с.

Bibliography

1. Bubnov V.Y. The reduction of longitudinal forces in the coupler of carriges in heavy and long cargo trains: PhD / V.Y. Bubnov ; St. Peterburg State Transport University. - St. Peterburg, 2005

2. Popov V.E. Improving the efficiency of brake systems by improved cargo trains automatic brakes control processes: Habilitation / V.E. Popov ; MSTU. — Moskow, 1992.

3. Sergeyev P.B. Development of methods of calculation of rational modes of pneumatic brake of cargo trains: PhD / P.B. Sergeyev; Omsk State Transport University. — Omsk, 2004.

4. Okhotnikov A.V. Gas dynamic processes in the braking cargo train network during braking. — Rostov-on-Don : RSTU, 1989. — 25 p.

5. Karminsky D.E., Shevchenko K.D. Theoretiacal calculation change of brakepipe pressure with considering of air leakage // RSTU. — 1972. — № 82. — P. 78–94.

6. Ballon L.V., Vereskun V.D., Klimanskaya E.V. Verification of train brake's mathematical model by phisycal simulation on brake station // RSTU. — 2008. — № 3. — P. 21–25.

7. Vershincky, S.V. Dynamics of wagons : textbook for higher schools railway transport / S.V.

Vershinsky, V.N. Danilov, V.D. Husidov ; ed. by S.V. Vershinsky. – Moscow : Transport, 1991. – 360 p.

8. Universal mechanism 7.0. Train dynamics simulation: User manual. — 2014.

9. Grebenyuk P.T. Traction calculations. — М.: Transport, 1987. — 272 p.

УДК 53.08

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ СЛОЁВ ДВУХСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ НА ФУНКЦИЮ ЖЁСТКОСТИ ИНДЕНТИРОВАНИЯ*

Айзикович С.М.¹, Васильев А.С.^{1,2}, Садырин Е.В.¹

¹ ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»,
г. Ростов-на-Дону, Россия

² ФГАОУ ВО «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»,
г. Нижний Новгород, Россия

При правильном проектировании многослойного покрытия увеличение числа слоев может в значительной степени повысить его прочностные и эксплуатационные

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 15-38-20790-мол_а_вед, 16-07-00958-а, 14-08-92003-ННС_а).

характеристики. Однако разница в значениях упругих характеристик на границе сопряжения различных материалов ведёт к росту концентрации напряжений на этих границах, что впоследствии может привести к образованию трещин, отслаиванию и разрушению покрытия [1]. Возникает задача поиска компромиссного решения при проектировании многослойной структуры: добиться высоких значений прочностных и эксплуатационных характеристик, не снизив надёжности изделия. На сегодняшний день для диагностики свойств покрытий все большее распространение приобретает наноиндентирование как метод неразрушающего контроля, использующий малое прецизионное локальное силовое воздействие на материал и одновременную регистрацию деформационных откликов с нанометровым разрешением [2]. При использовании наноиндентирования для диагностики многослойных структур возникает проблема выбора индентора и значений нагрузки для получения наиболее репрезентативных данных, пригодных для последующего количественного анализа параметров структуры.

Моделирование взаимодействия индентора и многослойного образца осуществляется в рамках механики твердого деформируемого тела. Лучше всего для многопараметрического исследования процесса наноиндентирования покрытия сложной структуры подходят аналитические методы, так как позволяют проанализировать структуру решения и проследить зависимость результата от входных параметров. В настоящей работе с использованием двухсторонне асимптотически точного метода [3] построены и проанализированы функции жесткости индентирования для различных осесимметричных инденторов с целью планирования корректного эксперимента по наноиндентированию образца подобной структуры.

Для изучения взаимосвязи толщины слоёв двухслойного покрытия рассмотрим трёхслойный кусочно-однородный образец, нижний слой которого (подложка) намного толще верхних двух:

- 1 слой (верхний) – TiN ($E = 300$ ГПа [4], $\nu = 0.23$),
- 2 слой (средний) – Al ($E = 70$ ГПа, $\nu = 0.34$),
- 3 подложка – сталь ($E = 200$ ГПа, $\nu = 0.3$),

где E — модуль Юнга и ν — коэффициент Пуассона. Введём параметр $E_{ef} = E/(1-\nu^2)$ — эффективный модуль упругости. Важную роль играют отношения эффективных модулей упругости различных слоёв друг к другу:

$$\beta_{31} = \frac{E_{ef}^{(3)}}{E_{ef}^{(1)}}, \beta_{32} = \frac{E_{ef}^{(3)}}{E_{ef}^{(2)}}, \beta_{12} = \frac{\beta_{32}}{\beta_{31}} = \frac{E_{ef}^{(1)}}{E_{ef}^{(2)}},$$

Индексами (1), (2) и (3) здесь и далее обозначаем 1, 2 и 3-ий слой (подложку), соответственно. Для рассматриваемого трёхслойного образца выполнено: $E_{ef}^{(1)} = 316.75$, $E_{ef}^{(2)} = 79.149$, $E_{ef}^{(3)} = 219.78$, $\beta_{31}=0.6938$, $\beta_{32} = 2.7768$, $\beta_{12}=4.002$, $\beta_{31}^{-1}=1.441$, $\beta_{32}^{-1}=0.36$,

$\beta_{12}^{-1}=0.2498$. Обозначим h_i — толщина i -го слоя, $i=1,2$, $H = h_1+h_2$ — толщина покрытия.

Смоделируем процесс внедрения жесткого осесимметричного индентора сферической или конической формы в упругий образец с двухслойным покрытием. Для этого используем полученные ранее результаты, позволяющие моделировать образец с неоднородным по глубине или слоистым покрытием [1,5]. Образец моделируется упругим полупространством, силами трения в области контакта пренебрегаем. В данных работах показано, что контактные задачи об индентировании сводятся к следующему интегральному уравнению:

$$\int_0^1 p(t)tdt \int_0^\infty L(u) J_0(ur\lambda^{-1}) J_0(ut\lambda^{-1}) du = \lambda E_{ef}(0)(\delta - f(r))/(2a), \quad r \leq 1. \quad (1)$$

где $p(t)$ — контактные нормальные напряжения под индентором (штампом), a — радиус зоны контакта, $f(r)$ — функция, описывающая профиль штампа, δ — смещение индентора,

$\lambda=H/a$ — характерный геометрический параметр задачи, J_0, J_1 — функции Бесселя первого рода, $L(u)$ — трансформанта ядра интегрального уравнения (её еще называют функцией податливости). Для анализа экспериментов по наноиндентированию, в частности при определении упругих модулей, удобно использовать понятие жесткости индентирования [6]:

$$S = \frac{dP}{d\delta} = 2\varepsilon E_{ef}^r \sqrt{A_c} / \sqrt{\pi}, \quad (2)$$

где P — вдавливающая сила, $\varepsilon > 1$ — параметр, характеризующий отличие проекции зоны контакта от круговой области, A_c — площадь проекции области контакта.

Для осесимметричного контакта выполнено $A_c = \pi a^2$ и $\varepsilon = 1$, для квадратной и треугольной области контакта было показано [7], что $\varepsilon \approx 1.012$ и $\varepsilon \approx 1.034$, соответственно. Для однородного образца без покрытия параметр E_{ef}^r есть величина постоянная и её значение совпадает со значением эффективного упругого модуля. Для материалов с покрытиями (однородными или неоднородными) E_{ef}^r является функцией параметра λ , будем называть её восстановленным эффективным модулем. Из (2) следует:

$$E_{ef}^r(\lambda) = S/(2a)$$

По характеру функции податливости можно спрогнозировать вид функции жесткости индентирования, поэтому отдельно проанализируем функции податливости, соответствующие различному сочетанию толщин двух верхних слоёв образца.

Известно, что $L(0) = \beta_{31}^{-1}$, кроме того трансформанта ядра не зависит от толщины покрытия H , но она зависит от соотношения толщин первого и второго слоя. Введём параметр h_1/H и проанализируем, как он влияет на трансформанту ядра (и, как следствие, на функцию жесткости). Функция жесткости зависит только от параметра λ , но не зависит от H .

На рисунке 1 изображены трансформанты ядер при различных значениях параметра h_1/H .

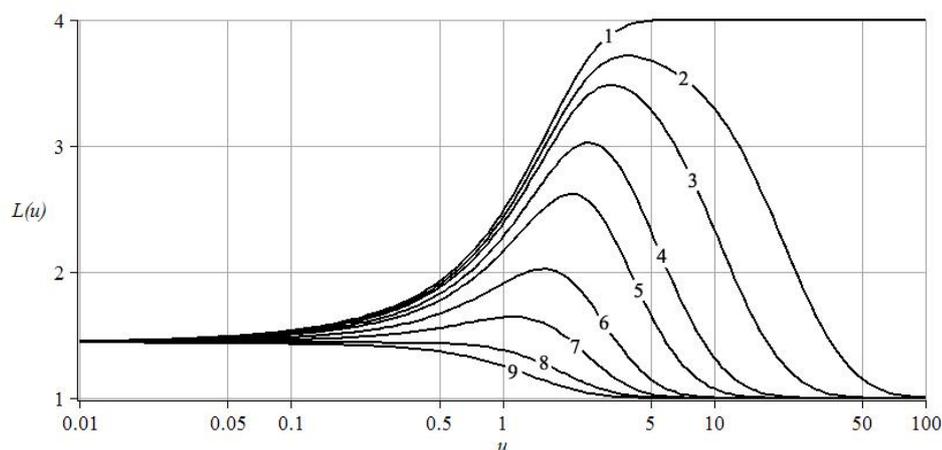


Рис. 1 - Трансформанты $L(u)$ ядра интегрального уравнения (1) для различных значений h_1/H : 0 (1), 0,05 (2), 0,1 (3), 0,2 (4), 0,3 (5), 0,5 (6), 0,7 (7), 0,9 (8), 1 (9)

Чем толще второй слой, тем он больше влияет на трансформанту ядра и, соответственно, на функцию жесткости. Во-первых, увеличивается максимальное значение трансформанты, стремясь к β_{12} . Во-вторых, расширяется диапазон значений параметра u , где трансформанта существенно отличается от β_{31}^{-1} и 1.

Для задачи о внедрении сферического индентора восстановленный эффективный модуль имеет вид:

$$E_{ef}^r(\lambda) = E_{ef}^{(3)} \frac{1 + 3 \sum_{i=1}^N C_i (\text{ch}(A_i \lambda^{-1}) - A_i^{-1} \lambda \text{sh}(A_i \lambda^{-1}))}{1 + 2 \sum_{i=1}^N C_i \text{ch}(A_i \lambda^{-1}) + 2 \lambda^2 \sum_{i=1}^N \left(\frac{B_i^2 - A_i^2}{A_i^2 B_i^2} \right)}. \quad (3)$$

Для конического индентора:

$$E_{ef}^r(\lambda) = E_{ef}^{(3)} \frac{1 + 2 \lambda \sum_{i=1}^N \left(\frac{C_i}{A_i} \left(\text{ch}\left(\frac{A_i}{\lambda}\right) - \frac{\lambda}{A_i} \text{sh}\left(\frac{A_i}{\lambda}\right) \right) + \frac{D_i}{A_i} \left(\frac{\lambda}{A_i} - \frac{\lambda}{A_i} \text{ch}\left(\frac{A_i}{\lambda}\right) + \text{sh}\left(\frac{A_i}{\lambda}\right) \right) \right)}{1 + \lambda \sum_{i=1}^N \frac{1}{A_i} (C_i \text{ch}(A_i \lambda^{-1}) + D_i \text{sh}(A_i \lambda^{-1}))} \quad (4)$$

Здесь A_i, B_i — комплексные параметры аппроксимации трансформанты ядра следующими выражениями:

$$L(u) \approx L_N(u) = \prod_{i=1}^N (u^2 + A_i^2 \lambda^{-2}) / (u^2 + B_i^2 \lambda^{-2}).$$

C_i, D_i — комплексные постоянные, значения которых находятся из решения некоторых систем линейных алгебраических уравнений.

Восстановленный эффективный упругий модуль в зависимости от параметра λ изображен на рисунке 2 для случаев $h_1 = 0.1H$ и $h_1 = 0.3H$ для конического или сферического штампов. Как видно, кривые, соответствующие коническому и сферическому инденторам, отличаются очень слабо. Эти графики не зависят ни от радиуса сферического индентора, ни от угла раствора конуса, ни от фактической толщины покрытия (толщина покрытия входит в параметр λ).

Для того, чтобы определить диапазоны глубин внедрения, в каких нужно проводить эксперимент по наноиндентированию, были построены графики зависимости величины восстановленного модуля Юнга от абсолютных значений глубины внедрения. Толщина покрытия H рассматривалась равной 1 мкм или 2 мкм. Было выяснено, что сферический индентор с радиусом 20 мкм плохо подходит для подобных экспериментов, т.к. для того, чтобы уловить свойства верхних двух слоев, глубина внедрения должна быть очень малой, что сложно реализовать на практике. Например, в случае $R = 20$ мкм, $H = 1$ мкм, $h_1 = 0,1$ мкм при глубинах внедрения $\delta > 70$ нм верхние два слоя очень слабо влияют на эксперимент.

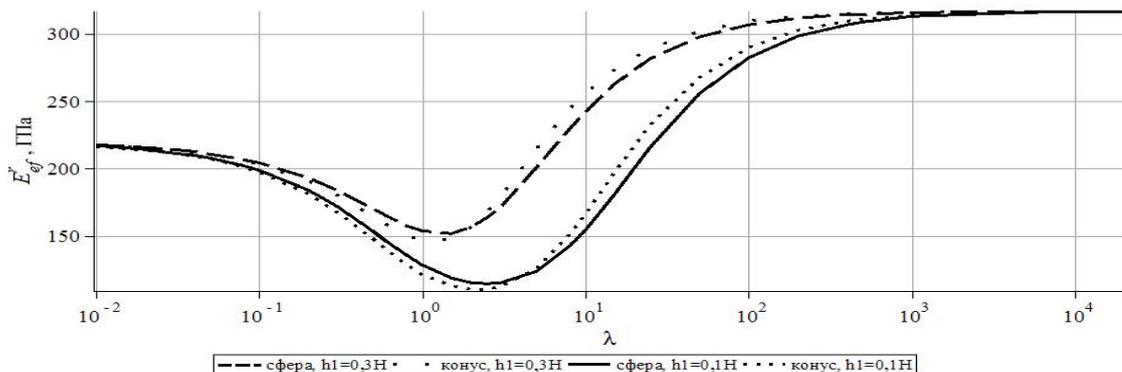


Рис. 2 - Восстановленный эффективный модуль E_{ef}^r для $h_1 = 0,1H$ и $h_1 = 0,3H$

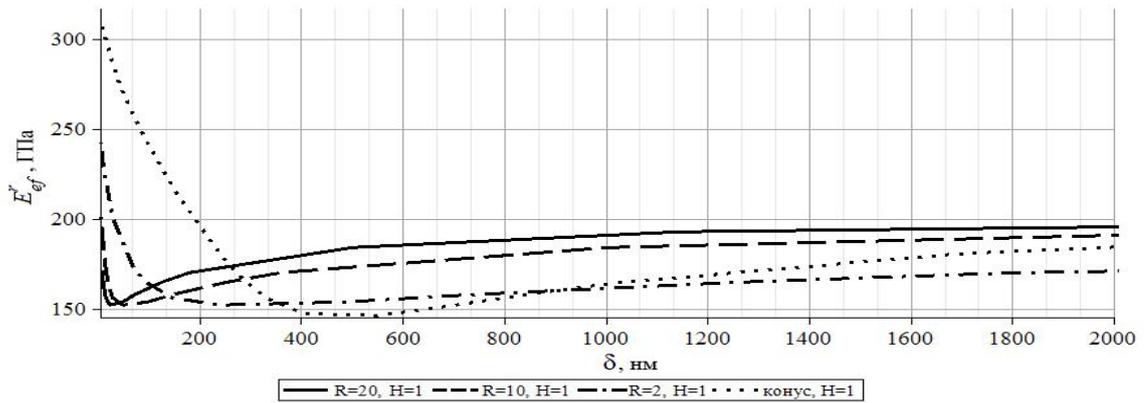


Рис. 3 - Восстановленный эффективный упругий модуль E_{ef}^r в зависимости от глубины внедрения δ для $h_1 = 0,3H$ и толщины покрытия $H = 1$ мкм

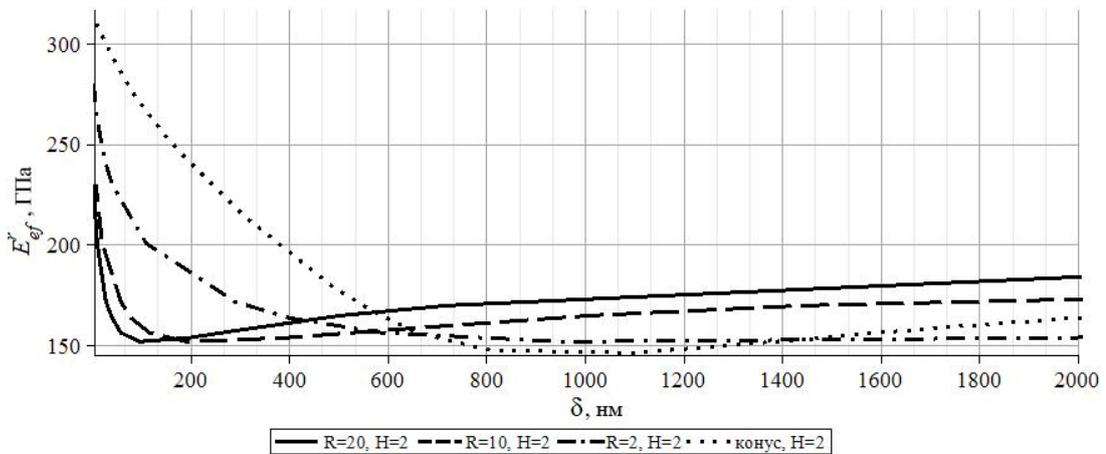


Рис. 4 - Восстановленный эффективный модуль E_{ef}^r в зависимости от глубины внедрения δ при $h_1 = 0,3H$ и $H = 2$ мкм

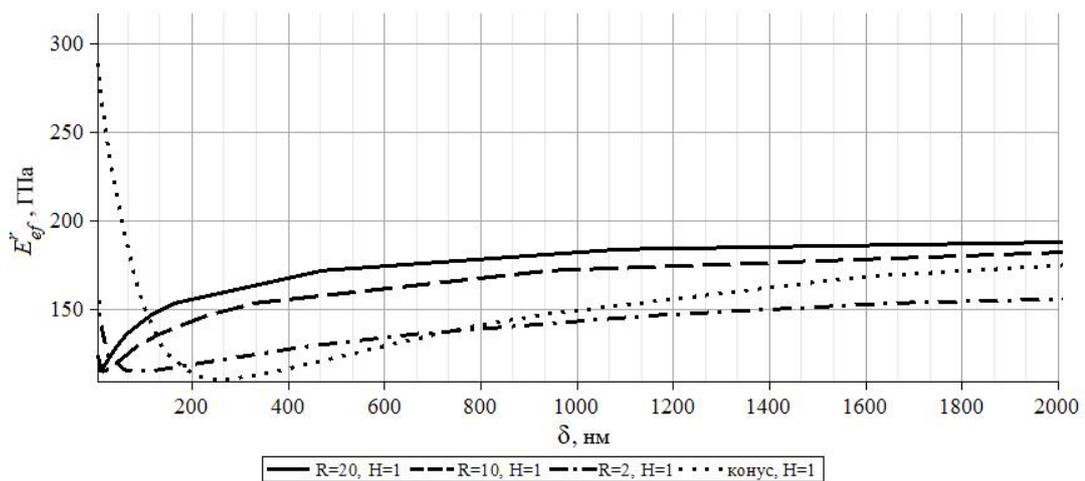


Рис. 5 - Восстановленный эффективный модуль E_{ef}^r в зависимости от глубины внедрения δ при $h_1=0.1H$ и $H=1$ мкм

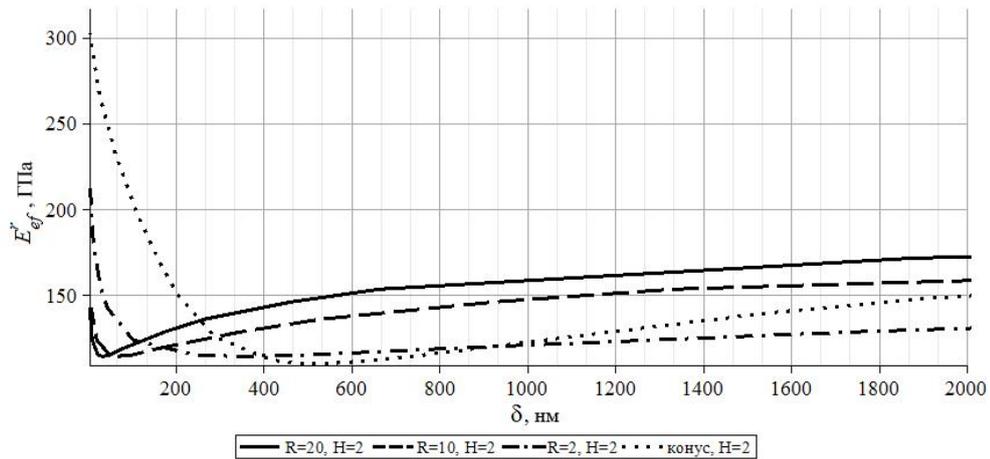


Рис. 6 - Восстановленный эффективный модуль E_{ef}^r в зависимости от глубины внедрения δ при $h_1=0.1H$ и $H=1$ мкм

Полученные результаты позволяют оценить, какие инденторы лучше подойдут для исследования трехслойного образца в случае тех или иных значений толщин верхних двух слоев. Например, для исследования $h_1=0,3H$, $H=1$ мкм лучше использовать сферический индентор малого радиуса (например, 2 мкм) или использовать конический индентор или пирамиду Берковича, которую можно с большой степенью достоверности моделировать коническим индентором. Для случая $h_1=0,3H$, $H=2$ мкм конический индентор подходит несколько хуже, зато пойдет сферический индентор чуть большего радиуса (например, 10 мкм).

Библиографический список:

1. **Айзикович, С.М.** Аналитические решения смешанных осесимметричных задач для функционально-градиентных сред / С.М. Айзикович [и др.] – М.: Физматлит, 2011. – 192 с.
2. **Головин, Ю.И.** Наноиндентирование и его возможности / Ю.И. Головин. – М: Машиностроение, 2009. – 312 с.
3. **Айзикович, С.М.** Асимптотические решения контактных задач теории упругости для неоднородных по глубине сред / С.М. Айзикович // Прикладная математика и механика. – 1982. – Т. 46. – № 1. – С. 148–158.
4. **Садырин, Е.В.** Исследование механических и микрогеометрических характеристик покрытия TiN на подложке из стали 40X, нанесенного методом ионно-плазменного напыления / Е.В. Садырин [и др.] // Вестник ДГТУ. – 2015. – Т. 83. – № 4. – С. 37-45.
5. **Айзикович, С.М.** Осесимметричная контактная задача о вдавлении конического штампа в полупространство с неоднородным по глубине покрытием / С.М. Айзикович, А.С. Васильев, С.С. Волков // Прикладная математика и механика. – 2015. – Т. 79. – № 5. – С. 710–716.
6. **Oliver, W. C.** An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // Journal of Materials Research. — 1992. – V. 7. – № 6. – P. 1564–1583.
7. **King, R.B.** Elastic analysis of some punch problems for a layered medium / R.B. King // Int. J. Sol. Struct. – 1987. – V. 23. – № 12. – P. 1657–1664.

Bibliography:

1. **Aizikovich, S.M., Alexandrov, V.M., Vasiliev A.S., Krenev, L.I., Trubchik, I.S.** Analiticheskiye resheniya smeshannikh osesimmetrichnikh zadach dlya funktsional'no-gradientnikh

- sred. [Analytical solutions of mixed axisymmetric problems for functionally-graded media.] Moscow: Fizmatlit, 2011, 192 p. (in Russian).
2. **Golovin, Yu.I.** Nanoindentirovaniye i yego vozmozhnosti. [Nanoindentation and its capabilities.] Moscow: Mashinostroyeniye, 2009, 312 p. (in Russian).
 3. **Aizikovich, S.M.** Asymptotic solutions of contact problems of elasticity theory for media inhomogeneous in depth. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1982, vol. 46, pp. 116–124.
 4. **Sadyrin, E.V., Mitrin, B.I., Krenev, L.I., Tyurin, A.I., Nikolaev, A.L.** Ispol'zovaniye nanoindentirovaniya dlya opredeleniya mekhanicheskikh kharakteristik dvukhsloynnogo pokritiya NiO-Ni, nanyesyonnogo metodom magnetronnogo raspyleniya. [Nanoindentation for determination of mechanical properties of the two-layer NiO-Ni magnetron sputtered coating.] Vestnik of Tambov State University. Natural and Technical Sciences, 2016, vol. 21, no. 3, pp. 841–843. (in Russian).
 5. **Aizikovich, S.M., Vasiliev, A.S., Volkov, S.S.** Axisymmetric contact problem on the indentation of a conical punch into a half-space with a coating inhomogeneous in depth // Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2015, vol. 79, no. 5, pp. 501–505.
 6. **Oliver, W. C, Pharr, G.M.** An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // Journal of Materials Research, 1992, vol. 7, no. 6, pp. 1564–1583.
 7. **King, R.B.** Elastic analysis of some punch problems for a layered medium // Int. J. Sol. Struct, 1987, vol. 23, no. 12, pp. 1657–1664.

УДК 539.3

О МЕТОДЕ БЛОЧНОГО ЭЛЕМЕНТА В ТЕОРИИ СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ*

О.М. Бабешко

Южный научный центр Российской академии наук, Кубанский государственный университет

В телах с покрытиями развивается теория дефектов, типа трещин, плоскости которых перпендикулярны границам трещин. Они сложны для обнаружения средствами дефектоскопии и радиационными методами, поэтому называются скрытыми. Методом блочного элемента позволяет изучить особенности влияния таких дефектов на прочностные свойства тел с дефектными покрытиями. Принятая практика классификации дефектов, в основном, включает в себя дефекты, обнаруживаемые средствами дефектоскопии или рентгенологическими методами. Это дефекты типа внутренних трещин, полостей или каверн, внутренних или поверхностных неоднородностей типа жестких включений, либо состоящих из материалов с контрастно отличающимися от рассматриваемой среды механическими свойствами. Теория обнаружения этих дефектов и их влияние на прочностные свойства конструкций и материалов достаточно хорошо развиты и изучены. В то же время разрабатываемые сейчас методы исследования прочностных свойств сред с растрескавшимися покрытиями, инициированные проблемами техники и сейсмологии, а также многослойных композитных материалов, показали, что имеются дефекты, которые не совпадают ни с одним из перечисленных. Ранее эти дефекты не были изучены по той причине, что граничные задачи для тел с растрескавшимися покрытиями являются очень сложными. И ни численные, ни

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант (15-08-01377).

аналитические существующие методы не позволяли их явно заметить. Обнаружение произошло в связи с возможностями метода блочного элемента и топологических методов решения граничных задач их выявлять. В докладе излагается подход, используемый для выявления и описания скрытых дефектов. Изучаемая блочная структура расположена на поверхности трехмерного линейно деформируемого основания. Рассматриваемые блочные структуры, находятся под горизонтальным гармоническим внешним воздействием. Такое строение свойственно не только нанопокрывтиям, поверхностным упрочнениям материалов, но также состояниям литосферных плит, исследование напряженно-деформированного состояния которых служит целям получения информации о сейсмичности территорий. Существование скрытых дефектов демонстрируется на примере векторной граничной задачи для блочной структуры, состоящей из двух разнотипных контактирующих полуплоскостей на трехмерной деформируемой подложке при горизонтальных гармонических воздействиях.

Постановка задачи. Не вдаваясь в детали топологического метода решения граничных задач и факторизационных подходов, изложенных в [1,2], приведем определяющие уравнения для блочной структуры, состоящей из двумерных фрагментов покрытия на трехмерном деформируемом основании, сохранив обозначения этих работ. Уравнение Кирхгофа для некоторого блока b покрытия, $b = 1, 2, \dots, B$, занимающего область Ω_b с границей $\partial\Omega_b$ при горизонтальных гармонических воздействиях напряжением \mathbf{t}_b имеет вид

$$\mathbf{R}_b(\partial x_1, \partial x_2) \mathbf{u}_b - \boldsymbol{\varepsilon}_{5b} \mathbf{g}_b = \boldsymbol{\varepsilon}_{5b} \mathbf{t}_b \quad (1)$$

Здесь каждая пластина рассматривается как многообразие с краем, где $\mathbf{u}_b = \{u_{1b}, u_{2b}\}$ - вектор перемещения точек пластин по горизонтальным направлениям срединной поверхности.

Имеет место обозначение

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_b(\partial x_1, \partial x_2) \mathbf{u}_b &= \\ &= \left\| \begin{array}{cc} \left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \boldsymbol{\varepsilon}_{1b} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \boldsymbol{\varepsilon}_{4b} \right) u_{1b} & \left(\boldsymbol{\varepsilon}_{2b} \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} \right) u_{2b} \\ \left(\boldsymbol{\varepsilon}_{2b} \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} \right) u_{1b} & \left(\frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \boldsymbol{\varepsilon}_{1b} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \boldsymbol{\varepsilon}_{4b} \right) u_{2b} \end{array} \right\|. \end{aligned}$$

Преобразование Фурье дифференциальной части системы уравнений имеет вид

$$\begin{aligned} -\mathbf{R}_b(-i\alpha_1, -i\alpha_2) \mathbf{U}_b &= \\ &= \left\| \begin{array}{cc} (\alpha_1^2 + \boldsymbol{\varepsilon}_{1b} \alpha_2^2 - \boldsymbol{\varepsilon}_{4b}) U_{1b} & \boldsymbol{\varepsilon}_{2b} \alpha_1 \alpha_2 U_{2b} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{2b} \alpha_1 \alpha_2 U_{1b} & (\alpha_2^2 + \boldsymbol{\varepsilon}_{1b} \alpha_1^2 - \boldsymbol{\varepsilon}_{4b}) U_{2b} \end{array} \right\|. \end{aligned}$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{F}_2 \mathbf{u}, \quad \mathbf{G} = \mathbf{F}_2 \mathbf{g}, \quad b = 1, 2, \dots, B$$

Здесь

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_{1b} &= 0,5(1 - \nu_b), \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{2b} = 0,5(1 + \nu_b), \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{3b} = \frac{h_b^2}{12}, \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{4b} &= \omega^2 \rho_b \frac{1 - \nu_b^2}{E_b}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{5b} = \frac{1 - \nu_b^2}{E_b h_b}, \\ \mathbf{g}_{1b} &= \mu_b \left(\frac{du_{1b}}{dx_3} + \frac{du_{3b}}{dx_1} \right), \quad \mathbf{g}_{2b} = \mu_b \left(\frac{du_{2b}}{dx_3} + \frac{du_{3b}}{dx_2} \right), \quad x_3 = 0 \end{aligned}$$

$\mathbf{F}_2 \equiv \mathbf{F}_2(\alpha_1, \alpha_2)$ - двумерный оператор преобразования Фурье.

приняты обозначения: ν - коэффициент Пуассона, μ, E - модули сдвига и Юнга, h - толщина, ρ - плотность, ω - частота колебаний. $\mathbf{g}_b = \{g_{1b}, g_{2b}\}$, $\mathbf{t}_b = \{t_{1b}, t_{2b}\}$ - векторы контактных напряжений и внешних давлений соответственно, действующих по касательной к

границе подложки в области Ω_b . В случае горизонтальных воздействий на пластины остаются лишь горизонтальные составляющие внешних напряжений. Граничные условия, которые ставятся на краях пластин, диктуются типом частей границ каждого блока. Так, при принятых обозначениях, в случае жесткого защемления края пластины необходимо потребовать, чтобы смещения в направлении осей локальной системы координат многообразия x_1 и x_2 - по касательной к срединной поверхности и по нормали соответственно, были равны нулю, т.е.

$$u_1 = 0, \quad u_2 = 0;$$

Выражения для нормальной N_{x_2} и $T_{x_1x_2}$ касательной составляющих к срединной поверхности на границе пластины даются соответственно соотношениями

$$N_{x_2} = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \nu \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right), \quad T_{x_1x_2} = \frac{E}{2(1+\nu)} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) \quad (2)$$

Здесь x_1 направлено по касательной к границе области, занятой пластиной, а x_2 по нормали в построенной локальной системе координат.

В качестве деформируемого основания - подложки, на котором находятся пластины-покрытия, описываемого краевой задачей (1), можно принимать различные модели. Это могут быть деформируемое полупространство, слой, многослойное полупространство, в том числе анизотропное, вязкоупругие среды. Во всех перечисленных случаях соотношения между напряжениями на поверхности слоистой среды g_{kb} , $k=1,2,3$ и перемещениями u_k , $k=1,2,3$, имеют вид (2), со свойствами

$$\mathbf{u}(x_1, x_2, 0) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int \mathbf{K}(\alpha_1, \alpha_2, 0) \mathbf{G}(\alpha_1, \alpha_2) e^{-i\langle \alpha, x \rangle} d\alpha_1 d\alpha_2$$

$$\langle \alpha, x \rangle = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 \quad (3)$$

$$\mathbf{K} = \|K_{mn}\|, \quad m, n = 1, 2, \quad \mathbf{K}(\alpha_1, \alpha_2, 0) = O(A^{-1}), \quad A = \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \rightarrow \infty.$$

$K_{mn}(\alpha_1, \alpha_2, 0)$ - аналитические функции двух комплексных переменных α_k , в частности, мероморфные, их многочисленные примеры приведены в [3-5].

Эти соотношения называются функциями влияния.

В тех случаях, когда уравнения, описывающие поведение среды основания известны, элементы матрицы- функции $\mathbf{K}(\alpha_1, \alpha_2, 0)$ удастся вычислить. Когда нет таких уравнений - функции влияния могут быть получены экспериментально.

Метод исследования. Для рассматриваемого случая в [1,2] построены функциональные уравнения граничной задачи для каждого блока. При исследовании взаимодействия блоков ограничимся блочной структурой, состоящей из двух разнотипных полубесконечных пластин Кирхгофа, контактирующих по координатной оси x_1 . Функциональные уравнения для пластин, имеют в общем случае вид [1,2]

$$-\mathbf{R}_b(-i\alpha_{1b}, -i\alpha_{2b})\mathbf{U}_b = \int_{\alpha\Omega_b} \omega_b - \varepsilon_{5b} \mathbf{F}_2(\alpha_{1b}, \alpha_{2b})(\mathbf{g}_b + \mathbf{t}_b), \quad (4).$$

$$\mathbf{U}_b = \{ U_{1b}, U_{2b} \}, \quad b=1,2$$

Здесь ω_b - участвующий в (4) вектор внешних форм, имеющий представление

$$\omega_b = \{ \omega_1, \omega_2 \}$$

$$\omega_{1b} = e^{i(\alpha, x)} \left\{ -(\varepsilon_{1b} \frac{\partial u_{1b}}{\partial x_2} + \varepsilon_{2b} \frac{\partial u_{2b}}{\partial x_1} - i\varepsilon_{1b}\alpha_{2b}u_{1b})dx_1 + (\frac{\partial u_{1b}}{\partial x_1} - i\alpha_{1b}u_{1b} - i\varepsilon_{2b}\alpha_{2b}u_{2b})dx_2 \right\},$$

$$\omega_{2b} = e^{i(\alpha, x)} \left\{ -(\varepsilon_{2b} \frac{\partial u_{1b}}{\partial x_1} + \frac{\partial u_{2b}}{\partial x_2} - i\alpha_{2b}u_{2b})dx_1 + (\varepsilon_{1b} \frac{\partial u_{2b}}{\partial x_1} - i\varepsilon_{1b}\alpha_{1b}u_{2b} - i\varepsilon_{2b}\alpha_{2b}u_{1b})dx_2 \right\}$$

Границы блока, как указано выше, могут иметь разного характера свойства контакта с соседними блоками или быть свободными. В соответствии с алгоритмом метода блочного элемента [1] данные относительно характера контактов блоков должны быть внесены в представление псевдодифференциального уравнения. Для его построения осуществляется дифференциальная факторизация матрицы - функции $-R_b(-i\alpha_1, -i\alpha_2)$ функционального уравнения (3) [1]. Заметим, что факторизация выполняется в каждой локальной системе координат касательного расслоения границы $\partial\Omega_b$ [1,2]. Обозначим параметры левой от оси ox_1 пластины с индексом λ , а правой - с индексом r . Применением алгоритма дифференциальной факторизации [1], строятся факторизующие матрицы-функции $D_b(-i\alpha_{1b}, -i\alpha_{2b})$, для левого и правого краев пластин. После приведения локальных систем к единой системе координат ox_1x_2 , они имеют соответственно вид

Переходя во внешних формах к параметрам напряженно-деформированного состояния [1], одно из псевдодифференциальных уравнения на границе левой пластины можно представить в виде

$$\begin{aligned} &F_1^{-1}(\xi_1^\lambda) \left\langle - \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \varepsilon_{6\lambda}(T_{x_1x_2\lambda} - \alpha_1 \alpha_{21}^{-1} N_{x_2\lambda}) + i\varepsilon_{1\lambda}(\alpha_1^2 - \varepsilon_{4\lambda}\varepsilon_{1\lambda}^{-1})\alpha_{21}^{-1}u_{1\lambda} + \right. \right. \\ &+ (1 - \nu_\lambda)\alpha_1 u_{2\lambda} \left. \right\rangle e^{i\alpha_1 x_1} dx_1 - \\ &- \varepsilon_{5\lambda} F_2(\alpha_1, \alpha_{21-}) [(g_{1\lambda} + t_{1\lambda}) - \alpha_1 \alpha_{21-}^{-1} (g_{2\lambda} + t_{2\lambda})] \rangle = 0, \\ &\alpha_{21-} = -i\sqrt{(\alpha_1)^2 - \varepsilon_{4\lambda}\varepsilon_{1\lambda}^{-1}}, \quad \varepsilon_{6\lambda} = \frac{1 - \nu_\lambda^2}{E_\lambda}, \quad \xi_1^\lambda \in (-\infty, \infty) \end{aligned}$$

Аналогичный вид имеют остальные псевдодифференциальных уравнения, в том числе для правой пластины.

Дальнейшее исследование граничной задачи применением алгоритма внешнего анализа [1] позволило получить интегральное представление перемещений на каждой из пластин при прохождении сигналов через зону дефекта и, таким образом, построить способ идентификации типов дефекта по характеристикам проходящего через дефект гармонического сигнала. В докладе приводятся результаты исследований конкретных примеров.

Библиографический список:

1. **В.А. Бабешко, О.В. Евдокимова, О.М. Бабешко** Внешний анализ в проблеме скрытых дефектов и прогнозе землетрясений // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2016, №2, С. 19-28.
2. **Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М.** Топологические методы в теории скрытых дефектов и некоторые аномалии// ДАН. 2014.Т.457. № 6. С.650-655.
3. **Ворович И.И., Бабешко В.А.,** Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. – М.: Наука, 1979. – 320 с.
4. **Ворович И.И., Бабешко В.А., Пряхина О.Д.** Динамика массивных тел и резонансные явления в деформируемых средах. – М.: Наука, 1999. – 246 с.
5. **Калинчук В.В., Белянкова Т.И.** Динамика поверхности неоднородных сред. –М. Физматлит, 2009. – 312 с.

Bibliography:

1. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. The external analysis in the problem of hidden defects and in the prediction of the earthquakes // Ecological bulletin of research center of the Black Sea economic cooperation, 2016, №2, С. 19-28.
2. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. Topological Methods in the Theory of Hidden Defects and Some Anomalies//Doklady Physics, 2014, vol. 59, No.8, pp. 379-384
3. Vorovich I.I, Babeshko V.A. [Dunamic mixed problems from the elasticity for nonclassical domains]. Moscow, Nauka Publ, 1979 320 с.
4. Vorovich I.I, Babeshko V.A., Prakhina O.D. Dinamika massivnih tel I resonansnie iavlenia v deformiruemih sredah [Dynamic of the mass bodies and resonance phenomena in deformable media] Moskow, Nauka, 1999, 246 с.
5. Kalinchuk V.V., Belinkova T.I. Dinamika poverhnosti neodnorodnih sred [Dynamic of the surface heterogeneity media] Moscow, Fismatlit, 2009, 312 с.

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНО ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ*Т.И. Белянкова^{1,2}, В.В. Калинин^{1,2}¹ФГБУН «Южный научный центр РАН», г. Ростов-на-Дону, Россия²ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону, Россия

Создание новых высокотехнологичных функционально ориентированных материалов приводит к необходимости прогнозирования изменения их эксплуатационных качеств, физических и прочностных свойств в зависимости от условий использования и характера внешних воздействий. Появление первых моделей функционально градиентных материалов (ФГМ), т.е. материалов, свойства которых непрерывно изменяются тем или иным образом, сначала было связано с исследованиями в сейсмологии, фундаментастроении и геофизике [1–5], дальнейшее развитие связано с одной стороны с бурным развитием электроники и возможностью повышения эффективности работы устройств на поверхностных акустических волнах, с другой стороны с широким использованием синтетических материалов (металлокерамика, би- и мульти- материалы, различного рода композиты) в машиностроении, авиационном и космическом производствах. Сложность, возникающих при этом динамических задач, состоит в том, что для полуограниченных сред с изменяющимися в пространстве свойствами или структур с покрытием из подобных материалов аналитическое решение получить невозможно. Существенным упрощением модели явилось предположение о том, что свойства материала изменяются по одной пространственной переменной с одинаковой интенсивностью и одному закону [1-6]. Такой подход позволил получить замкнутое аналитическое решение, что важно при верификации результатов более сложного численного и численно-аналитического моделирования, однако для оценки изменения свойств материала при динамическом нагружении приемлем только в отдельных частных случаях. В литературе при моделировании ФГМ используются различные подходы: деление на слоистые элементы с линейным или квадратичным изменением свойств [7], представление функциональных зависимостей либо в виде разложения по степенным рядам [8], либо в виде

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 15-08-06074, № 16-01-00647, 16-08-01052.

легко дифференцируемых функций или многочленов [9]. Как правило изменение свойств в модели строится относительно одного, или двух «опорных» материалов [9].

Для решения динамических смешанных задач теории упругости в [10] предложена, в [11-17] усовершенствована численно-аналитическая модель функционально градиентной среды. В основе лежит сведение решения системы дифференциальных уравнений в частных производных 2-го порядка с переменными коэффициентами к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) 1-го порядка с краевыми и начально-краевыми условиями относительно компонент вектора перемещений и нормальных компонент вектора напряжений. Такой подход к моделированию неоднородных покрытий дает возможность адекватно учитывать изменения свойств материала, возникающие при его производстве. В [14] возможности метода проиллюстрированы на широком круге динамических задач для упругих и электроупругих сред с неоднородными как слоистыми, так и функционально градиентными покрытиями, вопрос об особенностях структуры волнового поля самого покрытия не рассматривался. В [15-17] на примере слоя с немонотонным изменением свойств показана трансформация распределения амплитуды и фазы смещений по глубине для различных частот колебаний, изучены вопросы устойчивости преднапряженных ФГМ, исследовано влияние начальных воздействий на поверхностное волновое поле. В настоящей работе в рамках покрытия из ФГМ с монотонным изменением свойств исследовано влияние интенсивности, характера и локализации неоднородности изменения свойств покрытия на структуру поверхностного волнового поля. Рассмотрены случаи «акустически» однородных и неоднородных покрытий с монотонным изменением свойств.

1. Постановка задачи.

Рассматривается задача об установившихся гармонических колебаниях неоднородной среды под действием распределенной в области Ω на ее поверхности нагрузки $\mathbf{q} = \{q_1, q_2, q_3\}e^{-i\omega t}$. Среда представляет собой слой $|x_1|, |x_2| \leq \infty, 0 \leq x_3 \leq h$, нижняя грань которого закреплена, упругие параметры $\lambda(x_3), \mu(x_3)$ и плотность $\rho(x_3)$ предполагаются произвольными, достаточно гладкими функциями координаты x_3 . Краевая задача о колебаниях неоднородного слоя описывается уравнениями движения [14, 15]:

$$\nabla \cdot \Theta = -\rho\omega^2 \mathbf{u} \quad (1)$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} x_3 = h: & \quad \mathbf{n} \cdot \Theta = \mathbf{q}, \quad x_1, x_2 \in \Omega, \quad \mathbf{n} \cdot \Theta = 0, \quad x_1, x_2 \notin \Omega, \\ x_3 = 0: & \quad \mathbf{u} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{u} = \{u_1, u_2, u_3\}$ – вектор перемещений произвольной точки слоя, Θ – тензор напряжений, \mathbf{n} – вектор нормали.

Компоненты тензора Θ представляются формулой

$$\Theta_{lk} = c_{lksp} u_{s,p}, \quad c_{lksp} = (\delta_{ls} \delta_{kp} + \delta_{ks} \delta_{lp}) \mu + \delta_{lk} \delta_{sp} \lambda \quad (3)$$

здесь c_{lksp} – компоненты тензора упругих констант изотропной среды [10–15]

Полагаем, что свойства материала слоя изменяются по глубине:

$$\rho(x_3) = \rho_0 f_\rho(x_3), \quad \mu(x_3) = \mu_0 f_\mu(x_3), \quad \lambda(x_3) = \lambda_0 f_\lambda(x_3), \quad (4)$$

$f_p(x_3), f_\mu(x_3), f_\lambda(x_3)$ – определяют изменение соответствующих параметров; ρ_0, λ_0, μ_0 соответственно плотность и модули "опорного" материала, в качестве которого использован упругий изотропный материал (3).

Для сдвиговых гармонических колебаний упругого неоднородного по глубине слоя, вызванных действием поверхностного источника, распределенного в области $\{\Omega(x_1, x_2, x_3): |x_1| \leq 1, |x_2| < \infty, x_3 = h\}$, в постановке краевой задачи (1), (2) необходимо учитывать условия:

$$u_2 = u_2(x_1, x_3), u_1 = u_3 = 0, \partial / \partial x_2 = 0. \quad (5)$$

В этом случае краевая задача (1), (2) с учетом (3) – (5) в образах Фурье принимает вид:

$$-(\alpha^2 \mu - \rho \omega^2) U_2 + \mu U_2'' + \mu' U_2' = 0, \quad (6)$$

$$\Theta_{32}^\Lambda = \mu U_2' = Q_{|x_3=h}, \quad U_2 = 0_{|x_3=0}. \quad (7)$$

Здесь $\Theta_{32}^\Lambda, U_2, Q$ – трансформанты Фурье компонент тензора напряжений, вектора смещений, заданной нагрузки, α – параметр преобразования. Следуя [14-15], постановки краевых задач, равно, как и решение приведены в безразмерных параметрах:

$$\mu' = \mu / \mu_0, \quad \lambda' = \lambda / \lambda_0, \quad \rho' = \rho / \rho_0, \quad l' = l / h, \quad \omega' = h\omega / V_S^0$$

$V_S^0 = \sqrt{\mu_0 / \rho_0}$ – скорость сдвиговой волны «опорного» материала.

2. Решение краевой задачи.

Решение краевой задачи (6), (7) для слоя из ФГМ имеет вид [14-17]:

$$u_2(x_1, x_3) = \frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 k_{22}(x_1 - \xi, x_3, \omega) q(\xi) d\xi, \quad (8)$$

$$k_{22}(s, x_3, \omega) = \int_{\Gamma} K_{22}(\alpha, x_3, \omega) e^{-i\alpha s} d\alpha, \quad K_{22}(\alpha, x_3, \omega) = y_{21}(\alpha, x_3, \omega) [y_{11}(\alpha, h, \omega)]^{-1} \quad (9)$$

α – параметр преобразования Фурье по координате x_1 , контур Γ выбирается в соответствии с условиями излучения [18], $y_{jk}(\alpha, x_3, \omega)$ – линейно независимые решения задачи Коши с начальными условиями $y_{jk}(\alpha, 0, \omega) = \delta_{jk}$ для уравнения

$$\mathbf{Y}' = \mathbf{M}(\alpha, x_3) \mathbf{Y}, \quad (10)$$

здесь

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} \Theta_{32}^\Lambda \\ U_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{M}(\alpha, x_3) = \begin{pmatrix} 0 & \mu\alpha^2 - \rho\omega^2 \\ (\mu)^{-1} & 0 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Представление (8), (9) определяет смещение произвольной точки слоя, вклад в смещение поверхностных волн определяется вычетами в полюсах. В случае точечного источника колебания $\mathbf{q}(x_1) = \{0, \delta(x_1), 0\}$ смещение в слое определяется

$$u_2(x_1, x_3, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma} K_{22}(\alpha, x_3, \omega) e^{-i\alpha x_1} d\alpha \quad (12)$$

вклад мод поверхностных волн

$$u_2^s(x_1, h, \omega) = \mp i \operatorname{Res}_{\alpha=\mp\xi_3} [K_{22}(\alpha, h, \omega) e^{-i\alpha x_1}] \quad (13)$$

3. Численный анализ.

В рамках сделанных предположений рассмотрим сдвиговые колебания слоя, вызванные действием поверхностного точечного источника. Свойства слоя меняются по глубине монотонным образом, функциональные зависимости $f_s(x_3)$, участвующие в (4), приведены на рис. 1. В качестве "опорного" использован изотропный материал с параметрами [14]: $\rho_0 = 7.748 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\mu_0 = 0.804 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$, $\lambda_0 = 1.1 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$.

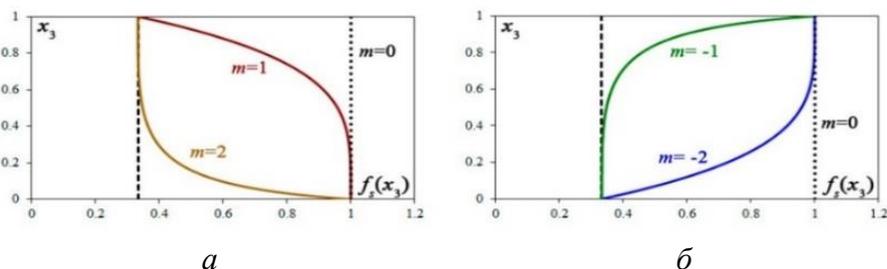


Рис. 1. - Функциональные зависимости изменения свойств материала слоя

Здесь и ниже индексом « m » отмечены различные типы рассмотренных сред: $m = 0$ – однородная среда (опорный материал), $m = \pm 1$ – среды с локализацией изменения свойств в приповерхностной части слоя, $m = \pm 2$ – среды с локализацией изменения свойств в придонной части. Знаком отмечено «нормальное» (свойства слоя ужесточаются к основанию «+») и «аномальное» (свойства слоя становятся мягче у основания «-») изменение свойств слоя. При проведении численного анализа будем отличать "акустически однородную" среду, в которой скорости объемных волн постоянны по толщине слоя, т.е. все физические параметры материала (4) изменяются по одному и тому же закону с равной интенсивностью:

$$f_\rho(x_3) = f_\mu(x_3) = f_\lambda(x_3) = f(x_3), \quad \Delta\rho = \Delta\mu = \Delta\lambda = \Delta f \quad (14)$$

и "акустически неоднородную" среду, в которой скорости изменяются по толщине, т.е. физические параметры материала изменяются по различным законам (4) с различной интенсивностью ($\Delta s = (s_0)^{-1} \max_{x_3 \in [0, h]} |s(x_3) - s_0|$):

$$f_\rho(x_3) \neq f(x_3), \quad f_\mu(x_3) = f_\lambda(x_3) = f(x_3), \quad \Delta\rho \neq \Delta f, \quad \Delta\mu = \Delta\lambda = \Delta f \quad (15)$$

На рис. 2 а, б приведены частотные зависимости относительных фазовых скоростей для рассматриваемых типов изменения параметров в случае «акустически» однородного покрытия (14). Цифры на рисунках соответствуют закономерностям изменения параметров материала, приведенным на рис. 1.

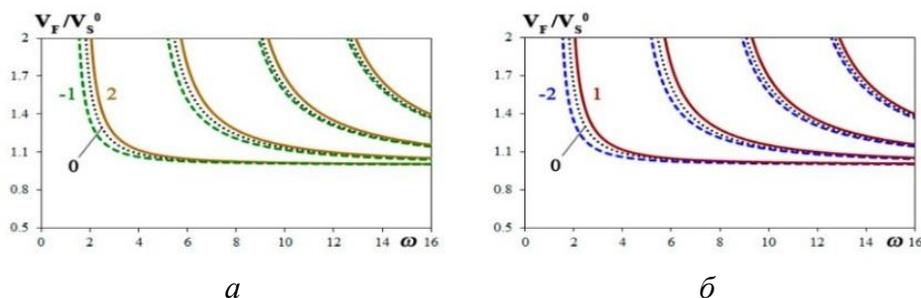


Рис. 2. - Влияние характера неоднородности изменения физических параметров на дисперсионные свойства слоя. «Акустически» однородное покрытие

На рисунках 3 а, б представлены зависимости амплитуд смещения первых четырех мод поверхностных волн от частоты. Пунктирные линии на рисунках отвечают однородному, сплошные линии – неоднородному слою с локализацией изменения параметров в верхней (приповерхностной), штриховые – с локализацией в нижней (придонной) части слоя.

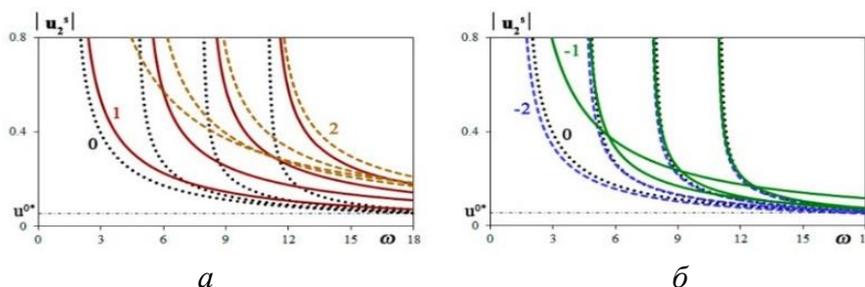


Рис.3. - Влияние характера и локализации неоднородности на амплитуды смещения первых 4 мод поверхностных волн. «Акустически» однородное случай

Из рис. 2, 3 видно, что несмотря на равенство дисперсионных свойств слоев с неоднородностями свойств $m = 1$ и 2 , а также слоев с неоднородностями $m = -1$ и -2 (рис.2 а, б), существует различие в поведении амплитуд смещений первых мод поверхностных волн при «нормальном» (рис. 3 а) и «аномальном» (рис. 3 б) характере изменения параметров акустически однородного слоя. Так, в случае неоднородного слоя с локализацией изменения свойств слоя в придонной области нарушается последовательность выхода на асимптотические значения: если для второй и последующих мод минимальное асимптотическое значение u^{2*} (причем $u^{2*} > u^{0*}$), то асимптотическое значение первой моды превышает значение u^{2*} . Наглядно этот эффект проявляется в случае слоя с «аномальным» характером изменения свойств, локализованным в верхней части (кривые -1, рис. 3 б). При локализации в придонной области слоя влияние неоднородности незначительно, максимально сказывается на первой моде, минимальное асимптотическое значение u^{-2*} ($u^{-2*} < u^{0*}$).

На рис. 4 а–б приведены модули АЧХ «акустически» однородного функционально градиентного слоя $u_2^*(0, h, \omega)$ (где $u_2^*(0, h, \omega) = u_2(0, h, \omega) / u_2^0(0, h, 0)$, $u_2^0(x_1, h, \omega)$ – смещение поверхности однородного слоя) с «нормальным» (рис. 4 а) и «аномальным» (рис. 4 б) характером изменения свойств материала слоя.

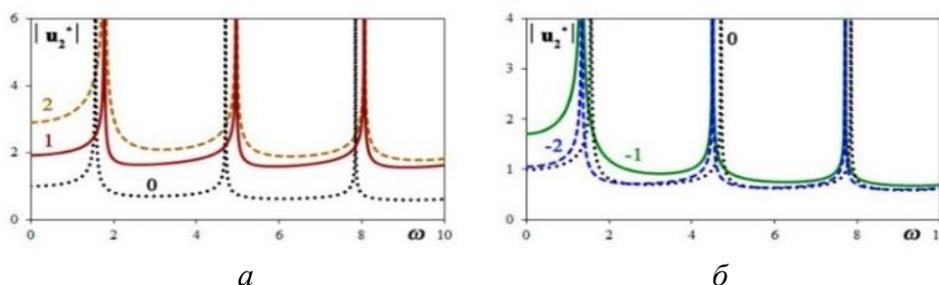


Рис. 4. - Влияние характера и локализации неоднородности слоя на АЧХ смещения поверхности. «Акустически» однородный слой

Из сравнения рис. 4 а и б видно, что характер изменения свойств «акустически» однородного слоя из ФГМ сказывается на значении резонансных частот, в то время как, область локализации изменения параметров влияет на величину амплитуды смещения вне резонансных областей.

На рис. 5 а–г показано влияние интенсивности изменения плотности (15) на относительные фазовые скорости «акустически» неоднородного слоя с «нормальным» (рис. 5

$a, б$) и «аномальным» (рис. 5 $в, г$) характером изменения физических параметров. Пунктирные линии отвечают случаю $\Delta\rho \approx 0$, сплошные линии соответствуют случаю $\Delta\rho = 1/2\Delta\mu$.

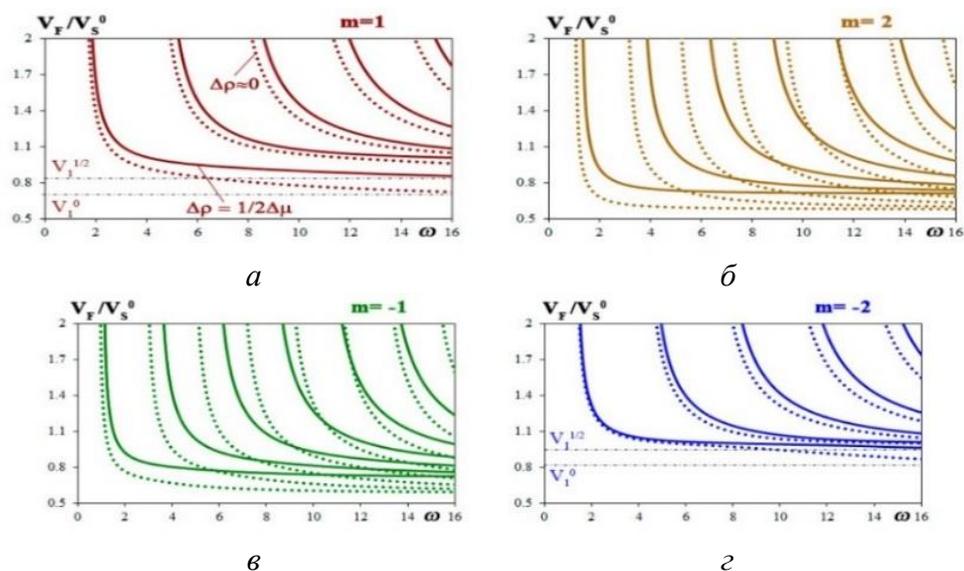


Рис. 5. - Влияние интенсивности изменения плотности на дисперсионные свойства акустически неоднородного функционально градиентного слоя

Из сравнения рис. 2 $a, б$ и 5 $a-г$ видно, что в случае уменьшения $\Delta\rho$ происходит падение значения фазовых скоростей поверхностных волн, при этом изменение скоростей определено характером изменения свойств слоя, областью их локализации, и условиями на границах. При «нормальном» характере изменения свойств (рис. 5 $a, б$) влияние области локализации изменений связано с соотношением толщин низкоскоростной и высокоскоростной части слоя, условие заземления нижней грани влияет незначительно. При «аномальном» характере (рис. 5 $в, г$) влияние заземления нижней грани становится более значительным (рис. 5 $a, г$). В случаях, низкоскоростная часть по глубине слоя становится преобладающей (рис. 5 $б, в$), в рассматриваемом частотном диапазоне увеличивается число мод поверхностных волн.

На рис. 6, 7 представлено влияние на АЧХ смещений поверхности слоя характера и локализации изменения упругих модулей (рис. 6 $a-г$) при слабо изменяющейся плотности материала слоя и влияние интенсивности изменения плотности (рис. 7 $a-г$) при различном характере изменения свойств. На рисунке 6 цифры отвечают характеру изменения упругих модулей (рис. 1), на рисунке 7 кривые с цифрами 1, 2 и 3 соответствуют различной интенсивности изменения плотности $\Delta\rho = \Delta\mu$, $\Delta\rho = 1/2\Delta\mu$ и $\Delta\rho \approx 0$.

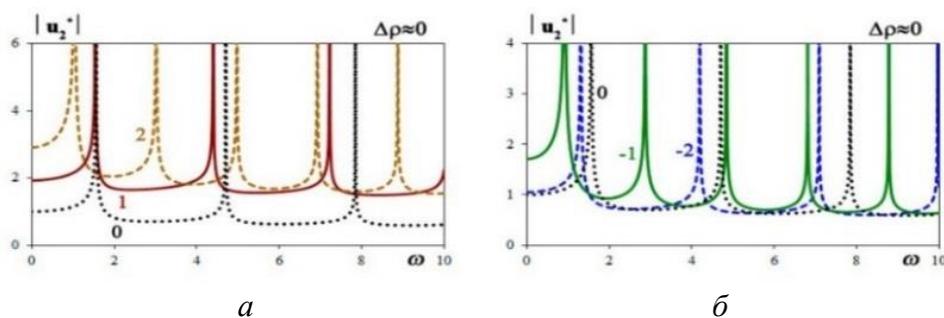


Рис. 6. - Влияние характера и локализации неоднородности слоя на АЧХ смещения поверхности при слабо изменяющейся плотности

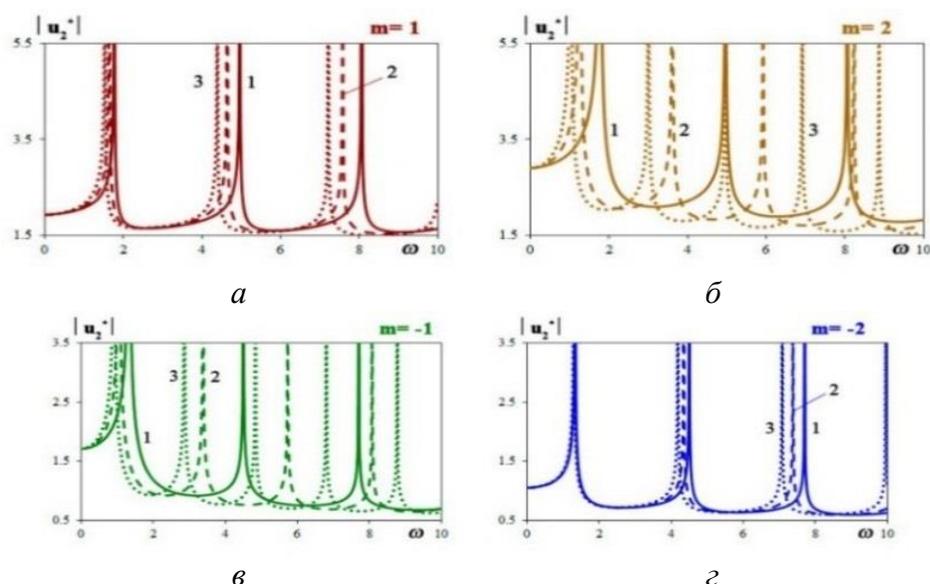


Рис. 7. - Влияние интенсивности изменения плотности слоя на АЧХ смещения поверхности

Из сравнения рисунков 4, 6 и 7 видно, что в отличие от «акустически» однородного слоя, уменьшение $\Delta\rho$ приводит к уменьшению значений резонансных частот при любом характере рассматриваемых изменений параметров (рис. 6), влияние интенсивности изменения плотности на сдвиг резонансных частот растет с увеличением частоты (рис. 7). Изменения значений амплитуды вне резонансных областей в случае $m=2$ максимальны, в случае $m=-2$ – минимальны.

Библиографический список:

1. **Bhattacharya, S.N.** Exact solutions of SH wave equation in transversely isotropic inhomogeneous elastic media // Pure and Applied Geophysics. – 1972. – V.93. – No. 1. – pp.19-35.
2. **Ананьев И.В., Бабешко В.А.** Колебания штампа на слое с переменными по глубине характеристиками / И.В. Ананьев, В.А. Бабешко // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 1978. – №1. – С. 64-69.
3. **Maugin, G.A.** Material inhomogeneities in elasticity // Chapman & Hall, London, 1993, 276 p.
4. **Liu, G.R.** Lamb Waves in a Functionally Graded Material Plate and its Transient Response: Part 1, Theory / G.R. Liu, J. Tani, T. Ohyoshi, //Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A. – 1991. – Vol. 57. – No. 535. – pp. 603-608.
5. **Бабешко, В.А.** Динамика неоднородных линейно-упругих сред / В.А.Бабешко, Е.В. Глушков, Ж.Ф. Зинченко // Москва. Наука. – 1989. – 343 с.
6. **Matsuda O.** Green's function method for surface acoustic waves in functionally graded materials / O. Matsuda, C.A. Glorieux // J. Acoust. Soc. Am. – 2007. – V.121. – No. 6. – P. 3437-
7. **Глушков, Е.В.** Поверхностные волны в материалах с функционально градиентными покрытиями / Е.В. Глушков, Н.В. Глушкова, С.И. Фоменко, Ч. Жанг // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58. – № 3. – С. 370–385.
8. **Сао, X.** Calculation of propagation properties of Lamb waves in a functionally graded material (FGM) plate by power series technique / X. Cao, F. Jin, I. Jeon // NDT&E International. – 2011. – No. 44. – pp.84–92.
9. **Khojasteh, A.** Three-dimensional dynamic Green's functions in transversely isotropic bi-materials / A. Khojasteh, M. Rahimian, R.Y.S. Pak //International Journal of Solids and Structures. – 2008. – No. 45. – pp.4952–4972.
10. **Калинчук, В.В.** Динамические контактные задачи для предварительно напряженных полуограниченных тел / В.В. Калинчук, Т.И. Белянкова // Москва. Физматлит. – 2002. – 240 с.

11. **Калинчук, В.В.** О динамике среды с непрерывно изменяющимися по глубине свойствами. / В.В. Калинчук, Т.И. Белянкова // Изв. ВУЗов. Сев. - Кав. регион. Естест. науки. – 2004. – Спецвыпуск – С. 46-49.
12. **Калинчук, В.В.** К проблеме моделирования неоднородных материалов с заданными свойствами / В.В. Калинчук, Т.И. Белянкова, А.С. Богомолов / Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2006. – № 2. – С. 26–32
13. **Белянкова, Т.И.** Особенности динамики неоднородной среды с изменяющейся плотностью / Т.И. Белянкова, А.С. Богомолов, В.В. Калинчук // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2007. – № 4. – С. 29–36.
14. **Калинчук, В.В.** Динамика поверхности неоднородных сред/ В.В. Калинчук, Т.И. Белянкова // Москва. Физматлит. – 2009. –312 с.
15. **Belyankova, T.I.** Peculiarities of the wave field localization in the functionally graded layer / T.I. Belyankova, V.V. Kalinchuk // Materials Physics and Mechanics. – 2015. – V. 23. – P. 25-30.
16. **Белянкова, Т.И.** К вопросу устойчивости преднапряженных функционально-градиентных сред / Т.И. Белянкова, В.В. Калинчук, О.М. Тукодова // Наука юга России (Вестник ЮНЦ РАН). – 2016. – Т. 12.– №2.– С. 113–117
17. **Белянкова, Т.И.** Влияние начальных напряжений на волновое поле функционально градиентного слоя / Т.И. Белянкова, А.С. Богомолов, В.В. Калинчук // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 20 – 24 августа 2015 года.): сб. докладов. – 2015. – С. 443-445.
18. **Ворович, И.И.** Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей / И.И. Ворович, В.А. Бабешко // Москва. Наука. – 1979. – 320 с.

Bibliography:

1. **Bhattacharya, S.N.** Exact solutions of SH wave equation in transversely isotropic inhomogeneous elastic media // Pure and Applied Geophysics. – 1972. – V.93. – No. 1. – pp. 19-35.
2. **Anan'ev, I.V.** Kolebaniia shtampa na sloe s peremennymi po glubine kharakteristikami / I.V. Anan'ev, V.A. Babeshko // [Oscillations of the stamp on a layer with variable characteristics in depth]. *Izvestiya akademii nauk SSSR. Mekhanika tverdogo tela.* 1978, no. 1, pp. 64–69.
3. **Maugin, G.A.** Material inhomogeneities in elasticity // Chapman & Hall, London, 1993, 276 p.
4. **Liu, G.R.** Lamb Waves in a Functionally Gradient Material Plate and its Transient Response: Part 1, Theory/ G.R. Liu, J. Tani, T. Ohyoshi //Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A. – 1991. – Vol. 57. – No. 535. – pp. 603-608.
5. **Babeshko, V.A.** Dinamika neodnorodnykh lineyno-uprugikh sred / V.A. Babeshko, E.V. Glushkov, Zh.F. Zinchenko / [Dynamics of inhomogeneous linearly elastic media]. Moscow, Nauka, 1989, 343p.
6. **Matsuda O.** Green's function method for surface acoustic waves in functionally graded materials / O. Matsuda, C.A. Glorieux // J. Acoust. Soc. Am. – 2007. – V.121. – No. 6. – P. 3437-
7. **Glushkov, E.V.** Surface waves in materials with functionally gradient coatings/ E.V.Glushkov, N.V. Glushkova, S.I. Fomenko, C. Zhang // Acoustical Physics, 2012, v. 58, no. 3, pp. 339-353.
8. **Cao, X.** Calculation of propagation properties of Lamb waves in a functionally graded material (FGM) plate by power series technique / X. Cao, F. Jin, I. Jeon // NDT&E International. – 2011. – No. 44. – pp. 84–92.
9. **Khojasteh, A.** Three-dimensional dynamic Green's functions in transversely isotropic bi-materials / A. Khojasteh, M. Rahimian, R.Y.S. Pak //International Journal of Solids and Structures. – 2008. – No. 45. – pp. 4952–4972.

10. **Kalinchuk, V.V.** Dinamicheskie kontaktnye zadachi dlja predvaritel'no naprjazhennyh poluogranichennyh tel / V.V. Kalinchuk, T.I. Belyankova // [Dynamic contact problems for prestressed semi-infinite bodies]. Moscow, Fizmatlit, 2002, 240 p.
11. **Kalinchuk, V.V.** O dinamike sredy s nepreryvno izmenjajushchimisja po glubine svojstvami / V.V. Kalinchuk, T.I. Belyankova // [About dynamics of environment with properties continuously changing on depth]. *Izvestija vuzov. Severo-Kavkazskij region. Estestvennye nauki.* 2004, S., pp. 46–49.
12. **Kalinchuk, V.V.** K probleme modelirovaniia neodnorodnykh materialov s zadannymi svojstvami / V.V. Kalinchuk, T.I. Belyankova, A.S. Bogomolov // [To the problem of modeling inhomogeneous materials with desired properties]. Ecological bulletin of research centers of the Black Sea Economic Cooperation, 2006, No. 2, pp. 26-32.
13. **Belyankova T.I.** Osobennosti dinamiki neodnorodnoi sredy s izmeniaiushcheisia plotnost'iu / T.I. Belyankova, A.S. Bogomolov, V.V. Kalinchuk [Features of inhomogeneous medium dynamics with gradient density]. Ecological bulletin of research centers of the Black Sea Economic Cooperation, 2007, no. 4, pp. 29 –36.
14. **Kalinchuk, V.V.** Dinamika poverhnosti neodnorodnykh sred / V.V. Kalinchuk, T.I. Belyankova // [Dynamics of a surface of inhomogeneous media]. Moscow, Fizmatlit, 2009, 312 p.
15. **Belyankova, T.I.** Peculiarities of the wave field localization in the functionally graded layer / T.I. Belyankova, V.V. Kalinchuk // *Materials Physics and Mechanics.* – 2015. – V. 23. – P. 25-30.
16. **Belyankova, T.I.** On stability of prestressed functionally graded media / T.I. Belyankova, V.V. Kalinchuk, O.M. Tukodova // *Science in the South of Russia*, 2016, vol. 12, no. 2, pp. 113–117.
17. **Belyankova, T.I.** Vliianie nachal'nykh napriazhenii na volnovoe pole funktsional'no gradientnogo sloia / V.V. Kalinchuk, T.I. Belyankova // [The influence of initial stress on the wave field of functionally gradient layer]. XI Vserossiiskii s'ezd po fundamental'nym problemam teoreticheskoi i prikladnoi mekhaniki (Kazan', 20 – 24 avgusta 2015 goda.): sbornik dokladov (The XI all-Russian Congress on basic problems of theoretical and applied mechanics: collection of papers of the congress). Kazan. – 2015. – pp. 443-445.
18. **Vorovich, I.I.** Dinamicheskie smeshannye zadachi teorii uprugosti dlja neklassicheskikh oblastej / I.I. Vorovich, V.A Babeshko // [Dynamic Mixed Problems in the Theory of Elasticity for Non-classical Domains]. Moscow, Nauka, 1979, 320 p.

УДК 539.3

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОИСТЫХ И ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ*

А.О. Ватульян, С.А. Нестеров

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Южный математический институт ВЦ РАН, г. Владикавказ, Россия

В технике в настоящее время широко применяются неоднородные материалы, например, слоистые композиты и функционально-градиентные материалы. Эти материалы находят широкое применение в качестве покрытий элементов конструкций, работающих в областях с высокотемпературным окружением (обшивка воздушных и космических кораблей, лопастей газовых турбин, режущих инструментов станков, имплантатов в биомедицинской

*Работа выполнена в рамках проекта Министерства образования и науки РФ №9.665.2014/К и при поддержке программы Президиума РАН «Фундаментальные проблемы математического моделирования».

промышленности). Знание термомеханических характеристик неоднородных материалов важно для адекватного математического моделирования термомеханических процессов. Нахождение термомеханических характеристик можно рассматривать как решение коэффициентной обратной задачи термоупругости

К настоящему времени накоплен достаточно большой опыт исследования обратных задач. Общие методы решения обратных задач изложены в монографиях [1,2]. Однако, обратные задачи термоупругости для неоднородных тел исследованы весьма слабо [3,4], что связано с трудностями при построении нелинейных операторных соотношений, связывающих искомые и измеряемые в эксперименте функции. Однако в последние годы в ряде работ [2, 5-7] развит новый подход к решению нелинейных обратных задач, базирующийся на построении итерационного процесса, на каждом шаге которого необходимо решать интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода. В данной работе, основываясь на разработанном в [5-7] подходе, рассмотрена задача идентификации термомеханических характеристик неоднородного слоя.

Рассмотрим задачу о неустановившихся колебаниях изотропного неоднородного по координате x_3 термоупругого слоя, занимающего область $(x_1 \in (-\infty, \infty), x_2 \in (-\infty, \infty), x_3 \in [0, h])$ в условиях плоской деформации. Нижняя грань слоя $x_3 = 0$ жестко закреплена, а на верхней грани $x_3 = h$ приложены механические и тепловые нагрузки. Термомеханические характеристики являются функциями координаты x_3 . Начально-краевая задача при нулевых начальных условиях примет вид:

$$(\lambda + 2\mu)u_{,11} + (\lambda u_{,33})_{,1} + ((\mu(u_{,1,3} + u_{,3,1}))_{,3} - (\gamma\theta)_{,1} = \rho\ddot{u}_1, \quad (1)$$

$$((\lambda + 2\mu)u_{,3,3})_{,3} + (\lambda u_{,1,1})_{,3} + ((\mu(u_{,1,3} + u_{,3,1}))_{,1} - (\gamma\theta)_{,3} = \rho\ddot{u}_3, \quad (2)$$

$$k\theta_{,11} + (k\theta_{,3})_{,3} = c\dot{\theta} + T_0\gamma(\dot{u}_{,1} + \dot{u}_{,3,3}), \quad (3)$$

$$u_1(x_1, 0, t) = u_3(x_1, 0, t) = \theta(x_1, 0, t) = 0, \quad (4)$$

$$\sigma_{33}(x_1, h, t) = F_1(x_1, t), \quad (5)$$

$$\sigma_{13}(x_1, h, t) = F_2(x_1, t), \quad (6)$$

$$q(x_1, h, t) = F_3(x_1, t), \quad (7)$$

$$u_1(x_1, x_3, 0) = u_3(x_1, x_3, 0) = \theta(x_1, x_3, 0) = \dot{u}_1(x_1, x_3, 0) = \dot{u}_3(x_1, x_3, 0) = 0. \quad (8)$$

Упростим задачу (1)-(8). Для этого применив к задаче (1)-(8) преобразование Фурье по координате x_1 , получим систему дифференциальных уравнений относительно трансформант компонент полей смещений и температуры. Положив параметр преобразования Фурье равным нулю, получим две несвязанные задачи относительно усредненных по x_1 компонент полей.

Задача 1.

$$\frac{\partial}{\partial x_3} (\mu(x_3) \frac{\partial \hat{u}_1}{\partial x_3}) = \rho(x_3) \frac{\partial^2 \hat{u}_1}{\partial t^2}, \quad (9)$$

$$\hat{u}_1(0, t) = 0, \quad \mu \frac{\partial \hat{u}_1}{\partial x_3} \Big|_{x_3=h} = \hat{F}_2(t), \quad (10)$$

$$\hat{u}_1(x_3, 0) = 0. \quad (11)$$

Обезразмерим задачу (9)-(11), вводя следующие параметры и переменные:

$$z = \frac{x_3}{h}, \quad U_1 = \frac{\hat{u}_3}{h}, \quad \bar{\mu}(z) = \frac{\mu(x_3)}{\mu_0}, \quad \bar{\rho}(z) = \frac{\rho(x_3)}{\rho_0}, \quad v_1 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\rho_0}}, \quad t_0 = \frac{h}{v_1}, \quad \tau_1 = \frac{t}{t_0},$$

$$\rho_0 = \max_{x_3 \in [0, h]} \rho(x_3), \quad \mu_0 = \max_{x_3 \in [0, h]} \mu(x_3), \quad f_1(\tau_1) = \frac{\hat{F}_2(t)}{\mu_0}.$$

После обезразмеривания задача (9)-(11) примет вид:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{\mu} \frac{\partial U_1}{\partial z} \right) = \bar{\rho} \frac{\partial^2 U_1}{\partial \tau_1^2}, \quad (12)$$

$$U_1(0, \tau) = 0, \quad \bar{\mu} \frac{\partial U_1}{\partial z} \Big|_{z=1} = f_1(\tau_1), \quad (13)$$

$$U(z, 0) = 0. \quad (14)$$

Подобная задача возникает при описании продольных колебаний неоднородного по длине упругого стержня.

Задача 2.

$$\frac{\partial}{\partial x_3} \left((\lambda + 2\mu) \frac{\partial \hat{u}_3}{\partial x_3} \right) - \frac{\partial}{\partial x_3} (\gamma \hat{\theta}) = \rho \frac{\partial^2 \hat{u}_3}{\partial t^2}, \quad (15)$$

$$c(x_3) \frac{\partial \hat{\theta}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_3} \left(k(x_3) \frac{\partial \hat{\theta}}{\partial x_3} \right) + T_0 \gamma \frac{\partial^2 \hat{u}_3}{\partial x_3 \partial t} = 0, \quad (16)$$

$$\hat{u}_3(0, t) = \hat{\theta}(0, t) = 0, \quad (17)$$

$$(\lambda + 2\mu) \frac{\partial \hat{u}_3}{\partial x_3} - \gamma \hat{\theta} \Big|_{x_3=h} = \hat{F}_1(t), \quad (18)$$

$$-k(x_3) \frac{\partial \hat{\theta}}{\partial x_3} \Big|_{x_3=h} = \hat{F}_3(t), \quad (19)$$

$$\hat{\theta}(x_3, 0) = \hat{u}_3(x_3, 0) = \frac{\partial \hat{u}_3}{\partial t}(x_3, 0) = 0. \quad (20)$$

Обезразмерим задачу (15)-(20), вводя следующие параметры и переменные:

$$z = \frac{x_3}{h}, \quad U_2 = \frac{\hat{u}_3}{h}, \quad s = \lambda + 2\mu, \quad \bar{s}(z) = \frac{s(x_3)}{s_0}, \quad W = \frac{\gamma_0 \hat{\theta}}{s_0}, \quad v_2 = \sqrt{\frac{s_0}{\rho_0}}, \quad t_1 = \frac{h}{v_2}, \quad t_2 = \frac{h^2 c_0}{k_0},$$

$$\tau_2 = \frac{t}{t_2}, \quad \bar{k}(z) = \frac{k(x_3)}{k_0}, \quad \bar{\rho}(z) = \frac{\rho(x_3)}{\rho_0}, \quad \bar{c}(z) = \frac{c(x_3)}{c_0}, \quad \bar{\gamma}(z) = \frac{\gamma(x_3)}{\gamma_0}, \quad \varepsilon = \frac{t_2}{t_1}, \quad \delta_0 = \frac{\gamma_0 T_0}{s_0 c_0},$$

$$f_2(\tau_2) = \frac{\hat{F}_2(t)}{s_0}, \quad f_3(\tau_2) = \frac{\hat{F}_3(t)}{k_0 s_0} h \gamma_0, \quad k_0 = \max_{x_3 \in [0, h]} k(x_3), \quad c_0 = \max_{x_3 \in [0, h]} c(x_3), \quad \gamma_0 = \max_{x_3 \in [0, h]} \gamma(x_3),$$

$$\rho_0 = \max_{x_3 \in [0, h]} \rho(x_3), \quad s_0 = \max_{x_3 \in [0, h]} s(x_3).$$

После обезразмеривания задача (15)-(20) примет вид:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{s}(z) \frac{\partial U_2}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\gamma}(z) W) = \varepsilon^2 \bar{\rho}(z) \frac{\partial^2 U_2}{\partial \tau_2^2}, \quad (21)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(\bar{k}(z)\frac{\partial W}{\partial z}) = \bar{c}(z)\frac{\partial W}{\partial \tau} + \delta_0\bar{\gamma}(z)\frac{\partial^2 U_2}{\partial z\partial \tau_2}, \quad (22)$$

$$U_2(0, \tau_2) = W(0, \tau_2) = 0, \quad (23)$$

$$\bar{s}(z)\frac{\partial U_2}{\partial z} - \bar{\gamma}W|_{z=1} = f_2(\tau_2), \quad (24)$$

$$-\bar{k}(z)\frac{\partial W}{\partial z}|_{z=1} = f_3(\tau_2), \quad (25)$$

$$W(z, 0) = U_2(z, 0) = \frac{\partial U_2}{\partial \tau_2}(z, 0) = 0. \quad (26)$$

Подобная задача возникает при описании продольных колебаний неоднородного по длине термоупругого стержня. Прямая задача (21)-(26) после применения преобразования Лапласа сведена к системе интегральных уравнений Фредгольма 2-го рода в трансформантах, как в [6], которая решается на основе метода коллокаций с использованием квадратурной формулы трапеций. Для нахождения оригиналов температуры и перемещений применяется теория вычетов.

Для каждой из прямых задач (12)-(14) и (21)-(26) сформулируем обратные.

Обратная задача 1. Восстановить механические характеристики $(\bar{\mu}, \bar{\rho})$ из (12)-(14) по информации:

$$U_1(1, \tau) = g_1(\tau_1), \quad \tau_1 \in [a_1, b_1]. \quad (27)$$

Обратная задача 2. Восстановить термомеханические характеристики $(\bar{s}, \bar{\rho}, \bar{c}, \bar{k}, \bar{\gamma})$ из (21)-(26) по информации:

$$U_2(1, \tau) = g_2(\tau_2), \quad \tau_2 \in [a_2, b_2], \quad (28)$$

$$W(1, \tau) = g_3(\tau_2), \quad \tau_2 \in [a_3, b_3]. \quad (29)$$

Сформулированные выше обратные задачи относятся к нелинейным задачам, которые решаются, как правило, путем построения итерационного процесса, на каждом этапе которого решается линейное операторное уравнение.

Процедура восстановления термомеханических характеристик $\bar{a}(z)$ состоит из двух этапов. На первом этапе определяется начальное приближение среди линейных или кусочно-постоянных функций из условия минимума функционала невязки на компакте, построенном по априорной информации об ограниченности искомых функций.

При решении обратной задачи 1 функционал невязки имеет вид:

$$J_1 = \int_{a_1}^{b_1} (g_1(\tau_1) - U_1(1, \tau_1))^2 d\tau_1, \quad (30)$$

При решении обратной задачи 2 в случае механического нагружения функционал невязки имеют вид:

$$J_2 = \int_{a_2}^{b_2} (g_2(\tau_2) - U_2(1, \tau_2))^2 d\tau_2, \quad (31)$$

а в случае теплового нагружения функционал невязки имеют вид:

$$J_3 = \int_{a_3}^{b_3} (g_3(\tau_2) - W(1, \tau_2))^2 d\tau_2. \quad (32)$$

На втором этапе уточняется закон изменения восстанавливаемых характеристик по схеме $\bar{a}^{(n)}(z) = \bar{a}^{(n-1)}(z) + \delta\bar{a}^{(n-1)}(z)$, где поправки $\delta\bar{a}^{(n-1)}$ находятся путем решения интегральных уравнений Фредгольма первого рода.

Так, при решении обратной задачи 2 для нахождения поправок коэффициента температурного напряжения $\delta\bar{\gamma}^{(n-1)}$ необходимо решать интегральное уравнение:

$$\int_0^1 \delta\bar{\gamma}^{(n-1)} L(z, \tau_2) dz = g_2(\tau_2) - U_2^{(n-1)}(1, \tau_2), \quad \tau_2 \in [a_2, b_2]. \quad (33)$$

Здесь ядро $L(z, \tau_2) = \frac{\partial U_2^{(n-1)}(z, \tau_2)}{\partial z} W^{(n-1)}(z, \tau_2)$.

Для нахождения поправок коэффициента теплопроводности $\delta\bar{k}^{(n-1)}$ необходимо решать интегральное уравнение:

$$\int_0^1 \delta\bar{k}^{(n-1)} R(z, \tau_2) dz = g_3(\tau_2) - W^{(n-1)}(1, \tau), \quad \tau_2 \in [a_3, b_3], \quad (34)$$

Здесь ядро $R(z, \tau_2) = \left(\frac{\partial W^{(n-1)}(z, \tau_2)}{\partial z}\right)^2$.

Уравнения для определения поправок вида (33), (34) являются интегральными уравнениями Фредгольма 1-го рода, при обращении которых используется метод регуляризации А.Н. Тихонова [8]. Выход из итерационного процесса осуществлялся по достижении соответствующим функционалом невязки порогового значения, равного 10^{-6} .

При проведении вычислительных экспериментов принято: $f_3(\tau_2) = H(\tau_2)$, $\varepsilon = 10^{-6}$, $\delta_0 = 0.05$. Выяснено, что измерение температуры наиболее информативно на интервале $[0, 0.5]$ и 4 точках наблюдения внутри него, а измерение смещения – на интервале $[0, 1]$ и 5 точках наблюдения внутри него. В первой серии вычислительных экспериментов восстанавливались гладкие термомеханические характеристики в классах степенных, экспоненциальных, тригонометрических и логарифмических функций. Выяснено, что характеристики восстанавливаются с хорошей точностью: погрешность восстановления монотонных функций не превосходит 4%, а немонотонных 10%. Во второй серии экспериментов восстанавливались термомеханические коэффициенты, имеющие точки разрыва первого рода. На рис.1 показан результат реконструкции коэффициента теплопроводности многослойного функционально-градиентного материала. Сплошной линией изображен – точный закон, точками – восстановленный.

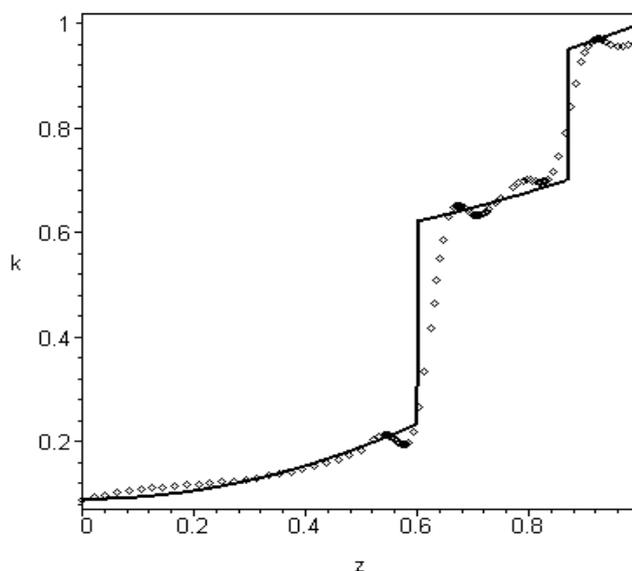


Рис.1 – Результат реконструкции коэффициента теплопроводности

Выяснено, что наибольшая погрешность реконструкции (до 10%) возникала в окрестностях точек разрыва функций, а в остальных точках не превышала 4%.

Библиографический список:

1. **Алифанов, О.М.** Экстремальные методы решения некорректных задач / О.М. Алифанов, Е.А. Артюхин, С.В. Румянцев // М.: Наука. – 1988. – 288 с.
2. **Ватульян, А.О.** Обратные задачи в механике деформируемого твердого тела / А.О. Ватульян // М.: Физматлит. – 2007. – 224 с.
3. **Lukasiewicz, S.A.** Detection of material properties in a layered body by means of thermal effects / S.A. Lukasiewicz, R. Babaei, R.E. Qian // J. Thermal Stresses. – 2003, vol. 26, №1, p.13-23.
4. **Ломазов, В.А.** Задачи диагностики неоднородных термоупругих сред / В.А. Ломазов / Орел: ОрелГТУ. – 2002. – 168 с.
5. **Ватульян, А.О.** К определению неоднородных термомеханических характеристик трубы / А.О. Ватульян, С.А. Нестеров // Инженерно-физический журнал. – 2015, –Т. 88, – №4, – С. 951-959.
6. **Nedin, R.** On an inverse problem for inhomogeneous thermoelastic rod / R. Nedin, S. Nesterov, A. Vatulyan // International Journal of Solids and Structures. – 2014, vol. 51(3), p. 767-773.
7. **Ватульян, А.О.** Об одном способе идентификации термоупругих характеристик для неоднородных тел / А.О. Ватульян, С.А. Нестеров // Инженерно-физический журнал. – 2014, – Т. 87, – №1, – С. 217-224.
8. **Тихонов, А.Н.** Численные методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, А.В. Гончарский, В.В. Степанов, Я.Г. Ягола // М.: Наука. – 1990. – 230 с.

Bibliography:

1. **Alifanov, O.M.** Extreme methods for solving ill-posed problems / O.M. Alifanov, E.A. Artyuhin, S.V. Rumyantsev // Moscow: Science. – 1988. 288 p.
2. **Vatulyan, A.O.** Inverse problems in mechanics of deformable solids / A.O. Vatulyan, // Moscow: Fizmatlit. – 2007. 224 p.
3. **Lukasiewicz, S.A.** Detection of material properties in a layered body by means of thermal effects / S.A. Lukasiewicz, R. Babaei, R.E. Qian // J. Thermal Stresses. – 2003, vol. 26, №1, p.13-23.
4. **Lomazov, V.A.** Problems of the diagnostics of inhomogeneous thermoelastic ambiances / Lomazov, V.A. // Orel: OrelSTU. – 2002. 168 p.
5. **Vatulyan, A.O.** O determination of inhomogeneous thermomechanical characteristics of pipe / A.O. Vatulyan, S.A. Nesterov // Journal of engineering physics. – 2015, vol. 88, №4, p. 951-959.
6. **Nedin, R.** On an inverse problem for inhomogeneous thermoelastic rod / R. Nedin, S. Nesterov, A. Vatulyan // International Journal of Solids and Structures. – 2014, vol. 51(3), p. 767-773.
7. **Vatulyan, A.O.** [About one method of identification of thermoelastic characteristics for inhomogeneous bodies / A.O. Vatulyan, S.A. Nesterov // Journal of engineering physics. – 2014, vol. 87, №1, p. 217-224.
8. **Tikhonov, A.N.** Numerical methods for solving ill-posed problems / A.N. Tikhonov, A.V. Goncharsky, V.V. Stepanov, A.G. Yagola // Moscow: Science. – 1990. 230 p.

УДК 539.3

К ПРОБЛЕМЕ КОНСТРУИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ С ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОЙ ПОЛОСОВОЙ АРМАТУРОЙ*

О.В. Евдокимова

Южный научный центр Российской академии наук

Рассматриваются блочные структуры, формируемые слоистыми или многослойными трехмерными неограниченными деформируемыми блоками и деформируемыми неоднородностями, сопрягаемыми продольно и поперечно с указанными блоками. В качестве неоднородностей приняты пластины Кирхгофа. Разрабатываемый метод основан на применении теории метода блочного элемента, опирающийся на топологический подход, в частности на возможность в топологии построения фактор - топологий топологических пространств, или, выражаясь более просто - на «склеивку» топологических пространств [1]. Этот подход, строго обоснованный, был развит автором в последнее время. Для применения топологического метода блочного элемента в каждом блоке блочной структуры поставлена граничная задача, которая рассматривается в двумерных (пластины) и трехмерных (многослойные среды) областях. Граничные задачи рассматриваются в пространствах медленно растущих обобщенных функций. Для них введены топологические структуры, индуцируемые евклидовыми пространствами соответствующих размерностей и осуществлено погружение последних в топологические пространства переходом к внешнему анализу [2] и переводом систем дифференциальных уравнений граничных задач в функциональные. Исследование граничных задач отдельных блоков проводилось в соответствии с алгоритмом метода блочного элемента – построением факторизации, вычисления форм-вычетов Лере, получением псевдодифференциальных уравнений, извлечением интегральных уравнений, отвечающих конкретным рассматриваемым граничным задачам. Построены системы интегральных уравнений для указанных блочных структур, обоснованы подходы для их приближенного решения.

1. Рассмотрим упругий слой толщины $2H$ на верхнюю и нижнюю границы которого действуют гармонические во времени векторы нормальных напряжений g_{3b} , на верхнюю границу и g_{3d} - на нижнюю границу. Введем систему координат, приняв оси x_1 и x_2 лежащими в срединной плоскости слоя, параллельно границам, а ось x_3 - перпендикулярно этой плоскости. Тогда вектор перемещений $\mathbf{u} = \{u_1, u_2, u_3\}$ в слое выражается соотношением [4-6]

$$u_3(x_1, x_2, x_3) = \varepsilon_6^{-1} \mathbf{F}_2^{-1} U_3(\alpha_1, \alpha_2, x_3), \quad F(\alpha_1, \alpha_2) = \iint f(x_1, x_2) e^{i(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2)} dx_1 dx_2,$$

$$F(\alpha_1, \alpha_2) = \mathbf{F}_2 f(x_1, x_2), \quad \varepsilon_6^{-1} = \frac{(1-\nu)H}{\mu},$$

$$f(x_1, x_2) = \iint F(\alpha_1, \alpha_2) e^{-i(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2)} d\alpha_1 d\alpha_2, \quad f(x_1, x_2) = \mathbf{F}_2^{-1} F(\alpha_1, \alpha_2)$$

$$U(x_3) = B_+(x_3)G_{3b} + B_-(x_3)G_{3d}, \quad G_{3b}(\alpha_1, \alpha_2) = \mathbf{F}_2 g_{3b}, \quad G_{3d}(\alpha_1, \alpha_2) = \mathbf{F}_2 g_{3d}$$

* Работа поддержана грантом РФФИ, проект (14-08-00404).

$$B_{\pm} = \pm k_2^{\pm}, \quad k_j^{\pm} = K_j^- \pm K_j^+, \quad \Delta^+ = 4(\gamma^2 t_2 - \lambda^2 \sigma_1 \sigma_2 t_1), \quad \Delta^- = 4(\gamma^2 t_{2-} - \lambda^2 \sigma_1 \sigma_2 t_{1-}),$$

$$K_2^+ = \frac{\sigma_1}{\Delta^+} [\gamma s_1(x_3) - \lambda^2 s_2(x_3)], \quad K_2^- = \frac{\sigma_1}{\Delta^-} [\gamma s_{1-}(x_3) - \lambda^2 s_{2-}(x_3)]$$

$$s_j(z) = \frac{sh\sigma_j x_3}{ch\sigma_j H}, \quad c_j(z) = \frac{ch\sigma_j x_3}{ch\sigma_j H}, \quad s_{j-}(z) = \frac{ch\sigma_j x_3}{sh\sigma_j H}, \quad c_{j-}(z) = \frac{sh\sigma_j x_3}{sh\sigma_j H},$$

$$t_j = th\sigma_j H, \quad t_{j-} = cth\sigma_j H \quad \sigma^2 = \alpha_1^2 + \alpha_2^2, \quad \Omega = \frac{\rho \omega^2 H^2}{\mu}$$

$$\gamma = \sigma^2 - \frac{\Omega^2}{2}, \quad \sigma_2^2 = \sigma^2 - \Omega^2, \quad \sigma_1^2 = \sigma^2 - \varepsilon \Omega^2, \quad \varepsilon = \frac{1-2\nu}{2-2\nu}$$

$$U(H) = U_{3b}(H), \quad U(-H) = U_{3d}(-H)$$

$$B_+(H)G_{3b} + B_-(H)G_{3d} = U_{3b}(H)$$

$$B_+(-H)G_{3b} + B_-(-H)G_{3d} = U_{3d}(-H)$$

В качестве армирующих элементов примем пластины Кирхгофа.

Учитывая большой набор различных вариантов как размеров и механических свойств армирующих элементов, так и условий контакта их со слоем, ограничимся в настоящей работе случаем вертикальных воздействий на армирующие элементы и контактом пластин со слоем без трения. Обозначим пластины индексом b на верхней границе и d - на нижней. Пусть двумерные области контакта армирующих элементов на верхней границе обозначены Ω_b^+ , а на нижней - Ω_d^- . Примем, что армирующие элементы направлены вдоль оси x_1 на верхней границе слоя и вдоль оси x_2 - на нижней. Тогда уравнение пластины Кирхгофа при условии контакта без трения имеет вид

$$\left[\left(\frac{\partial^4}{\partial x_1^4} + 2 \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^4}{\partial x_2^4} \right) - \varepsilon_{43b} \right] u_{3b} = \varepsilon_{53b} (q_{3b} - t_{3b})$$

$$\varepsilon_{53b} = \frac{(1-\nu_b^2)12H^4}{E_b h_b^3}, \quad \varepsilon_{43b} = \omega^2 \rho_b \frac{(1-\nu_b^2)12H^4}{E_b h_b^2}$$

Для пластин на верхней границе слоя имеем обозначения с индексом b

$$\mathbf{R}_b(\partial x_1, \partial x_2) u_{3b} + \varepsilon_{53b} (t_{3b} - g_{3b}) \equiv \left(\frac{\partial^4}{\partial x_1^4} + 2 \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^4}{\partial x_2^4} - \varepsilon_{43} \right) u_{3b} + \varepsilon_{53b} (t_{3b} - g_{3b}) = 0$$

$$\mathbf{R}_b(-i\alpha_1, -i\alpha_2) U_{3b} \equiv R_b(-i\alpha_1, -i\alpha_2) U_{3b} \equiv \left[(\alpha_1^2 + \alpha_2^2)^2 - \varepsilon_{43} \right] U_{3b}$$

$$U_{3b} = \mathbf{F}_2 u_{3b}, \quad G_{3b} = \mathbf{F}_2 g_{3b}, \quad T_{3b} = \mathbf{F}_2 t_{3b}$$

$$M_b = -D_{b1} \left(\frac{\partial^2 u_{3b}}{\partial x_2^2} + \nu_b \frac{\partial^2 u_{3b}}{\partial x_1^2} \right) = f_{3b}(\partial \Omega_b),$$

$$D_{b1} = \frac{D_b}{H^2}, \quad D_{b2} = \frac{D_b}{H^3}$$

$$Q_b = -D_{b2} \left(\frac{\partial^3 u_{3b}}{\partial x_2^3} + (2-\nu_b) \frac{\partial^3 u_{3b}}{\partial x_1^2 \partial x_2} \right) = f_{4b}(\partial \Omega_b),$$

$$u_{3b} = f_{1b}(\partial \Omega_b), \quad \frac{\partial u_{3b}}{H \partial x_2} = f_{2b}(\partial \Omega_b)$$

$$D_b = \frac{E_b h_b^3}{12(1-\nu_b^2)} \quad \varepsilon_6^{-1} = \frac{(1-\nu)H}{\mu}$$

M_b и Q_b - изгибающий момент и перерезывающая сила в системе координат $x_1 o x_2$; h_b и h_d - толщины пластин, ω - частота колебания блочной структуры, ρ_b - плотность материала пластины, E_b - модуль Юнга материала пластины ν_b - коэффициент Пуассона пластин. Здесь приняты обозначения из [3]. $\mathbf{F}_2 \equiv \mathbf{F}_2(\alpha_1, \alpha_2)$ и $\mathbf{F}_1 \equiv \mathbf{F}_1(\alpha_1)$ двумерный и одномерный операторы преобразования Фурье соответственно. Аналогичный вид имеют граничные условия на нижнем основании слоя. Применяя методы работ [1-3] к блочной структуре, состоящей из слоя и пластин Кирхгофа, лежащих на верхней и нижней границах слоя, получаем функциональные уравнения граничной задачи, которые можно представить в виде [3]

$$R_b(-i\alpha_{1b}, -i\alpha_{2b})U_{3b} \equiv ((\alpha_{1b}^2 + \alpha_{2b}^2)^2 - \varepsilon_{43b})U_{3b} = - \int_{\partial\Omega_b} \omega_b + \\ + \varepsilon_{53b} \mathbf{F}_2(g_{3b} + t_{3b}), \quad b = 1, 2, \dots, B_b$$

И аналогично для нижнего основания

$$R_d(-i\alpha_1, -i\alpha_2)U_{3d} \equiv ((\alpha_1^2 + \alpha_2^2)^2 - \varepsilon_{43d})U_{3d} = - \int_{\partial\Omega_d} \omega_d + \\ + \varepsilon_{53d} \mathbf{F}_2(g_{3d} + t_{3d}), \quad d = 1, 2, \dots, B_d$$

Внешняя форма для пластин на верхнем основании имеет вид

$$\omega_b = \varepsilon_{3b} e^{i\langle \alpha, x \rangle} \left\{ - \left[\frac{\partial^3 u_{3b}}{\partial x_2^3} - i\alpha_2 \frac{\partial^2 u_{3b}}{\partial x_2^2} - \alpha_2^2 \frac{\partial u_{3b}}{\partial x_2} + i\alpha_2^3 u_{3b} + \right. \right. \\ \left. \left. + 2 \frac{\partial^3 u_{3b}}{\partial x_1^2 \partial x_2} - 2i\alpha_2 \frac{\partial^2 u_{3b}}{\partial x_1^2} \right] dx_1 + \right. \\ \left. + \left[\frac{\partial^3 u_{3b}}{\partial x_1^3} - i\alpha_1 \frac{\partial^2 u_{3b}}{\partial x_1^2} - \alpha_1^2 \frac{\partial u_{3b}}{\partial x_1} + i\alpha_1^3 u_{3b} \right] dx_2 \right\}$$

Для прямолинейной границы она принимает выражение

$$\omega_b = e^{i\langle \alpha, x \rangle} \left\{ - \left[i\alpha_1 M_b D_b^{-1} - Q_b D_b^{-1} - (\alpha_2^2 + \nu_b \alpha_1^2) \frac{\partial u_{3b}}{\partial x_2} + \right. \right. \\ \left. \left. + i\alpha_2 \left[\alpha_2^2 + (2 - \nu_b) \alpha_1^2 \right] u_{3b} \right] \right\} dx_1,$$

На нижнем основании пластны внешние формы имеют вид

$$\omega_d = e^{i\langle \alpha, x \rangle} \left\{ - \left[\frac{\partial^3 u_{3d}}{\partial x_1^3} - i\alpha_1 \frac{\partial^2 u_{3d}}{\partial x_1^2} - \alpha_1^2 \frac{\partial u_{3d}}{\partial x_1} + i\alpha_1^3 u_{3d} + \right. \right. \\ \left. \left. + 2 \frac{\partial^3 u_{3d}}{\partial x_2^2 \partial x_1} - 2i\alpha_1 \frac{\partial^2 u_{3d}}{\partial x_2^2} \right] dx_2 + \right. \\ \left. + \left[\frac{\partial^3 u_{3d}}{\partial x_2^3} - i\alpha_2 \frac{\partial^2 u_{3d}}{\partial x_2^2} - \alpha_2^2 \frac{\partial u_{3d}}{\partial x_2} + i\alpha_2^3 u_{3d} \right] dx_1 \right\}$$

Для прямолинейной границы она принимает выражение

$$\omega_d = e^{i\langle \alpha, x \rangle} \left\{ - \left[i\alpha_2 M_d D_d^{-1} - Q_d D_d^{-1} - (\alpha_1^2 + \nu_d \alpha_2^2) \frac{\partial u_{3d}}{\partial x_1} + \right. \right. \\ \left. \left. + i\alpha_1 \left[\alpha_1^2 + (2 - \nu_d) \alpha_2^2 \right] u_{3d} \right] \right\} dx_2,$$

2. Приведем выражения для псевдодифференциальных уравнений на правой стороне пластины, с большей координатой второй оси.

Обозначим принадлежащие этой стороне пластины выражения индексом

r а левой, с меньшей координатой x_2 , - индексом λ . Пусть пластина занимает область

$\Omega_b (|x_1| \leq \infty, c_{b1} \leq x_2 \leq c_{b2})$. Тогда имеем

$$\begin{aligned} & \mathbf{F}_1^{-1}(\xi_1) \left\langle - \int_{\partial\Omega_{br}} \left\{ i\alpha_{21-} D_b^{-1} M_{br} - D_b^{-1} Q_{br} - (\alpha_{21-}^2 + \nu_b \alpha_1^2) \frac{\partial u_{3br}}{\partial x_2^r} + \right. \right. \\ & + i\alpha_{21-} \left[\alpha_{21-}^2 + (2 - \nu_b) \alpha_1^2 \right] u_{3br} \left. \right\} e^{i\alpha_1 x_1} dx_1 + \int_{\partial\Omega_{b\lambda}} \left\{ i\alpha_{21-} D_b^{-1} M_{b\lambda} - D_b^{-1} Q_{b\lambda} - (\alpha_{21-}^2 + \nu_b \alpha_1^2) \frac{\partial u_{3b\lambda}}{\partial x_2^\lambda} + \right. \\ & + i\alpha_{21-} \left[\alpha_{21-}^2 + (2 - \nu_b) \alpha_1^2 \right] u_{3b\lambda} \left. \right\} e^{i(\alpha_1 x_1 - \alpha_{21-} c)} dx_1 + \varepsilon_{53b} e^{-i\alpha_{21-} c_2} \left[G_{3b}(\alpha_1, \alpha_{21-}) - T_{3b}(\alpha_1, \alpha_{21-}) \right] \left. \right\rangle = 0 \\ & \mathbf{F}_1^{-1}(\xi_1) \left\langle - \int_{\partial\Omega_{br}} \left\{ i\alpha_{22-} D_b^{-1} M_{br} - D_b^{-1} Q_{br} - (\alpha_{22-}^2 + \nu_b \alpha_1^2) \frac{\partial u_{3br}}{\partial x_2^r} + \right. \right. \\ & + i\alpha_{22-} \left[\alpha_{22-}^2 + (2 - \nu_b) \alpha_1^2 \right] u_{3br} \left. \right\} e^{i\alpha_1 x_1} dx_1 + \int_{\partial\Omega_{b\lambda}} \left\{ i\alpha_{22-} D_b^{-1} M_{b\lambda} - D_b^{-1} Q_{b\lambda} - (\alpha_{22-}^2 + \nu_b \alpha_1^2) \frac{\partial u_{3b\lambda}}{\partial x_2^\lambda} + \right. \\ & + i\alpha_{22-} \left[\alpha_{22-}^2 + (2 - \nu_b) \alpha_1^2 \right] u_{3b\lambda} \left. \right\} e^{i(\alpha_1 x_1 - \alpha_{22-} c_b)} dx_1 + \varepsilon_{53b} e^{-i\alpha_{22-} c_{2b}} \left[G_{3b}(\alpha_1, \alpha_{21-}) - T_{3b}(\alpha_1, \alpha_{21-}) \right] \left. \right\rangle = 0 \\ & c_b = c_{2b} - c_{1b} \end{aligned}$$

На левом берегу пластины псевдодифференциальные уравнения имеют вид

$$\begin{aligned} & \mathbf{F}_1^{-1}(\xi_1) \left\langle - \int_{\partial\Omega_{b\lambda}} \left\{ i\alpha_{21+} D_b^{-1} M_{b\lambda} - D_b^{-1} Q_{b\lambda} - (\alpha_{21+}^2 + \nu_b \alpha_1^2) \frac{\partial u_{3b\lambda}}{\partial x_2} + \right. \right. \\ & + i\alpha_{21+} \left[\alpha_{21+}^2 + (2 - \nu_b) \alpha_1^2 \right] u_{3b\lambda} \left. \right\} e^{i\alpha_1 x_1} dx_1 + \int_{\partial\Omega_{br}} \left\{ i\alpha_{21+} D_b^{-1} M_{br} - D_b^{-1} Q_{br} - (\alpha_{21+}^2 + \nu_b \alpha_1^2) \frac{\partial u_{3br}}{\partial x_2} + \right. \\ & + i\alpha_{21+} \left[\alpha_{21+}^2 + (2 - \nu_b) \alpha_1^2 \right] u_{3br} \left. \right\} e^{i(\alpha_1 x_1^r + \alpha_{21+} c_b)} dx_1^r + \varepsilon_{53b} e^{i\alpha_{21+} c_{1b}} \left[G_{3b}(\alpha_1, \alpha_{21+}) - T_{3b}(\alpha_1, \alpha_{21+}) \right] \left. \right\rangle = 0 \\ & \mathbf{F}_1^{-1}(\xi_1) \left\langle - \int_{\partial\Omega_{b\lambda}} \left\{ i\alpha_{22+} D_b^{-1} M_{b\lambda} - D_b^{-1} Q_{b\lambda} - (\alpha_{22+}^2 + \nu_b \alpha_1^2) \frac{\partial u_{3b\lambda}}{\partial x_2} + \right. \right. \\ & + i\alpha_{22+} \left[\alpha_{22+}^2 + (2 - \nu_b) \alpha_1^2 \right] u_{3b\lambda} \left. \right\} e^{i\alpha_1 x_1} dx_1 + \int_{\partial\Omega_{br}} \left\{ i\alpha_{22+} D_b^{-1} M_{br} - D_b^{-1} Q_{br} - (\alpha_{22+}^2 + \nu_b \alpha_1^2) \frac{\partial u_{3br}}{\partial x_2} + \right. \\ & + i\alpha_{22+} \left[\alpha_{22+}^2 + (2 - \nu_b) \alpha_1^2 \right] u_{3br} \left. \right\} e^{i(\alpha_1 x_1^r + \alpha_{22+} c_b)} dx_1^r + \varepsilon_{53b} e^{i\alpha_{22+} c_{1b}} \left[G_{3b}(\alpha_1, \alpha_{22+}) - T_{3b}(\alpha_1, \alpha_{22+}) \right] \left. \right\rangle = 0 \end{aligned}$$

Здесь \mathbf{F}_1^{-1} - обратный оператор к одномерному преобразованию Фурье.

В подынтегральных функциях принято

$$\begin{aligned} \alpha_{21-} &= -i\sqrt{(\alpha_1)^2 - \sqrt{\varepsilon_{b43}}}, & \alpha_{22-} &= -i\sqrt{(\alpha_1)^2 + \sqrt{\varepsilon_{b43}}}, \\ \alpha_{21+} &= i\sqrt{(\alpha_1)^2 - \sqrt{\varepsilon_{b43}}}, & \alpha_{22+} &= i\sqrt{(\alpha_1)^2 + \sqrt{\varepsilon_{b43}}} \end{aligned}$$

3. Для каждой из пластин, расположенных на верхней или нижней границе слоя должны быть заданы граничные условия, по два на каждой границе.

Внося эти граничные условия в псевдодифференциальные уравнения и решив их относительно не заданных двух граничных условий, получим полный набор граничных условий на каждой границе. После этого они вносятся в правые части функциональных уравнений. Их них могут быть представлены решения для пластин в следующем виде

В результате получаем представления следующего вида

$$U_{3b} = -R_b^{-1}(-i\alpha_{1b}, -i\alpha_{2b}) \left[\int_{\partial\Omega_b} \omega_b + \varepsilon_{53b} \mathbf{F}_2(g_{3b} + t_{3b}) \right], \quad b = 1, 2, \dots, B_b$$

$$U_{3d} = -R_d^{-1}(-i\alpha_1, -i\alpha_2) \left[\int_{\partial\Omega_d} \omega_d + \varepsilon_{53d} \mathbf{F}_2(g_{3d} + t_{3d}) \right], \quad d = 1, 2, \dots, B_d$$

$$\sum_{b=1}^{B_b} \iint_{\Omega_b} k_{11b}(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) g_{3b}(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 + \sum_{d=1}^{B_d} \iint_{\Omega_d} k_{12d}(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) g_{3d}(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 = f_{1m}(x_1, x_2),$$

$$|x_1| \leq \infty, \quad c_{(m-1)b} \leq x_2 \leq c_{mb}, \quad 1 \leq m \leq B_b,$$

$$\sum_{b=1}^{B_b} \iint_{\Omega_b} k_{21b}(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) g_{3b}(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 + \sum_{d=1}^{B_d} \iint_{\Omega_d} k_{22d}(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) g_{3d}(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 = f_{2n}(x_1, x_2),$$

$$|x_2| \leq \infty, \quad c_{(n-1)b} \leq x_1 \leq c_{nb}, \quad 1 \leq n \leq B_d$$

$$k_{mn}(x_1, x_2) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_{mn}(\alpha_1, \alpha_2) e^{-(x_1\alpha_1 + x_2\alpha_2)} d\alpha_1 d\alpha_2, \quad g_{3b}(x_1, x_2) = \mathbf{F}_2^{-1}(x_1, x_2) G_{3b}(\alpha_1, \alpha_2),$$

$$f_{ls}(x_1, x_2) = \mathbf{P}_m \mathbf{F}_2^{-1}(x_1, x_2) F_{ls}(\alpha_1, \alpha_2), \quad \mathbf{P}_m = \begin{cases} 1, & x_1, x_2 \in \Omega_m \\ 0, & x_1, x_2 \notin \Omega_m \end{cases}$$

В системе интегральных уравнений члены вне диагонали имеют ядра, которые содержат убывающие экспоненты в сравнении с диагональными. Отсюда для построения приближенных решений можно применить метод последовательных приближений, взяв за начальный оператор – диагональный. Для получения решения в этом случае можно применить методы, разработанные в [4-6].

Считая, что арматура представляет собой полосы пластин Кирхгофа, лежащие перекрестно, строго одинаково на верхней и нижней границе слоя, тогда, складывая и вычитая уравнения, получим следующую систему интегральных уравнений

$$\sum_{b=1}^{B_b} \iint_{\Omega_b} [k_{11b}(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) + k_{21b}(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2)] g_{3b}(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 +$$

$$+ \sum_{d=1}^{B_d} \iint_{\Omega_d} [k_{22d}(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) + k_{12d}(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2)] g_{3d}(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 = f_{1m}(x_1, x_2) + f_{2n}(x_1, x_2)$$

$$\sum_{b=1}^{B_b} \iint_{\Omega_b} [k_{11b}(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) - k_{21b}(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2)] g_{3b}(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 -$$

$$- \sum_{d=1}^{B_d} \iint_{\Omega_d} [k_{22d}(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) - k_{12d}(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2)] g_{3d}(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 = f_{1m}(x_1, x_2) - f_{2n}(x_1, x_2),$$

$$|x_1| \leq \infty, \quad c_{(m-1)b} \leq x_2 \leq c_{mb}, \quad 1 \leq m \leq B_b,$$

$$|x_2| \leq \infty, \quad c_{(n-1)b} \leq x_1 \leq c_{nb}, \quad 1 \leq n \leq B_d$$

Различные варианты их приближенного решения изложены в [4-6].

Используя алгоритм внешнего анализа [2] и недавно разработанный математический аппарат «склейки» отдельных блоков в блочную структуру, состоящую из многослойной армированной структуры, то есть построение фактор - топологии топологических пространств отдельных блоков [1] строим многослойную армированную структуру.

Заметим, что разработанной математический аппарат позволяет строить многослойные армированные структуры не только с продольно и поперечно расположенной арматурой, но практически с арматурой, имеющую любую форму в плоскости. Арматура формируется из пластин Кирхгофа, причем они могут состоять из разнотипного материала.

Библиографический список

1. **Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М.** О топологических структурах граничных задач в блочных элементах // ДАН 2016. Т.471. № 1. С.1-4
2. **В.А. Бабешко, О.В. Евдокимова, О.М. Бабешко** Внешний анализ в проблеме скрытых дефектов и прогнозе землетрясений // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2016, №2, С. 19-28.
3. **Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М.** О системах интегральных уравнений продольно и поперечно армированных плит с мероморфным символом // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2015, №3, С. 5-13.
4. **Ворович И.И., Бабешко В.А.,** Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. – М.: Наука, 1979. – 320 с.
5. **Ворович И.И., Бабешко В.А., Пряхина О.Д.** Динамика массивных тел и резонансные явления в деформируемых средах. – М.: Наука, 1999. – 246 с.
6. **Калинчук В.В., Белянкова Т.И.** Динамика поверхности неоднородных сред. –М. Физматлит, 2009. – 312 с.

Bibliography:

1. **Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M.** Topological Structures of the Boundary Problems in the Block Elements// DAN 2016. T.471. № 1. С.1-4
2. **Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M.** The external analysis in the problem of hidden defects and in the prediction of the earthquakes // Ecological bulletin of research center of the Black Sea economic cooperation, 2016, №2, С. 19-28.
3. **Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M.** About systems of integral equations of longitudinally and transversely reinforced slabs with meromorphic symbol// Ecological bulletin of research center of the Black Sea economic cooperation, 2016, №2, С. 19-28.
4. **Vorovich I.I., Babeshko V.A.** [Dunamic mixed problems from the elasticity for nonclassical domains]. Moscow, Nauka Publ, 1979 320 с.
5. **Vorovich I.I., Babeshko V.A., Prakhina O.D.** Dinamika massivnih tel I resonansnie iavlenia v deformiruemih sredah [Dynamic of the mass bodies and resonance phenomena in deformable media] Moskow, Nauka, 1999, 246 с.
6. **Kalinchuk V.V., Belinkova T.I.** Dinamika poverhnosti neodnorodnih sred [Dynamic of the surface heterogeneity madia] Moscow, Fismatlit, 2009, 312 с.

УДК 539.3

НЕСООТВЕТСТВИЯ КЛАССИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ ФОРМАМ КАНОНИЧЕСКИХ И РЕАЛЬНЫХ ТЕЛ*

Г. А. Журавлев

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону, Россия

Повышение точности решений контактных задач механики твердого деформируемого тела имеет большое теоретическое и прикладное значение. Именно из этих соображений сфера применимости классических решений контактных задач Герца-Беляева ограничена показателями [1, 2], при несоответствии которым должны быть использованы решения других (неклассических) задач [1].

* Работа выполнена при поддержке Южного федерального университета (№213.01-2014/03вг).

Вместе с тем, даже для канонических тел (а также - для тех реальных контактных узлов, соответствие которым классических решений традиционно, уже около ста лет, считается общепризнанным по комплексу условий) существует одно одинаковое ограничение. Этим ограничением является весьма неопределенное условие малости области контакта относительно общих контактных поверхностей. Отсутствие представлений о количественных оценках ограничений (и о самих причинах их отсутствия) привело к необоснованно широкой сфере применения классических решений. Уже с середины XX-го века происходит накопление в мировой научной литературе описаний серьезных противоречий (не находивших своего объяснения с позиций традиционных представлений о критериях применимости классических решений) теории и практики контактных расчетов. Как следствие, отсутствие достоверных ограничений применимости классических решений надолго стало и остается до сих пор откровенным тормозом прогресса разных отраслей техники.

Здесь поставлены цели доказательства необоснованности (и недостаточности) традиционных оценок ограничений применимости классических задач, объяснения причин отсутствия их количественных оценок и выделения факторов, определяющих границы точности классических решений. Будут показаны основы выделения количественных оценок показателя малости области контакта и дополнительных весьма значимых ограничений размеров области контакта. Для этого решены задачи комплексного анализа выявленных ранее взаимосвязей основных факторов контакта [3...9].

Решения этих задач получены двумя разными аналитическими бесконтактными методами, применение которых позволило избежать использования ряда упрощений (например, принципа геометрической неизменности формы и решений Буссинеска-Черутти) классических задач. Но при этом для корректности сравнения с классическими решениями сохранены такие их требования как изотропность, однородность и идеальная (в рамках действия закона Гука) упругость материалов сжимаемых тел, а также - отсутствие учета динамических явлений, трения (скольжения и качения) и промежуточного смазочного слоя. Сохранен и принцип герцевского эллипсоидального закона контактного давления, который использован нами с внесением обоснованных изменений (разных для каждого из двух аналитических методов) некоторых его параметров. В результате выявлен ряд неизвестных ранее эффектов особо значимой роли кривизны контактных элементов, в том числе - эффекты кривизны контакта (эффекты существенно большего, относительно традиционных представлений, влияния кривизны контактирующих тел на снижение максимальных нормальных напряжений и на рост допускаемой контактной нагрузки), эффекты сверхклассического роста максимальных касательных напряжений в глубине области контакта и эффекты неклассического изменения вида контактного отказа.

Сравнительный анализ максимальных нормальных контактных напряжений и перемещений реальных тел сложной формы (например – эвольвентных зубчатых колес) выполнен бесконтактным двумерным аналитическим методом. Построена математическая модель [6] в виде прямоугольной упругой консольной пластины (жестко закреплённой вдоль одной из её длинных сторон) постоянной толщины и постоянной ширины (рис. 1), находящейся под действием поперечной контактной нагрузки с равнодействующей силой F . Контактная нагрузка распределена по параболическому закону вдоль отрезка прямой линии ef , параллельной линии заделки и направлена по нормали к контактной поверхности, что идеально соответствует условиям классических задач (условиям эллипсоидального закона контактного давления при предельно малой ширине области контакта и при направлении удельных сил по нормали к контактной поверхности) и делает сравнительный анализ более четким. Прямоугольную систему координат $Oxyz$ вводим таким образом, чтобы плоскость xz совпала со срединной плоскостью пластины, ось Oy совпала с её закрепленной стороной, а точка k центра отрезка действия распределенной нагрузки имела координаты $(c, 0)$. При этом сама распределенная нагрузка оказывается в плоскости xz . Перемещения пластины определяем по линии приложения силы.

Поскольку сфера достоверности методов анализа перемещений консольной пластины ограничена использованием гипотез Кирхгофа-Лява (положенных в основу метода [10]), анализом численным методом МКЭ в формате 3D было показано, что двумерный аналитический метод качественно правильно отражает (при отсутствии влияния краевых эффектов и потери устойчивости конструкции реальной пластины конечной длины) влияние характера нагружения и различных геометрических параметров консольной пластины.

Уровень ортогональной контактной нагрузки пластины F и параметры закона ее распределения q_i определены условиями контакта упругих тел с начально-точечным касанием. Радиус R_{12} продольной кривизны воображаемого упругого ролика в ненагруженном состоянии является исходным параметром, а в нагруженном состоянии он определен как функция деформативности обоих тел.

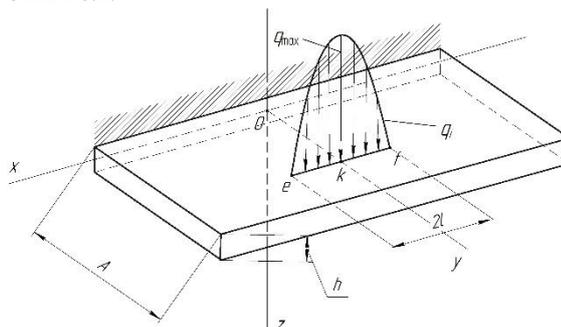


Рис. 1. - Консольная пластина (с жесткой заделкой) под действием нагрузки, распределенной вдоль отрезка, параллельного линии заделки пластины

В работе [10] рассматривается поведение бесконечно длинной консольной пластины под действием сосредоточенной нагрузки, перпендикулярной к срединной (по толщине) плоскости пластины. Даются точные (в виде интегралов с бесконечными пределами) выражения для вычисления поперечного перемещения срединной поверхности пластины W . Используется функция $K^*(\xi, \eta, \zeta)$, которая является компонентом функции перемещений, возникающих в теле рассматриваемой пластины от действия сосредоточенной силы F :

$$W^*(\eta) = -\frac{FA^2}{\pi N} K^*(\eta) \quad (1)$$

Здесь и далее: A - ширина пластины; $N = \frac{E h^3}{12(1-\mu^2)}$ - цилиндрическая жесткость

пластины; c - расстояние от отрезка ef до линии заделки; x, y - координаты расчетной точки; q_0 - контактное давление в центре загруженного отрезка; E - модуль Юнга; μ - коэффициент Пуассона; h - толщина пластины; q - интенсивность нагрузки вдоль отрезка ef ; q_{\max} - интенсивность нагрузки в центральной точке загруженной области пластины; а также - безразмерные параметры:

$$\xi = \frac{x}{A}, \quad \eta = \frac{y}{A}, \quad \zeta = \frac{c}{A}.$$

Для случая нагрузки, распределенной по параболическому закону

$$q = \frac{(\lambda^2 - \varepsilon^2)3P_\Sigma}{4\lambda^3},$$

где: ε - безразмерное расстояние от текущей точки приложения нагрузки q_i до центра отрезка, получаем

$$W_j = \frac{3P_\Sigma A^2}{8\pi N \lambda_o^3} \int_0^\infty \frac{\phi_j(\xi, r, \nu)}{\nu^6 \Delta(\nu)} \cos(\nu \eta) [\sin(\nu \lambda) - \nu \lambda \cos(\nu \lambda)] d\nu. \quad (2)$$

Рассмотрим упругий контакт по эллиптической области с большой (a) и малой (b) полуосями эллипса:

$$a = n_a c_e; \quad b = n_b c_e, \quad \text{где } c_e = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot \frac{F \eta_{\Sigma}}{\Sigma k}}.$$

Задавая $\sigma_{\max} = const$, можно определить (следуя теории контактной прочности на базе нормальных напряжений) допускаемую силу сжатия двух тел:

$$F_p = \frac{2}{3} \pi a b \sigma_{\max,p}$$

При увеличении (в результате действия неравномерных изгибно-сдвиговых деформаций) приведенного радиуса кривизны $\rho = \frac{R_{11} R_{21}}{R_{11} + R_{21}}$ в φ_p раз получаем рост уровня F_p в φ_F раз:

$$B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{21}} \right), \quad R_{22} = \infty,$$

где $R = R_{12}$ - главный радиус кривизны контактных поверхностей.

Для анализа выполнены расчеты при разных уровнях эллиптичности ($0 < e < 1$) площадки контакта с учетом увеличения (рис.2) радиуса R_{11} на величину ΔR_{com} , частично снижающего (компенсирующего) исходную локализацию области контакта: $\Delta R_{com} = R - R_0$. Показано, что уровень влияния компенсационных деформаций возрастает по мере увеличения продольной локализации герцевского контакта.

Получено хорошее совпадение результатов по различным формулам: по мере уменьшения величины эксцентриситета e эллипса области контакта влияние роста меньшего приведенного радиуса ρ на снижение контактных напряжений возрастает в соответствии с показательной зависимостью [4, 5, 6]

$$F_p = c \rho^k; \quad k \geq 1,$$

где показатель степени k учитывает изменение второго приведенного радиуса кривизны. Эта зависимость легла в основу выявления эффектов кривизны контакта - эффектов существенно большего, относительно традиционных представлений, влияния кривизны контактирующих тел на максимальные нормальные напряжения и на допускаемую контактную нагрузку. Эффекты кривизны контакта определены избирательным механизмом проявления роли кривизны как одного из основных геометрических параметров, контактирующих тел.

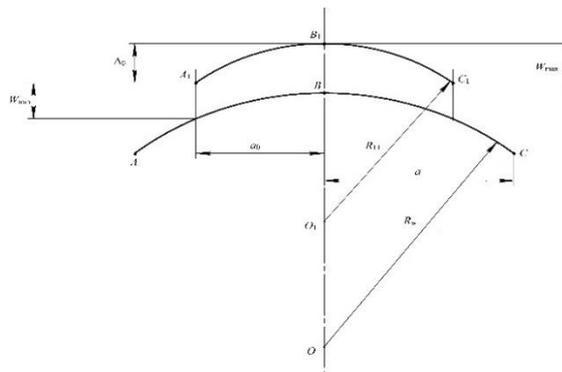


Рис. 2. - Конфигурации продольных линий контактной поверхности без учета общих деформаций консольной пластины (линия $A_1B_1C_1$) и с их учетом (линия ABC)

При увеличении локализации области контакта (например, типичной для эвольвентной зубчатой передачи) классическое решение дает завышение результатов расчета максимальных контактных напряжений примерно на 50%. Уменьшение локализации контакта приводит к снижению этой погрешности вплоть до асимптотического приближения (в случае НЛК) к классическим значениям. Показано, что к показателям несоответствия классических решений контактных задач Герца-Беляева каноническим и многим реальным телам относится не только завышенный размер (условие малости) области контакта, но и ее заниженный размер – в зависимости от формы контактирующих тел и кривизны их контактных элементов.

Показана природа степенной взаимосвязи факторов F_p и ρ типа $F_p = c\rho^k$, в которой параметр k возрастает (от $k = 1$) в зависимости от коэффициента φ_R деформационного увеличения главного приведенного радиуса кривизны контактирующих тел вдоль нагруженного выступа.

Дано объяснение противоречивости результатов определения максимальных касательных напряжений и глубины их залегания в области контакта параллельных круговых цилиндров (роликов), полученных аналитическим и численным методами.

В основу оценки решения Беляева [11] положено точное решение плоской задачи Мухелишвили [12] о сжатии отдельно взятого цилиндра двумя противоположно направленными сосредоточенными силами. Использован (на основе принципа суперпозиции сил) герцевский закон контактного давления, что создавало возможности полного совпадения с задачей Герца [7, 8, 9] без упрощений классических задач в части использования решений Буссинеска-Черутти с заменой исследуемого цилиндра полупространством. Проверка условий суперпозиции сил (с изменением их направления относительно классических требований) и нарушения условий бесконечной длины цилиндров показали отсутствие заметного их влияния.

Традиционно считается, что относительные величины $\tau_{\max} / \sigma_{z \max}$ и $h_{\tau \max} / b$ (максимальных касательных напряжений τ_{\max} и глубины их залегания $h_{\tau \max}$) в области контакта упругих круговых цилиндров не зависят от кривизны контактирующих тел. Считается также, что они полностью определены только одним параметром b/a формы площадки их контакта. Различие между классическими и полученными результатами [9] дано на примере решения плоской задачи, соответствующей НЛК контактирующих упругих тел. Случай НЛК ($b/a = 0$) особо характерен для анализа роли радиуса цилиндра R_c и полуширины площадки контакта b , поскольку отношение $b/a = 0$ для НЛК является неизменным при любых значениях R_c и b .

Согласно решению задачи [9] о действии на цилиндр герцевского контактного давления запишем выражения, соответственно, для нормальных напряжений, направленных параллельно осям Ox и Oz (рис. 3), и для касательных напряжений:

$$\sigma_x = - \int_{-\alpha_b}^{\alpha_b} \frac{\sigma_H(\alpha)}{\pi} \cdot \left[2 \cdot \frac{\sin^2 \omega_1(\alpha) \cdot \cos \omega_1(\alpha)}{r_1(\alpha)} + 2 \cdot \frac{\sin^2 \omega_2(\alpha) \cdot \cos \omega_2(\alpha)}{r_2(\alpha)} - L_{p\alpha}(\alpha) \right] R_c d\alpha;$$

$$\sigma_z = - \int_{-\alpha_b}^{\alpha_b} \frac{\sigma_H(\alpha)}{\pi} \cdot \left[2 \cdot \frac{\cos^3 \omega_1(\alpha)}{r_1(\alpha)} + 2 \cdot \frac{\cos^3 \omega_2(\alpha)}{r_2(\alpha)} - L_{p\alpha}(\alpha) \right] R_c d\alpha;$$

$$\tau = -2 \cdot \int_{-\alpha_b}^{\alpha_b} \frac{\sigma_H(\alpha)}{\pi} \cdot \left[\frac{\sin \omega_1(\alpha) \cdot \cos^2 \omega_1(\alpha)}{r_1(\alpha)} + \frac{\sin \omega_2(\alpha) \cdot \cos^2 \omega_2(\alpha)}{r_2(\alpha)} \right] R_c d\alpha.$$

Здесь α_b - центральный угол сектора окружности радиуса R_c , охватывающий дугу этой окружности длиной b_H ; $\sigma_H(\alpha)$ - давление, соответствующее герцевскому закону $\sigma_H(\alpha R_c)$.

При применении этих формул для расчета касательных напряжений в точках, лежащих на оси z (рис. 3), максимальные касательные напряжения рассчитываем по формуле:

$$\tau(r_1, \omega_1; r_2, \omega_2; \phi) = \frac{\sigma_z(r_1, \omega_1; r_2, \omega_2) - \sigma_x(r_1, \omega_1; r_2, \omega_2)}{2}$$

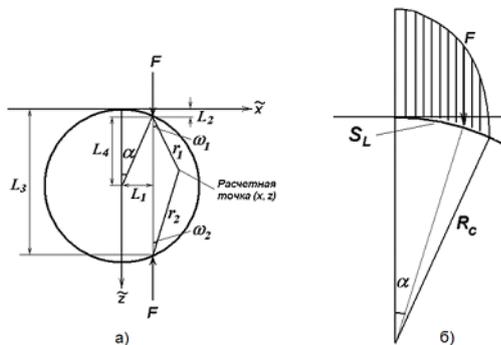


Рис. 3. Геометрические параметры цилиндра, нагруженного силами F :
 а – сечение цилиндра в задаче Мусхелишвили; б – распределение удельных сил на полуширине области контактного нагружения в задаче [9] (S_L – длина дуги до точки действия элементарной силы F ; α – угол приложения элементарной силы F).

Определен параметр, характеризующий уровень искажения классическим решением учета влияния кривизны контактирующих тел на величину максимальных касательных напряжений и глубину их залегания. Например, при значении этого параметра $b_H / R_c = 0,14$ классическое решение дает занижение результатов по величинам τ_{max} (на 10,6 %). Уменьшение значения этого параметра приводит к монотонному снижению величин максимальных касательных напряжений вплоть до асимптотического приближения к классическим константам 0,300.

Как следствие отсутствия достоверных границ применимости классических решений контактных задач в теории и практике контактных расчетов, уже давно стали типичными публикации, содержащие оценки точности классических решений. Если при такой оценке проявляется очевидная противоречивость полученных результатов, она бездоказательно сводится к выводу об ошибочности (или необъяснимости) эксперимента (выполненного расчетом численным методом или испытанием натуральных образцов), но расчеты классическим методом при этом остаются вне сомнения. Например, в статье [13] дан анализ результатов подобной оценки [14] классического метода определения максимальных касательных напряжений (в контакте канонических тел) его сравнением с численным методом МКЭ. Аналитически и численно было показано [13], что вывод авторов статьи [14] об ошибочности результатов МКЭ сделан совершенно бездоказательно, а в действительности ошибочными являются результаты классического метода.

Выводы.

1. Причины низкой точности традиционных оценок ограничений применимости классических решений контактных задач обусловлены тем, что вытекающие из этих решений взаимосвязи основных факторов контакта не отражают в полной мере особенности геометрической формы контактирующих тел и особое влияние кривизны контактных элементов канонических и реальных тел.

2. Аналитическим (для канонических тел) и приближенно-аналитическим (для тел сложной формы) бесконтактными методами получены взаимосвязи основных факторов контакта, являющиеся базой для определения количественных оценок ограничений применимости классических решений по разным условиям размера области контакта, зависящим от формы тел и от кривизны их контактных элементов.

3. Основным геометрическим параметром, количественно и качественно определяющим уровень соответствия классических решений по условиям оценки размера

области контакта (в том числе – по традиционному условию малости области контакта), является кривизна контактных элементов.

4. Традиционно сложившееся широкое применение классических решений контактных задач в теории и практике расчетов канонических тел и ряда реальных контактных узлов не является обоснованным ни теоретически, ни экспериментально.

8. Полученные уточнения решений классических контактных задач дают основу для разработки обоснованной системы ограничений сферы применимости классических решений. Эти уточнения привели к выявлению ряда эффектов особо значимой роли кривизны контактных элементов, например, эффектов кривизны контакта.

9. Выявление ряда эффектов особо значимой роли кривизны контактных элементов позволило дать объяснение разным противоречивым результатам (опубликованным в мировой литературе и признанными необъяснимыми, в том числе - не получивших своего объяснения за 20-50 лет после публикации результатов) оценки точности классических решений контактных задач применительно как к каноническим, так и к реальным телам.

10. Эффекты кривизны контакта нашли применение в кардинальном улучшении ресурсно-прочностных показателей (не достигаемых при выборе их геометрических параметров на базе классических решений контактных задач) реальных контактных узлов (Patent Application PCT/RU2005/000367. July 05, 2005), в том числе – в вертолетостроении, в железнодорожном подвижном составе и в машинах городского транспорта.

Библиографический список:

1. **Ворович, И.И.** Неклассические смешанные задачи теории упругости / И.И. Ворович, В.М. Александров, В.А. Бабешко //Изд. «НАУКА» - Гл. Редакция физ-мат литературы – М., 1974, 455 С.

2. **Биргер, И.А.** Справочник. Прочность, устойчивость, колебания //Под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. Т.2, 464с.

3. **Журавлев, Г.А.** Об одной особенности напряженного состояния в контакте упругих тел двойной кривизны / Г.А. Журавлев / Тезисы докладов межведомственного научного совета по трибологии при АН СССР «Проблемы контактного взаимодействия, трения и износа», Ростов-на-Дону, 1990, с.44. (для тел сложной формы с двойной кривизной контактных элементов)

4. **Zhuravlev, G.A.** Conditions of Teeth Tribocontact and Ways of Improving Gear Pairs / G.A. Zhuravlev /Journal of Friction and Wear, New York, USA. –Vol.20. –N2. –1999. – pp. 57-69. (для тел сложной формы с двойной кривизной контактных элементов)

5. **Журавлев, Г.А.** Условия трибосопряжения зубьев и пути совершенствования зубчатых зацеплений / Г.А. Журавлев / Международный журнал «Трение и износ». Минск. Т20, №2, 1999г. с.с. 175-188.

6. **Журавлев, Г.А.** Математическая модель контакта упругих тел с нагруженными выступами / Г.А. Журавлев // Сборник статей Международной научно-практической конференции "Теоретические и практические аспекты технических наук"(г.Уфа, 29.12.2014г.)//АЭТЕРНА, г.Уфа, 2014г., С.16-23.

7. **Журавлев, Г.А.** Перемещения консольной пластины бесконечной длины / Г.А. Журавлев, В.М. Онишкова / ВИНТИ –№ 6266 - В87, 17.07.1987, Москва - 17 С.

8. **Журавлев Г.А.** К определению глубинных напряжений в области контакта упругих цилиндров / Г.А. Журавлев, А.Д. Азаров, И.С. Бабенко // Изв. вузов. Сев. -Кавк. регион. Естеств. науки, 2013, № 1 (173), С. 26-30.

9. **Беляев, Н.М.** Вычисление наибольших расчетных напряжений при сжатии соприкасающихся тел / Н.М. Беляев / Сборник «ЛИИПС», выпуск 102, Ленинград, 1929.

10. **Мухелишвили, Н.И.** Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мухелишвили // М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1966, 708 с.

11. **Журавлев, Г.А.** Сближение упругих тел, моделируемых круговыми цилиндрами / Г.А. Журавлев, В.А. Карпенко // Техника машиностроения, 2000г., №6, с.51-55.

12. **Журавлев, Г. А.** Физическое объяснение противоречивости оценок контактного сближения упругих параллельных круговых цилиндров / Г.А. Журавлев // Материалы Международной конференции «XVIII сессия Международной школы по моделям механики сплошной среды»//Саратов: Изд-во Саратовского университета, 2007 – С. 127-129.

13. **Zhuravlev, G.** On The Contradictory Values of Stresses in the Area of Contact of Two Parallel Rollers, Volume 4, Issue VII, IJRASET / G. Zhuravlev, Yu. Drobotov, A. Piskunov // ISSN: 2321-9653, July 2016, Pp 410-416.

14. **Purushothaman, P.** Hertz Contact Stress Analysis and Validation Using Finite Element Analysis / P. Purushothaman, P. Thankachan // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)// V. 2, Issue XI, Nov. 2014 – P.531-538.

Bibliography:

1. **Vorovich, I.I.** Neklassicheskie smeshannye zadachi teorii uprugosti / I.I. Vorovich, V.M. Aleksandrov, V.A. Babeshko // Izd. «NAUKA» - Gl. Redakciya fiz-mat literatury – M., 1974, - p. 455

2. **Birgera, I.A.** Spravochnik. Prochnost, ustojchivost, kolebaniya //Pod red. I.A. Birgera i YA.G. Panovko. – M.: Mashinostroenie, 1968. Vol.2, - p.464.

3. **Zhuravlev, G.A.** Ob odnoj osobennosti napryazhennogo sostoyaniya v kontakte uprugih tel dvojnoj krivizny / G.A. Zhuravlev // Tezisy dokladov mezhdunarodnogo nauchnogo soveta po tribologii pri AN SSSR «Problemy kontaktnogo vzaimodejstviya, treniya i iznosa», Rostov-na-Donu, 1990, - p. 44

4. **Zhuravlev, G.A.** Conditions of Teeth Tribocontact and Ways of Improving Gear Pairs / G.A. Zhuravlev /Journal of Friction and Wear, New York, USA. –Vol.20. – No.2. –1999. – pp. 57-69.

5. **Zhuravlev, G.A.** Usloviya tribosopryazheniya zub'ev i puti sovershenstvovaniya zubchatyh zaceplenij/ G.A. Zhuravlev // Mezhdunarodnyj zhurnal «Trenie i iznos». Minsk. T20, No.2. -1999. -pp. 175-188.

6. **Zhuravlev, G.A.** Matematicheskaya model' kontakta uprugih tel s nagruzhennymi vystupami/ G.A. Zhuravlev // Sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Teoreticheskie i prakticheskie aspekty tekhnicheskikh nauk"(Ufa, 29.12.2014g.)//AEHTERNA, Ufa, -2014. - pp.16-23.

7. **Zhuravlev, G.A.** Peremeshcheniya konsol'noj plastiny beskonechnoj dliny / G.A. Zhuravlev, V.M Onishkova // VINITI –No. 6266 - B87, 17.07.1987, Moskva – p. 17.

8. **Zhuravlev, G.A. Azarov A.D., Babenko I.S.** K opredeleniyu glubinnih napryazhenij v oblasti kontakta uprugih cilindrov / G.A. Zhuravlev, A.D. Azarov, I.S. Babenko // Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki, 2013, No.1 (173), - pp. 26-30.

9. **Belyaev, N.M.** Vychislenie naibol'shih raschetnyh napryazhenij pri szhatii soprikasayushchihya tel / N.M. Belyaev // Sbornik «LIIPS», vypusk 102, Leningrad, 1929.

10. **Muskhelishvili, N.I.** Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti / N.I. Muskhelishvili // M.: Nauka, Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury, -1966. – p.708.

11. **Zhuravlev, G.A.** Sblizhenie uprugih tel, modeliruemyh krugovymi cilindrami / G.A. Zhuravlev, V.A. Karpenko // Tekhnika mashinostroeniya, 2000. N6, - pp.51-55.

12. **Zhuravlev, G. A.** Fizicheskoe ob'yasnenie protivorechivosti ocenok kontaktnogo sblizheniya uprugih paralel'nyh krugovyh cilindrov / G.A. Zhuravlev // Materialy Mezhdunarodnoj konferencii «XVIII sessiya Mezhdunarodnoj shkoly po modelyam mekhaniki sploshnoj sredy»//Saratov: Izd-vo Saratovskogo universiteta, 2007 – p. 127-129.

13. **Zhuravlev, G.A.** On The Contradictory Values of Stresses in the Area of Contact of Two Parallel Rollers, Vol. 4, Issue VII, IJRASET / G.A. Zhuravlev, Yu. Drobotov, A. Piskunov // ISSN: 2321-9653, July 2016, - pp. 410-416.

14. **Purushothaman, P.** Hertz Contact Stress Analysis and Validation Using Finite Element Analysis / P. Purushothaman, P. Thankachan // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)// Vol. 2, Issue XI, Nov. 2014 – p.531-538.

УДК 539.375.6: 531.4: 536.212

ВЛИЯНИЕ РАЗОГРЕВА ОТ ТРЕНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ ПОКРЫТИЙ*

В.Б. Зеленцов, Б.И. Митрин, И.А. Лубягин
Донской государственный технический университет

Введение. На транспорте для защиты рабочих поверхностей механизмов и машин широко применяются покрытия различного назначения: антифрикционные, антикоррозийные, износостойкие и т.п. В узлах трения на скользящем контакте с увеличением относительной скорости трущихся поверхностей сопровождается ростом температуры, а при определенных условиях срывается на галопирующий рост как температуры, так и напряжений [1–8], который часто называют термоупругой неустойчивостью (ТУН) скользящего контакта. В таких условиях износ покрытия усиливается и может приобрести катастрофический характер. Определение условий возникновения ТУН на стадии проектирования узлов трения или в период их эксплуатации является важнейшей задачей предотвращения катастрофического износа механизмов и машин.

Изучение износостойкости покрытий проводится в рамках квазистатической модели термоупругости [5,8]. Подробно исследуется процесс ускорения износа покрытия на скользящем контакте в зависимости от температуры разогрева контакта от трения, от относительной скорости трущихся поверхностей и других параметров задачи.

Постановка задачи. Для изучения зависимости износостойкости покрытия от разогрева скользящего контакта рассматривается квазистатическая контактная задача плоской деформации о скольжении жёсткого теплоизолированного тела в виде полуплоскости I ($h \leq x < \infty$), движущегося с постоянной скоростью V по поверхности $x = h$ упругого теплопроводящего покрытия толщины h ($0 \leq x \leq h$). При скольжении на контакте развивается кулоновское трение, сопровождающееся разогревом и абразивным износом покрытия. Нижняя поверхность покрытия жестко сцеплена с недеформируемой нетеплопроводной подложкой в виде полуплоскости II ($-\infty < x < 0$). Поток тепла, образующийся на контакте за счет трения, направлен в упругое покрытие. С начального момента времени движущееся вдоль оси y жёсткое тело деформирует поверхность $x = h$ упругого покрытия, смещаясь в направлении, противоположном оси x , по закону $\Delta(t)$. До начального момента покрытие находилось в покое, а его температура равнялась нулю.

Из формулировки рассматриваемой задачи следует, что распределения температуры, напряжений и смещений в покрытии не зависят от выбора координаты на оси y , параллельной направлению движения жёсткого тела (полуплоскости I), и являются функциями только координаты x и времени t . В таком случае дифференциальные уравнения термоупругости при описании квазистатического напряженно-деформированного состояния покрытия имеют вид [9]

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 15-07-05208-а, 16-07-00929-а), стипендии Президента РФ для молодых ученых и аспирантов СП-137.2015.1 и Госзадания Минобрнауки РФ.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha \frac{\partial T}{\partial x}, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad 0 \leq x \leq h, \quad t > 0 \quad (1)$$

где ν , α – коэффициент Пуассона и коэффициент линейного расширения материала покрытия, $u(x, t)$, $w(x, t)$ — вертикальные и горизонтальные смещения, $T(x, t)$ — температура в покрытии. Для описания температуры $T(x, t)$ в покрытии используется дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad 0 \leq x \leq h, \quad t > 0 \quad (2)$$

где κ — коэффициент температуропроводности.

Связь между нормальными $\sigma_{xx}(x, t)$ и касательными $\sigma_{xy}(x, t)$ напряжениями, смещениями $u(x, t)$, $w(x, t)$ и температурой $T(x, t)$ определяется соотношениями Дюамеля – Неймана

$$\sigma_{xx}(x, t) = \frac{2\mu(1-\nu)}{1-2\nu} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2\mu(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha T, \quad \sigma_{xy}(x, t) = \mu \frac{\partial w}{\partial x} \quad (3)$$

где μ — модуль сдвига.

Граничные условия рассматриваемой задачи об износостойкости покрытия следующие

механические:

$$\begin{aligned} u(h, t) &= -\Delta(t) + u_w(t), & \sigma_{xy}(h, t) &= -f\sigma_{xx}(h, t) & t > 0 \\ u(0, t) &= 0, & w(0, t) &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

температурные:

$$K \frac{\partial T(h, t)}{\partial x} = -fVm\sigma_{xx}(h, t), \quad K \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = kT(0, t) \quad t > 0 \quad (5)$$

где f — коэффициент трения, K — коэффициент теплопроводности, k — коэффициент теплообмена, $u_w(t)$ — осадка полуплоскости I за счет износа покрытия, m — часть тепла, попадающая в покрытие. Для описания абразивного износа используется модель, согласно которой осадка $u_w(t)$ жёсткого тела (полуплоскости I) за счет износа покрытия определяется формулой [1, 2]

$$u_w(t) = -fVK^* \int_0^t \sigma_{xx}(h, \tau) d\tau \quad t > 0 \quad (6)$$

где $\sigma_{xx}(h, t)$ — нормальные напряжения сжатия на контакте, K^* — коэффициент пропорциональности между работой сил трения и количеством удаленного материала.

Начальные условия задачи на смещения, их скорости и температуру нулевые.

Заметим, что вертикальные смещения $u(x, t)$, нормальные напряжения $\sigma_{xx}(x, t)$ и температура $T(x, t)$ в покрытии определяются независимо от горизонтальных смещений $w(x, t)$.

Решение задачи. Решение поставленной задачи об износе покрытия определяется с помощью интегрального преобразования Лапласа [10]. В результате обращения преобразования Лапласа решение задачи — температура $T(x, t)$, смещения $u(x, t)$, напряжения $\sigma_{xx}(x, t)$ в покрытии — записываются в виде свёрток Лапласа

$$T(x,t) = \frac{1-\nu}{1+\nu} \frac{\hat{V}}{\alpha h} \int_0^t \Delta(\tau) f_T(x,t-\tau) d\tau \quad 0 \leq x \leq h, \quad t > 0 \quad (7)$$

$$u(x,t) = -\Delta(t) \frac{x}{h} + \int_0^t \Delta(\tau) f_u(x,t-\tau) d\tau \quad 0 \leq x \leq h, \quad t > 0 \quad (8)$$

$$\sigma_{xx}(x,t) = -\frac{2\mu(1-\nu)}{(1-2\nu)h} \left(\Delta(t) - \int_0^t \Delta(\tau) f_\sigma(x,t-\tau) d\tau \right) \quad 0 \leq x \leq h, \quad t > 0 \quad (9)$$

$$f_{T,u,\sigma}(x,t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma} \frac{N_{T,u,\sigma}(x,z)}{t_\kappa R(z)} e^{z\tilde{t}} dz \quad \tilde{t} = \frac{t}{t_\kappa}, \quad t_\kappa = \frac{h^2}{\kappa} \quad (10)$$

$$N_T(x,z) = \sqrt{z} \left(\text{Bi sh } \sqrt{z} \frac{x}{h} + \sqrt{z} \text{ch } \sqrt{z} \frac{x}{h} \right) \quad (11)$$

$$N_u(x,z) = \hat{V} \left[\text{Bi ch } \sqrt{z} \frac{x}{h} + \sqrt{z} \text{sh } \sqrt{z} \frac{x}{h} - \frac{x}{h} (1-k_w) r(z) - \left(1 - \frac{x}{h} \right) \text{Bi} \right] \quad (12)$$

$$N_\sigma(x,z) = \hat{V} [\text{Bi} - (1-k_w) r(z)] \quad (13)$$

$$R(z) = zr(z) - \hat{V} [(1-k_w) r(z) - \text{Bi}], \quad r(z) = \text{Bi ch } \sqrt{z} + \sqrt{z} \text{sh } \sqrt{z} \quad (14)$$

$$\hat{V} = \frac{fV\mu\alpha}{K} \frac{2\mu(1+\nu)h}{1-2\nu}, \quad \text{Bi} = \frac{kh}{K}, \quad k_w = \frac{1-\nu}{1+\nu} \frac{KK^*}{m\alpha\kappa}$$

где k_w в (13) дано после (14). В квадратурах (10) подынтегральные функции являются регулярными на бесконечности ($|z| \rightarrow \infty$), а внеинтегральные члены в формулах для $u(x,t)$ (8) и $\sigma_{xx}(x,t)$ (9) являются регулярными составляющими полученных обобщенных решений. Для вычисления квадратур (10), подынтегральные функции в которых мероморфны в комплексной плоскости, используются методы теории функций комплексного переменного. В предположении, что полюсы подынтегральных функций в (10) известны в комплексной плоскости и однократны, для вычисления этих квадратур применяется теорема о вычетах. Подставив получившиеся в результате вычисления квадратур формулы для f_T, f_u, f_σ в (7)–(9) и вычислив вслед за этим интегралы свертки, получим формулы для $T(x,t), u(x,t), \sigma_{xx}(x,t)$ в виде рядов по полюсам ζ_k подынтегральных функций из (10)

$$T(x,t) = \frac{1-\nu}{1+\nu} \frac{\hat{V}}{\alpha h} \sum_{k=0}^{\infty} B_T(x, \zeta_k) D(\zeta_k, t) \quad 0 \leq x \leq h, \quad t > 0 \quad (15)$$

$$u(x,t) = -\frac{x}{h} \Delta(t) + \sum_{k=0}^{\infty} B_u(x, \zeta_k) D(\zeta_k, t) \quad 0 \leq x \leq h, \quad t > 0 \quad (16)$$

$$\sigma_{xx}(x,t) = -\frac{2\mu(1-\nu)}{(1-2\nu)h} \left[\Delta(t) - \sum_{k=0}^{\infty} B_\sigma(x, \zeta_k) D(\zeta_k, t) \right] \quad 0 \leq x \leq h, \quad t > 0 \quad (17)$$

в которых

$$B_{T,u,\sigma}(x,z) = \frac{N_a(x,z)}{t_\kappa R'(z)} \quad D(z,t) = \int_0^t \Delta(\tau) \exp(z(t-\tau)/t_\kappa) d\tau \quad t > 0 \quad (18)$$

В (18) функции $N_T(x,z), N_u(x,z), N_\sigma(x,z)$ даны в (11)–(13), $R'(z)$ обозначена производная $R(z)$.

Полюсы подынтегральных функций ζ_k . Полюсы подынтегральных функций ζ_k $k = 0, 1, 2, \dots$, по которым строятся решения задачи (15)–(17), являются корнями уравнения $R(z) = 0$ в комплексной плоскости, где $R(z)$ из (14). Полюсы ζ_k зависят от трех безразмерных параметров \hat{V} , k_w , Vi , содержащихся в $R(z)$, которые влияют на их расположение в комплексной плоскости. На рис. 1 для $\hat{V} \in [0, \infty)$, $Vi = 100$ и различных k_w приведены траектории $\zeta_k(\hat{V})$ $k = 0, 1$, причем $\zeta_0(\hat{V})$ — сплошной линией, $\zeta_1(\hat{V})$ — штриховой. Сплошной квадрат обозначает расположение полюса при $\hat{V} = 0$, выколотый — при $\hat{V} \rightarrow \infty$. Стрелками показано направление расположения полюсов $\zeta_k(\hat{V})$ $k = 0, 1$ при увеличении \hat{V} от 0 до ∞ . Если $\text{Re}(\zeta_k) > 0$, то решения (15)–(17) являются неустойчивыми, так как в этом случае $\lim_{t \rightarrow \infty} \{T(x, t), \sigma_{xx}(x, t)\} = \infty$ ($\text{Im}(\zeta_k) = 0$, область IV) или не существуют ($\text{Im}(\zeta_k) \neq 0$, область III). Если $\text{Re}(\zeta_k) < 0$, то решения (15)–(17) устойчивы ($\text{Im}(\zeta_k) = 0$, область I, $\text{Im}(\zeta_k) \neq 0$, область II). В пространстве безразмерных параметров задачи \hat{V} , k_w , Vi строятся области устойчивых решений (ОУР) и неустойчивых решений (ОНУР) задачи. На рис. 2 представлены ОУР и ОНУР задачи в плоскости $(\hat{V}, \lg k_w)$ для $Vi = 100$. Как выше отмечалось, неустойчивые решения задачи характеризуются неограниченным ростом амплитуд $T(h, t)$, $\sigma_{xx}(h, t)$ при $t \rightarrow \infty$, что часто называют ТУН скользящего контакта. Заметим, что с увеличением $\lg k_w$ граница ОУР расширяется, а ОНУР — сужается (рис. 2).

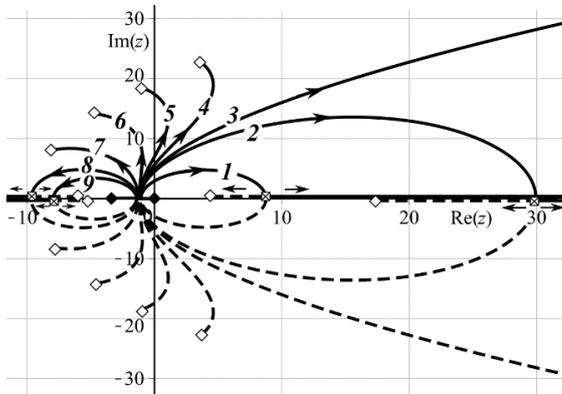


Рис. 1. - Траектории полюсов ζ_0 (сплошная линия) и ζ_1 (штриховая) подынтегральных функций квадратур (10) для $Vi = 100$, $k_w = 0,75$ (1), 0,97 (2), 1,0 (3), 1,05 (4), 1,1 (5), 1,2 (6), 1,5 (7), 2 (8), 2,5 (9) при изменении \hat{V} от 0 до ∞

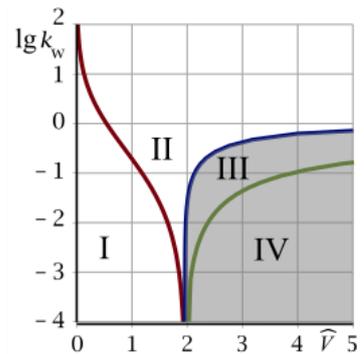


Рис. 2. - Границы и области устойчивых I, II и неустойчивых III, IV решений задачи для $Vi = 100$

Численный анализ полученных решений. Полученные решения используются для исследования износостойкости материалов покрытий при скольжении жёсткого тела (полуплоскости I) по поверхности покрытия из различных материалов, часто используемых на практике. Пусть закон внедрения $\Delta(t)$ жёсткого тела в покрытие состоит из активной на $0 < t < t_\epsilon$ и пассивной на $t_\epsilon < t < \infty$ фазы внедрения, например, вида

$$\Delta(t) = \Delta_0 \begin{cases} -1 + e^{\epsilon t}, & 0 < t < t_\epsilon \\ 1, & t_\epsilon < t < \infty \end{cases}$$

где $t_e = \varepsilon^{-1} \ln 2$ — время окончания (или длительность) активного участка внедрения, Δ_0 — максимальный уровень внедрения жёсткого тела (полуплоскости L) в покрытие.

При исследовании износостойкости покрытий рассматриваются три материала покрытия: сплав никеля, высокопрочный чугун, алюминиевый сплав, параметры которых представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры материалов покрытия

Материал	μ , ГПа	ν	K , Вт/(м·К)	κ , 10^{-6} м ² /с	α , 10^{-6} К ⁻¹	f	K^* , 10^{-12} м ² /Н
Алюминиевый сплав	24,81	0,34	209,3	88,09	22,09	0,47	7,5
Высокопрочный чугун	62,8	0,25	62,8	17,94	10,4	0,16	4,5
Углеродистая сталь	78,6	0,26	48,1	11,0	12,7	0,15	10,0

На рисунке 3 приводятся графики температуры, напряжений, износа покрытия, рассчитанные по формулам (7–9).

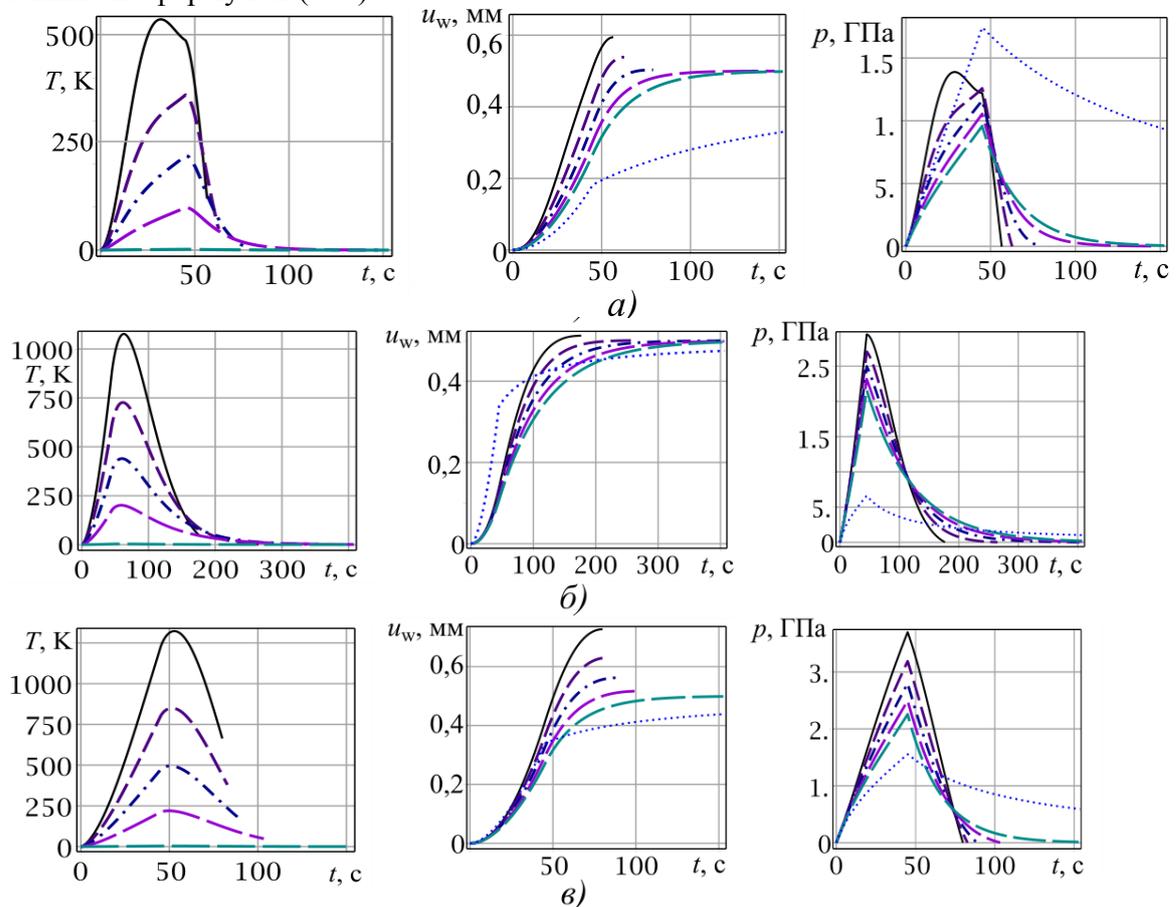


Рис. 3. - Графики температуры $T(h,t)$, износа $u_w(t)$, контактных напряжений $p(t) = -\sigma_{xx}(h,t)$ для различных материалов покрытия: алюминиевый сплав (а), высокопрочный чугун (б), углеродистая сталь (в) при различных значениях m : 2 (—), 1.5 (---), 1 (- · -), 0.5 (— —), 0 (- · · ·). Точечной линией показаны графики износа $u_w(t)$ и контактных напряжений $p(t)$ при отсутствии фрикционного разогрева

Заключение. Рассмотренная модель износа упругого покрытия при скольжении по нему жёсткого тела с учетом трения и разогрева покрытия от трения позволила провести теоретическое исследование износостойкости покрытия в зависимости от величины потока тепла, проникающего в покрытие, от термомеханических свойств материала покрытия, от относительной скорости скольжения трущихся поверхностей на контакте и других параметров контакта.

Библиографический список:

1. **Dow, T.A.** The role of wear in the initiation of thermoelastic instabilities of rubbing contact / T.A. Dow, R.A. Burton J. Lubr. // Technol. — 1973. — Т.95, № 1. — С.71–75.
2. **Александров, В.М.** Контактная задача термоупругости с учетом износа и тепловыделения от трения / В.М. Александров, Г.К. Аннакулова // Трение и износ. — 1990. — Т. 11, № 1. — С. 24–28.
3. **Коваленко, Е.В.** Износ подшипника скольжения с учетом тепловыделения от трения / Е.В. Коваленко, А.А. Евтушенко // Трение и износ. — 1993. — Т.14, № 2. — С. 259–269.
4. **Евтушенко, А.А.** О взаимодействии фрикционного теплообразования и износа на нестационарном контакте скольжения / А.А. Евтушенко, Е.В. Коваленко // ПММ. — 1995. — Т.59, № 3. — С. 485–492.
5. **Евтушенко, А.А.** Влияние изнашивания на развитие термоупругой неустойчивости фрикционного контакта / А.А. Евтушенко, Ю.А. Пыр'ев // Изв. РАН. МТТ. — 1997. — №1. — С. 114–121.
6. **Olesiak, Z.S.** A model of thermoelastic dynamic contact in conditions of frictional heat and wear / Z.S. Olesiak, Y.A. Pyryev // J. Theor. Appl. Mech. — 1998. — Т.36, №2. — С. 305–320.
7. **Александров, В.М.** Учет нелинейного трения, износа и тепловыделения от трения при неидеальном тепловом контакте в задаче о взаимодействии тел с покрытиями / В.М. Александров, Е.А. Губарева // Трение и износ. — 2004. — Т.25, № 5. — С. 347–357.
8. **Зеленцов, В.Б.** Динамическая и квазистатическая неустойчивость скользящего термофрикционного контакта / В.Б. Зеленцов, Б.И. Митрин, С.М. Айзикович // Трение и износ. — 2016. — Т.37, № 3. — С. 280–289.
9. **Коваленко, А.Д.** Введение в термоупругость / А.Д. Коваленко. — Киев: Наукова думка, 1965. — 204 с.
10. **Диткин, В.А.** Операционное исчисление / В.А. Диткин, А.П. Прудников. — М.: Высшая школа, 1975. — 409 с.
11. **Брычков, Ю.А.** Интегральные преобразования обобщенных функций / Ю.А. Брычков, А.П. Прудников. — М.: Наука, 1977. — 288 с.

Bibliography:

1. **Dow, T.A.** The role of wear in the initiation of thermoelastic instabilities of rubbing contact / T.A. Dow, R.A. Burton // Journal of Lubrication Technology. 1973, vol.95, no.1, pp.71–75.
2. **Aleksandrov, V.M.** Thermoelastic contact problem with account for wear and frictional heat release. Soviet Journal of Friction and Wear (English translation of Trenie i Iznos) / V.M. Aleksandrov, G.K. Annakulova // 1990, vol. 11, no. 1, pp. 17–21.
3. **Kovalenko, E.V.** Wear of a sliding bearing with account for frictional heating. Journal of Friction and Wear / E.V. Kovalenko, A.A. Yevtushenko // 1993, vol.14, no.2, pp.259–269.
4. **Yevtushenko, A.A.** The interaction of frictional heating and wear at a transient sliding contact. Journal of Applied Mathematics and Mechanics / A.A. Yevtushenko, Y.V. Kovalenko //1995, vol.59, no.3, pp.485–492.
5. **Yevtushenko, A.A.** Effect of wear on development of thermoelastic instability of frictional contact. Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela / A.A. Yevtushenko, Yu.A. Pyr'yev // 1997. no. 1, pp. 114–121.

6. **Olesiak, Z.S.** A model of thermoelastic dynamic contact of frictional heat and wear. Journal of Theoretical and Applied Mechanics / Z.S.Olesiak, Y.A. Pyryev // 1998, vol. 36, no. 2, pp. 305-320.
7. **Aleksandrov, V.M.** Consideration of nonlinear friction, wear and heat generation in non-ideal heat contacts for the problem on interacting solid and coating / V.M. Aleksandrov, E.A. Gubareva // Trenie I iznos. 2004, vol.25, no. 5, pp. 347–357.
8. **Zelentsov, V.B.** Dynamic and quasi-static instability of sliding thermoelastic frictional contact. Journal of Friction and Wear / V.B. Zelentsov, B.I. Mitrin, S.M. Aizikovich // 2016, vol. 37, no. 3, pp. 213–220, doi:10.3103/S1068366616030181.
9. **Kovalenko, A.D.** Vvedenie v termouprugost' [Introduction to thermoelasticity] / A.D. Kovalenko // Kiev, Naukova Dumka, 2010. 204 pp.
10. **Ditkin, V.A.** Operacionnoe ischislenie / V.A. Ditkin, A.P. Prudnikov // Moscow, Vysshaja shkola, 1975, 409 p.
11. **Brychkov, Yu.A.** Integral Transforms of Generalized Functions / Yu.A Brychkov, A.P. Prudnikov // New York, Gordon and Breach Science Publishers, 1989, 343 p.

УДК 620.22

РАЗРАБОТКА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫХ ЭПОКСИДНЫХ СМОЛ*

Е.Ф. Кудина¹, Н.С. Винидиктова¹, В.А. Гольдаде¹, О.А. Ермолович²

¹Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси»

²Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта»

Введение

Сочетание в эпоксидных смолах ряда высоких эксплуатационных свойств обусловило их широкое применение в качестве основы клеев, лакокрасочных покрытий, компаундов, связующих армированных пластиков и т.д. [1-3]. Однако в ряде случаев использование эпоксидных смол ограничивается их высокой вязкостью, а также невысокими термо- и огнестойкостью материалов на их основе. В связи с этим существенно различаются и требования, предъявляемые к их структуре и свойствам. Проблема получения новых материалов с заданным комплексом свойств в последние годы все чаще решается путем применения градиентных материалов. «Функционально градиентные материалы» или просто «градиентные материалы» характеризуются плавным пространственным изменением состава и свойств по объему. Анализ литературных данных показал, что градиентные материалы находят широкое применение в различных областях: в металлургии, оптике, электронике, биомедицине и т.д. [4, 5]. В настоящей работе исследована возможность получения защитных градиентных покрытий с улучшенными эксплуатационными свойствами путем функционализации эпоксидных смол с последующим модифицированием комбинированной матрицы.

Объекты и методы исследований

Объектом исследования являются композиции на основе эпоксидной смолы (ЭС). В качестве ЭС использовали эпоксидиановую смолу ЭД-20, которая представляет собой жидкий реакционноспособный олигомерный продукт на основе диглицидилового эфира дифенилпропана.

* Работа выполнена в рамках проекта БР ФФИ Т15-102.

Функционализацию ЭС осуществляли путем введения фенольной составляющей для получения бинарной основы покрытия – ЭС/фенольная составляющая – формирующей при отверждении комбинированную матрицу. В качестве фенольной составляющей использовали 2 компонента: 1) 50 %-ный спиртовой раствор фенольной смолы СТ 1138 – продукт конденсации фенола и анилина с формальдегидом в присутствии щелочного катализатора (ФС); 2) композиционный материал лак Ф-40 – раствор каучука и модифицированной фенольной смолы в органическом растворителе (ФЛ). Связующие для получения комбинированных органических матриц покрытий готовили путем механического смешения компонентов.

Образцы покрытий получали путем нанесения композиции на основе смесей ЭС/ФС и ЭС/ФЛ на металлическую подложку с последующим отверждением при $T=180^{\circ}\text{C}$ без дополнительного введения отвердителя.

Для изучения физико-механических свойств материалов получали объемные образцы на основе ЭС и смесей ЭС/ФС и ЭС/ФЛ, отверждаемых полиэтиленполиамином (ПЭПА). Введение отвердителя в композиции обусловлено невозможностью получения объемных образцов на основе эпокси-фенольных смесей. Поскольку совмещение ПЭПА со смесью ЭС/ФС приводит к расслоению композиции, образцы для испытаний готовили на основе смеси ЭС/ФЛ. Концентрация ПЭПА в композициях на основе ЭС и ЭС/ФЛ составляла 10 % от массы ЭС. Отверждение образцов проводили при комнатной температуре.

Для получения модифицированных композиций в состав вводили дисперсный наполнитель – ценосферы (Ц). Ценосферы представляют собой алюмосиликатные полые микросферы, образующиеся при высокотемпературном факельном сжигании каменных углей (рис. 1). Микросферы представляют собой наполненные газом силикатные сферические частицы размером 20-500 мкм со стенками толщиной от 2 до 10 мкм и низкой плотностью (0,4-0,7 г/см³). Они являются перспективным сырьем для получения на их основе катализаторов, адсорбентов и капсулирующих материалов, способных функционировать в условиях воздействия агрессивных сред и высоких температур. Количество наполнителя в образцах рассчитывали от массы основы.

Полученные образцы до проведения испытаний выдерживали при стандартных условиях в течение 7 суток.

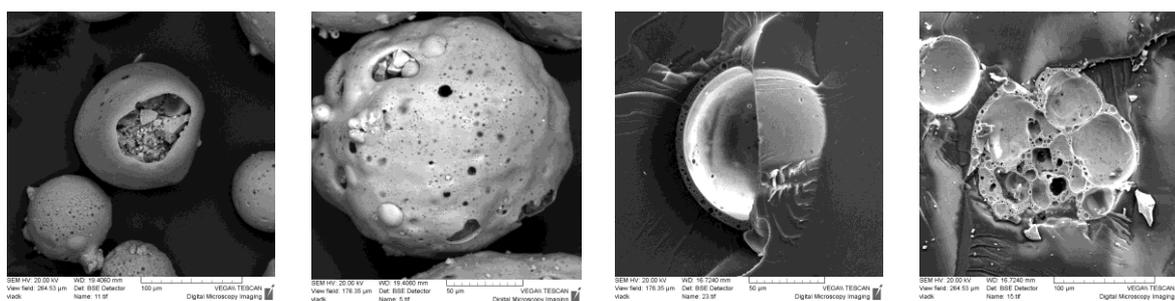


Рис. 1 - РЭМ-изображения ценосфер при различных увеличениях

Прочность адгезионного соединения покрытия с металлической подложкой (сталь Ст.3) оценивали по ГОСТ 15140 по методу решетчатых надразов.

Микротвердость образцов определяли с помощью микротвердомера ПМТ-3М по ГОСТ 9450. Метод является разновидностью метода Виккерса и отличается от него только использованием меньших нагрузок и соответственно меньшим размером отпечатка. Линейные характеристики наполнителей исследовали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ).

Скорость звука в образцах при частотах 150 кГц и 1 МГц определяли методом ультразвукового (УЗ) тестирования. Образцы для испытаний готовили в виде прямоугольных пластин с размерами 90x40x4 мм. Также было исследовано Влияние состава основы

композиции и распределения наполнителя на коэффициент затухания звуковой волны исследовали по изменению амплитуды (А) на частоте 0,3 МГц и 1 МГц. Испытания проводили по профилированию поверхности от 15 до 50 мм с шагом 5 мм. По полученным данным для материалов рассчитаны значения коэффициента затухания А (0,3МГц)/А 1(МГц).

Результаты и обсуждение

Анализ результатов, полученных при испытаниях на прочность адгезионного соединения покрытий с металлической подложкой, показал, что покрытия на основе ЭС имеют прочность адгезионного соединения 4 балла, на основе ЭС, функционализированной ФС (10%) или ФЛ (10%), – 1-2 балла.

В таблице 1 представлены результаты влияния концентрации дисперсного наполнителя на значения микротвердости композиций на основе ЭС и ЭС/ФЛ. Установлено, что введение наполнителя в ЭС в количестве 1 и 3% приводит к повышению микротвердости композиции до 30 % (табл. 1, пп. 1-4). Анализ полученных данных показывает, что функционализация ЭС фенольным компонентом позволяет увеличить микротвердость исходного связующего до 25 % (табл. 1, пп. 1, 5). Модифицирование комбинированной матрицы ЭС/ФЛ позволяет дополнительно увеличить микротвердость материала до 18 %. Установлено, что наиболее существенное повышение микротвердости достигается при введении наполнителя в количестве 1 %. Дальнейшее увеличение содержания ценосфер в составе материала не приводит к улучшению характеристик (табл. 1, пп. 5-14).

Таблица 1. Влияние ценосфер на микротвердость по Виккерсу образцов на основе ЭС, функционализированной ФЛ

№ п/п	Состав	Микротвердость по Виккерсу
1	ЭС	14,3
2	ЭС_Ц(1%)	18,5
3	ЭС_Ц(3%)	18,6
4	ЭС_Ц(5%)	16,7
5	ЭС/ФЛ	17,9
6	ЭС/ФЛ_Ц(1%)*	18
7	ЭС/ФЛ_Ц(1%)**	19,2
8	ЭС/ФЛ_Ц(1%)** *	21,1
9	ЭС/ФЛ_Ц(3%)*	14,9
10	ЭС/ФЛ_Ц(3%)**	15,8
11	ЭС/ФЛ_Ц(3%)** *	18,7
12	ЭС/ФЛ_Ц(5%)*	14,2
13	ЭС/ФЛ_Ц(5%)**	15,9
14	ЭС/ФЛ_Ц(5%)** *	17,8

* – основание образца; ** – середина образца; *** – поверхность образца

Кроме этого отмечено, что в композициях на основе ЭС/ФЛ, наполненных ценосферами, у основания микротвердость ниже, чем у поверхности образца. Вероятно, это связано с природой частиц наполнителя. Ценосферы полые, их плотность практически в 2 раза ниже плотности связующего, что и является причиной градиентного распределение частиц наполнителя по высоте образца (рис. 2).

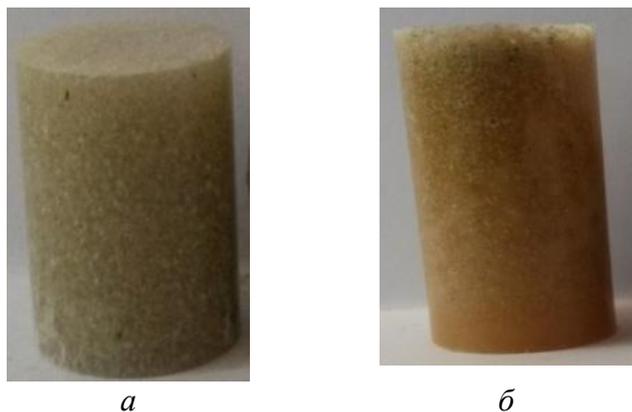


Рис. 2 - Фото образцов:
 а) ЭС+Ценосферы (5%),
 б) ЭС/ФЛ+Ценосферы (5%)

По результатам ультразвукового тестирования установлено, что скорость звука при частоте 1 МГц у всех образцов близка к табличным значениям скорости в эпоксидных смолах (≈ 2610 м/с). При частоте 150 кГц скорость ниже (≈ 2010 м/с). Разброс значений скорости по образцам незначителен ($\approx 0,8-1,0$ %). Снижение скорости при частоте 150 кГц объясняется влиянием толщины образца на низких частотах.

Одной из важных характеристик материала является затухание в нем ультразвука. Затухание ультразвука – это уменьшение амплитуды и, следовательно, интенсивности звуковой волны по мере ее распространения. Затухание ультразвука происходит из-за ряда причин, основными из которых являются [6]:

- *уменьшение амплитуды* волны с увеличением расстояния от источника, обусловленное формой и волновыми размерами источника;
- *рассеяние ультразвука* на неоднородностях среды, в результате чего уменьшается поток энергии в первоначальном направлении распространения;
- *поглощение ультразвука*, т.е. необратимый переход энергии звуковой волны в другие формы, в частности, в тепло.

В таблице 2 представлены результаты испытаний затухания звуковой волны в образцах в зависимости от состава связующего и присутствия наполнителя.

Анализ полученных данных показывает, что материалы на основе ЭС обладают более низкими значениями коэффициента затухания звука (табл. 2, п. 1), чем материалы на основе ЭС/ФЛ (табл. 2, п. 3). Вероятно, в данном случае затухание ультразвука связано с вязкостью материала.

Таблица 2. Значения коэффициента затухания звука

№ п/п	Описание образцов	Коэффициент затухания
1	ЭС	3,61
2	ЭС_Ц (1%)	3,64
3	ЭС/ФЛ	6,8
4	ЭС/ФЛ_Ц (1%) (основание)	7,67
5	ЭС/ФЛ_Ц (1%) (поверхность)	8,05

При ультразвуковом тестировании материалов на основе ЭС/ФЛ, наполненных ценосферами, отмечено изменение коэффициента затухания по высоте (табл. 2, пп. 4, 5), обусловленное распределением частиц наполнителя по объему образца. Градиентное распределение наполнителя в объеме материала подтверждается данными анализа его микроструктуры (рис.2). Согласно полученным результатам, ценосферы по высоте образца

распределены градиентно: более плотный слой ценосфер находится у поверхности. Плотность наполнителя от поверхности к основанию (т.е. к адгезионному соединению покрытие/металл при формировании покрытия) уменьшается. Увеличение коэффициента звукопоглощения происходит в результате рассеяния ультразвука из-за резкого изменения свойств среды на границе неоднородностей. Чем выше значение коэффициента затухания УЗ колебаний, тем выше демпфирующая способность материала [6], т.е. способность материала гасить возникающие в нем вибрации, а также внешние воздействия. Полученные данные свидетельствуют о возможности использования эпоксифенольных композиций, наполненных ценосферами, в качестве барьерного и вибропоглощающего материала для покрытий.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что материал покрытия на основе ЭС, функционализированной фенольными компонентами, имеет более высокую прочность адгезионного соединения покрытия к металлической подложке. Установлено, что модифицирование ценосферами исходной ЭС приводит к повышению микротвердость до 30 %. Функционализация фенольными компонентами ЭС позволяет увеличить микротвердость до 25 %, а модифицирование комбинированной матрицы ценосферами дополнительно увеличивает параметр от 7 % по объему до 18 % у поверхности.

Библиографический список:

1. **Еселев, А.Д.** Состояние и перспективы развития производства эпоксидных смол и отвердителей для клеев в России / А.Д. Еселев, В.А. Бобылев // Клеи, герметики, технологии. – 2006. – №7. – С. 2-8.
2. **Амирова, Л.М.** Композиционные материалы на основе эпоксидных олигомеров: Уч. пособие / Л.М. Амирова, М.М. Ганиев, Р.Р. Амиров.–Казань:«Новое знание», 2002.– 167с.
3. **Сахабиева, Э. В.** Модификаторы эпоксидных полимеров полифункционального действия: дис. ... канд. техн. наук: 02.00.16 / Э. В. Сахабиева. – Казань, 1999. – 176 с.
4. **Гордиенко, А.И.** Разработка и применение функционально-градиентных материалов [Электронный ресурс] / А.И. Гордиенко, В.В. Ивашко, И.И. Вегера – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-i-primenenie-funktsionalno-gradientnyh-materialov>. - Дата доступа: 31.08.2016.
5. **Рыбаков, В.В.** Функциональные градиентные материалы на основе ограниченно совместимых эпоксидных олигомеров: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.17.06 / В.В. Рыбаков; ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет». – Казань, 2012. – 20 с.
6. Ультразвук. Основы теории распространения ультразвуковых волн [Электронный ресурс] / Компания «Инженерные решения». – Режим доступа: <http://engineering-solutions.ru/ultrasound/theory/>. – Дата доступа: 1.09.2016.

Bibliography:

1. **Eliseev, A.D.** State and perspectives of production of epoxy resins and curing agents for glues in Russia / A.D. Eselev, V.A. Bobylev // Glues, mastics, technologies. – 2006. – No 7. – P. 2-8.
2. **Amirova, L.M.** Composite materials based on epoxy oligomers / L.M. Amirova, M.M. Ganiev, R.R. Amirov. – Kasan: Novoe znanie, 2002. – 167 p.
3. **Sakhbieva, E.V.** Modifiers of epoxy polymers of Polyfunctional action: PhD dissertation. – Kasan, 1999. – 176 p.
4. **Gordienko, A.I.** Development and use of functional-gradient materials [Electron resource] / A.I. Gordienko, V.V. Ivashko, I.I. Vegera. – Access regime: <http://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-i-primenenie-funktsionalno-gradientnyh-materialov>. – Access date: 31.08.2016.
5. **Rybakov, V.V.** Functional gradient materials based on restrictedly compatible epoxy oligomers: PhD Thesis. Kasan national research technological university, 2012. – 20 p.

6. Ultrasound. Fundamentals of the theory of ultrasound waves propagation [Electron resource] / Engineering decisions Co. – Access regime: <http://engineering-solutions.ru/ultrasound/theory/>. – Access date: 01.09.2016.

УДК: 539.3

О КОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ В ЭЛЕКТРОМАГНИТОУПРУГИХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ*

М.О. Леви, Г.Ю. Леви, Д.А. Татарков.
ФГБУН «Южный научный центр Российской академии наук»,
г. Ростов-на-Дону, Россия

Использование поверхностных акустических волн в современных устройствах ставит различные вопросы о границах применимости, а также свойствах и характерах поведения волнового процесса в гетероструктурах. Изучение электромагнитоупругих поверхностных волн имеет важное значение при создании различных устройств в акустоэлектронике. В данной работе изучается динамическая связанная задача о гармонических колебаниях электромагнитоупругой гетероструктуры под действием осциллирующей нагрузки при различных граничных условиях. Построена функция Грина для трехслойной электромагнитоупругой среды. Рассмотрено решение контактной задачи для изучаемой гетероструктуры. Получены графики распределения динамической емкости среды для системы из трех осциллирующих электродов.

1. Постановка задачи. Краевая задача о колебаниях n – слоя электромагнитоупругой среды описывается уравнениями движения и квазистатическими уравнениями Максвелла [1],[2],[3]:

$$\nabla \cdot \mathbf{T}^{(n)} = \rho^{(n)} \frac{\partial^2 \mathbf{u}^{(n)}}{\partial t^2}, \quad \nabla \cdot \mathbf{D}^{(n)} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{B}^{(n)} = 0 \quad (1)$$

Уравнения (1) дополняются материальными соотношениями для электромагнитоупругой среды:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{T}^{(n)} \\ \mathbf{D}^{(n)} \\ \mathbf{B}^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}^{(n)} & -\mathbf{e}^{(n)} & -\mathbf{f}^{(n)} \\ \mathbf{e}^{T(n)} & \boldsymbol{\varepsilon}^{(n)} & \mathbf{g}^{(n)} \\ \mathbf{f}^{T(n)} & \mathbf{g}^{(n)} & \boldsymbol{\mu}^{(n)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{S}^{(n)} \\ \mathbf{E}^{(n)} \\ \mathbf{H}^{(n)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

где $\mathbf{T}^{(n)}$ и $\mathbf{S}^{(n)}$ – компоненты тензоров напряжения и деформации второго порядка в упрощенном виде при использовании обозначений Фойгта, $\mathbf{D}^{(n)}$ и $\mathbf{B}^{(n)}$ – векторы электрической и магнитной индукции, $\mathbf{E}^{(n)}$ и $\mathbf{H}^{(n)}$ – векторы напряжения электрического и магнитного полей, $\mathbf{c}^{(n)}, \mathbf{e}^{(n)}, \mathbf{f}^{(n)}, \boldsymbol{\varepsilon}^{(n)}, \boldsymbol{\mu}^{(n)}, \mathbf{g}^{(n)}$ – упругие, пьезоэлектрические, пьезомагнитные, диэлектрические, магнитной проницаемости и магнитоэлектрические коэффициенты соответственно. Рассматриваемая электромагнитоупругая среда $|x_1| \leq \infty; x_3 \leq h_2$ представляет из себя два слоя $0 < x_3 \leq h_1, h_1 < x_3 \leq h_2$ ($n=1,2$) с толщиной $h^{(1)}$ и $h^{(2)}$ соответственно, лежащих на подстилающих их полупространстве $x_3 \leq 0$ ($n=3$). Предполагается, что материалы могут иметь класс осевой симметрии бтм, либо 2тм. Колебания в полупространстве инициируются

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-01676).

расширенной осциллирующей нагрузкой $\mathbf{q}(x_1, t) = \mathbf{q}_0(x_1)e^{-i\omega t}$, распределенной в области Ω_p , $\mathbf{q} = \{q_1, q_3, q_4, q_5\}$, здесь q_1 и q_3 – продольные и вертикальные компоненты вектора механической нагрузки соответственно, q_4 – электрическая нагрузка, q_5 – магнитная нагрузка. Вне области Ω_p поверхность свободна от механических напряжений.

С учетом условий распространения плоских волн: $\frac{\partial}{\partial x_2} = 0$, $u_2 = 0$, $u_n = u_n(x_1, x_3)$, $n = 3, 4, 5$ решение уравнений движения для слоев будем искать в виде ($p = 1, 2; m = 3, 4, 5$):

$$U_1^{(p)}(\alpha, x_3) = -i\alpha \sum_{k=1}^4 y_{1k}^{(p)} [c_k^{(p)} \operatorname{sh} \sigma_k^{(p)} x_3 + c_{k+4}^{(p)} c \operatorname{ch} \sigma_k^{(p)} x_3]; \quad (3)$$

$$U_m^{(p)}(\alpha, x_3) = \sum_{k=1}^4 y_{mk}^{(p)} [c_k^{(p)} \operatorname{ch} \sigma_k^{(p)} x_3 + c_{k+4}^{(p)} \operatorname{sh} \sigma_k^{(p)} x_3]$$

Для полупространства ($x_3 \leq 0$):

$$U_1^{(3)}(\alpha, x_3) = -i\alpha \sum_{k=1}^4 c_k^{(3)} y_{1k}^{(3)} \exp(\sigma_k^{(3)} x_3); \quad U_m^{(3)}(\alpha, x_3) = \sum_{k=1}^4 c_k^{(3)} y_{mk}^{(3)} \exp(\sigma_k^{(3)} x_3); \quad (4)$$

Здесь $\sigma_k^{(n)}$ удовлетворяют уравнению, полученному из определителя характеристической матрицы:

$$\det \begin{pmatrix} \mathbf{P}_1 & \mathbf{P}_2 \\ \mathbf{P}_3 & \mathbf{P}_4 \end{pmatrix} = 0, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_1 &= \begin{vmatrix} -\alpha_1^2 c_{11}^{(n)} + c_{55}^{(n)} \sigma_k^{(n)2} + \rho^{(n)} \omega^2 & (c_{13}^{(n)} + c_{55}^{(n)}) (\sigma_k^{(n)}) \\ (c_{13}^{(n)} + c_{55}^{(n)}) (-\alpha_1^2 \sigma_k^{(n)}) & -\alpha_1^2 c_{55}^{(n)} + c_{33}^{(n)} \sigma_k^{(n)2} + \rho^{(n)} \omega^2 \end{vmatrix}, \\ \mathbf{P}_2 &= \begin{vmatrix} (e_{31}^{(n)} + e_{15}^{(n)}) (\sigma_k^{(n)}) & (f_{31}^{(n)} + f_{15}^{(n)}) (\sigma_k^{(n)}) \\ -\alpha_1^2 e_{15}^{(n)} + e_{33}^{(n)} \sigma_k^{(n)2} & -\alpha_1^2 f_{15}^{(n)} + f_{33}^{(n)} \sigma_k^{(n)2} \end{vmatrix}, \\ \mathbf{P}_3 &= \begin{vmatrix} (e_{31}^{(n)} + e_{15}^{(n)}) (-\alpha_1^2 \sigma_k^{(n)}) & -\alpha_1^2 e_{15}^{(n)} + e_{33}^{(n)} \sigma_k^{(n)2} \\ (f_{31}^{(n)} + f_{15}^{(n)}) (-\alpha_1^2 \sigma_k^{(n)}) & -\alpha_1^2 f_{15}^{(n)} + f_{33}^{(n)} \sigma_k^{(n)2} \end{vmatrix}, \\ \mathbf{P}_4 &= \begin{vmatrix} \alpha_1^2 \varepsilon_{11}^{(n)} - \varepsilon_{33}^{(n)} \sigma_k^{(n)2} & \alpha_1^2 g_{11}^{(n)} - g_{33}^{(n)} \sigma_k^{(n)2} \\ \alpha_1^2 g_{11}^{(n)} - g_{33}^{(n)} \sigma_k^{(n)2} & \alpha_1^2 \mu_{11}^{(n)} - \mu_{33}^{(n)} \sigma_k^{(n)2} \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

Неизвестные $y_{pk}^{(n)}$ являются решением системы уравнений связи[4]:

$$\begin{cases} (-\alpha_1^2 c_{11}^{(n)} + c_{55}^{(n)} \sigma_k^{(n)2} + \rho^{(n)} \omega^2) y_{1k}^{(n)} + (c_{13}^{(n)} + c_{55}^{(n)}) \sigma_k^{(n)} y_{3k}^{(n)} + \\ + (e_{31}^{(n)} + e_{15}^{(n)}) \sigma_k^{(n)} y_{4k}^{(n)} + (f_{31}^{(n)} + f_{15}^{(n)}) \sigma_k^{(n)} y_{5k}^{(n)} = 0, \\ (c_{13}^{(n)} + c_{55}^{(n)}) (-\alpha_1^2 \sigma_k^{(n)}) y_{1k}^{(n)} + (-\alpha_1^2 c_{55}^{(n)} + c_{33}^{(n)} \sigma_k^{(n)2} + \rho^{(n)} \omega^2) y_{3k}^{(n)} + \\ + (e_{33}^{(n)} \sigma_k^{(n)2} - \alpha_1^2 e_{15}^{(n)}) y_{4k}^{(n)} + (f_{33}^{(n)} \sigma_k^{(n)2} - \alpha_1^2 f_{15}^{(n)}) y_{5k}^{(n)} = 0, \\ (e_{31}^{(n)} + e_{15}^{(n)}) (-\alpha_1^2 \sigma_k^{(n)}) y_{1k}^{(n)} + (e_{33}^{(n)} \sigma_k^{(n)2} - \alpha_1^2 e_{15}^{(n)}) y_{3k}^{(n)} + \\ + (\alpha_1^2 \varepsilon_{11}^{(n)} - \varepsilon_{33}^{(n)} \sigma_k^{(n)2}) y_{4k}^{(n)} + (\alpha_1^2 g_{11}^{(n)} - g_{33}^{(n)} \sigma_k^{(n)2}) y_{5k}^{(n)} = 0, \\ (f_{31}^{(n)} + f_{15}^{(n)}) (-\alpha_1^2 \sigma_k^{(n)}) y_{1k}^{(n)} + (f_{33}^{(n)} \sigma_k^{(n)2} - \alpha_1^2 f_{15}^{(n)}) y_{3k}^{(n)} + \\ + (\alpha_1^2 g_{11}^{(n)} - g_{33}^{(n)} \sigma_k^{(n)2}) y_{4k}^{(n)} + (\alpha_1^2 \mu_{11}^{(n)} - \mu_{33}^{(n)} \sigma_k^{(n)2}) y_{5k}^{(n)} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Неизвестные коэффициенты $c_k^{(n)}$ находятся из решения матричного уравнения[5]:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{C} = \mathbf{Q} \tag{7}$$

где $\mathbf{C} = \{c_1^{(1)}, c_2^{(1)}, c_3^{(1)}, c_4^{(1)}, \dots, c_4^{(3)}\}$ – искомые коэффициенты, $\mathbf{Q} = \{Q_1, Q_3, Q_4, Q_5, \dots, 0, 0, 0\}$ – компоненты вектора общей нагрузки, \mathbf{A} – дисперсионная матрица.

Решение краевой задачи можно представить в виде [6]:

$$\mathbf{u}(x_1, x_3) = \frac{1}{2\pi} \int_{-a}^a \mathbf{k}(x_1 - \xi, x_3, \omega) \mathbf{q}(\xi) d\xi, \tag{8}$$

$$\mathbf{k}(s, x_3, \omega) = \int_{\Gamma} \mathbf{K}(\alpha_1, x_3, \omega) e^{-i\alpha_1 s} d\alpha_1. \tag{9}$$

Здесь $\mathbf{K}(\alpha_1, x_3, \omega) = \|K_{mn}\|_{m,n=1,3,4,5}$ – матрица-функция размера 20×20 .

2. Граничные условия. Для построения дисперсионной матрицы \mathbf{A} были выбраны следующие граничные условия:

$$x_3 = h_1 + h_2 = h: \tag{10}$$

$$T_{31}^{(1)} = c_{3,5}^{(1)}(U_{3,1}^{(1)} + U_{1,3}^{(1)}) + e_{15}^{(1)}U_{4,1}^{(1)} + f_{15}^{(1)}U_{5,1}^{(1)} = 0; T_{33}^{(1)} = c_{13}^{(1)}U_{1,1}^{(1)} + c_{33}^{(1)}U_{3,3}^{(1)} + e_{33}^{(1)}U_{4,3}^{(1)} + f_{33}^{(1)}U_{5,3}^{(1)} = 0$$

$$D_3^{(1)} = e_{31}^{(1)}U_{1,1}^{(1)} + e_{33}^{(1)}U_{3,3}^{(1)} - \varepsilon_{33}^{(1)}U_{4,1}^{(1)} - g_{33}^{(1)}U_{5,3}^{(1)} = 0;$$

$$B_3^{(1)} = f_{31}^{(1)}U_{1,1}^{(1)} + f_{33}^{(1)}U_{3,3}^{(1)} - g_{33}^{(1)}U_{4,1}^{(1)} - \mu_{33}^{(1)}U_{5,3}^{(1)} = 0;$$

$$x_3 = h_1: \tag{11}$$

$$T_{31}^{(2)} = T_{31}^{(1)}; T_{31}^{(2)} = T_{31}^{(1)}; U_3^{(2)} = U_3^{(1)}; U_1^{(2)} = U_1^{(1)}; D_3^{(2)} = D_3^{(1)}; U_4^{(2)} = U_4^{(1)};$$

$$\text{Магнито-открытый случай: } B_3^{(2)} = B_3^{(1)}; U_5^{(2)} = U_5^{(1)};$$

$$\text{Магнито-закрытый случай: } U_5^{(2)} = 0; U_5^{(1)} = 0;$$

$$x_3 = 0: \tag{12}$$

$$T_{31}^{(3)} = T_{31}^{(2)}; T_{31}^{(3)} = T_{31}^{(2)}; U_3^{(3)} = U_3^{(2)}; U_1^{(3)} = U_1^{(2)};$$

$$D_3^{(3)} = D_3^{(2)}; U_4^{(3)} = U_4^{(2)};$$

$$\text{Магнито-открытый случай: } B_3^{(3)} = B_3^{(2)}; U_5^{(3)} = U_5^{(2)};$$

$$\text{Магнито-закрытый случай: } U_5^{(3)} = 0; U_5^{(2)} = 0;$$

3. Решение интегрального уравнения. Рассмотрим задачу о колебаниях гетероструктуры под действием электрической нагрузки, индуцируемой с помощью невесомых электродов на поверхности.

В случае, когда в области $x_1 \in \Omega_p$ на поверхности слоя задано распределение потенциала $\varphi(x_1) = \varphi_0$, в выражении (8) необходимо положить $x_3 = h_2$. В этом случае формулы (8) и (9) представляются в виде

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 k_{44}(x_1 - \xi, h_2, \omega) q_4(\xi) d\xi = \varphi_0, \tag{13}$$

$$k_{44}(s, h_2, \omega) = \int_{\Gamma} K_{44}(\alpha_1, h_2, \omega) e^{-i\alpha_1 s} d\alpha_1. \quad K_{44}(\alpha_1, x_3, \omega) = c|\alpha|^{-1}(1 + O(\alpha^{-1})), \quad \alpha \rightarrow \infty \tag{14}$$

Это позволяет применить к интегральному уравнению (8) метод фиктивного поглощения и представить решение в виде

$$Q(\alpha_1) = \frac{T(\alpha_1)}{\Pi(\alpha_1)} + \sum_{k=1}^{2M} C_k e^{i\alpha_1 z^k}; \quad \Pi(\alpha_1) = \prod_{k=1}^M \frac{\alpha_1^2 - \gamma_k^2}{\alpha_1^2 - \zeta_k^2}, \quad (15)$$

где ζ_k и γ_k ($k=1,2,\dots,M$) – комплексные полюсы и нули символа $K_{44}(\alpha_1, h_2, \omega)$, лежащие в полосе $|\text{Im } \alpha_1| \leq \varepsilon_0$, z^k – координаты точек, делящих отрезок принадлежащий области контакта электрода $x_1 \in \Omega_p$ на $2M$ равных частей, $T(\alpha_1)$ – трансформанта Фурье функции

$$t(z) = t_0(z) + \sum_{k=1}^{2M} C_k t_k(z); \quad t_k(z) = \sum_{p=1}^N \beta_k^p \psi_p(z), \quad k = 0,1,\dots,2M \quad (16)$$

$\psi_p(z)$ – система координатных функций, заданных на отрезке $x_1 \in \Omega_p$, коэффициенты β_k^p удовлетворяют системе $2M + 1$ алгебраических уравнений

$$\mathbf{A}\mathbf{B}_k = \mathbf{F}_k, \quad k = 0,1,\dots,2M \quad (17)$$

$$\mathbf{A} = \|A_{pl}\|_{p,l=1}^N, \quad A_{pl} = \int_{\Gamma} K_0(\alpha_1) \Psi_p(\alpha_1) \Phi_l^*(\alpha_1) d\alpha_1, \quad K_0(\alpha_1) = \frac{K_{44}(\alpha_1)}{\Pi(\alpha_1)}$$

$$\mathbf{F}_k = \{f_k^l\}_{l=1}^N, \quad f_0^l = \int_{-1}^1 f_0(z) \varphi_l(z) dz, \quad f_k^l = \int_{\Gamma} K(\alpha_1) \Phi_l(\alpha_1) e^{-i\alpha_1 z^k} d\alpha_1, \quad \mathbf{B}_k = \{\beta_k^p\}_{p=1}^N$$

$\Psi_p(\alpha_1)$ и $\Phi_l(\alpha_1)$ – преобразования Фурье систем координатных функций $\psi_p(z)$ и $\varphi_l(z)$, звездочкой отмечена комплексно сопряженная величина. Коэффициенты C_k в формуле (15) удовлетворяют алгебраической системе

$$\sum_{p=1}^N \beta_0^p \Psi_p(\pm \gamma_n) - \sum_{k=1}^{2M} C_k \sum_{p=1}^N \beta_k^p \Psi_p(\pm \gamma_n) = 0, \quad n = 0,1,\dots,2M. \quad (18)$$

Формулы (15) – (18) позволяют получить распределение электрического заряда в зоне контакта при заданном в этой области электрическом потенциале.

4. Численные результаты. В качестве исследуемой среды взята гетероструктура BaTiO₃ / CoFe₂O₄ / BaTiO₃. Все расчеты выполнены в безразмерном виде [6]. Три электрода располагаются на поверхности структуры с шагом 2 и шириной 2. Рассмотрены два случая граничных условий при контактном взаимодействии: магнито–открытый и магнито–закрытый. Получены и графически представлены динамические емкости для исследуемой модели и условий.

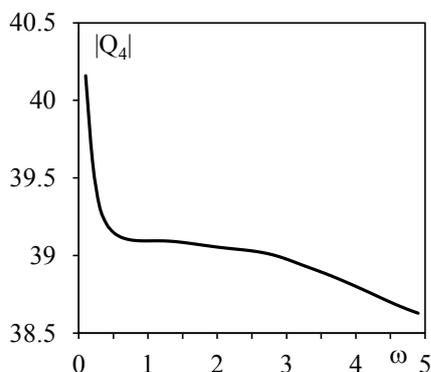


Рис. 1 – Модуль динамической емкости гетероструктуры

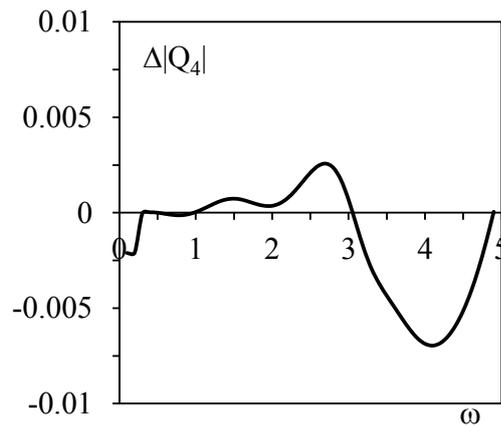


Рис.2 – Разность модулей динамической емкости при различных магнитных граничных условиях.

Из рисунка 1 видно, что динамическая емкость резко падает в начальной частотной области $\omega < 0.5$, слабо изменяется в частотном диапазоне $0.5 < \omega < 2.7$ и затем резко начинает убывать при достижении безразмерной частоты $\omega = 5$. Рисунок 2 показывает разность динамических емкостей гетероструктуры, полученных при различных магнитных условиях на границах феррита кобальта. Из рисунка 2 видно, что максимальная разница достигается в области частот $\omega = 4.1$, при этом видно, что магнитное экранирование не всегда ведет к уменьшению динамической емкости гетероструктуры.

Библиографический список:

1. **Новацкий В.** Электромагнитные эффекты в твердых телах / пер. с польского В.А. Шачнева // Москва. Мир. – 1986. – 160 с.
2. **Багдасярян Г.Е., Даноян З.Н.** Электромагнитоупругие волны // Ереван: Изд. ЕГУ. – 2006. – 490 с.
3. **Peng-Fei Hou, Hao-Jiang Ding, Jiang-Ying Chen.** Green's functions for transversely isotropic magnetoelastic media // International Journal of Engineering Science. – 2005. – №43. – P. 826–858.
4. **Калинчук В.В., Белянкова Т.И., Леви М.О., Агаян К.Л.** Некоторые особенности динамики слабонеоднородного магнитоупругого полупространства. // Вестник Южного научного центра РАН. – 2013. – Т. 9. – № 4. – С. 13-17.
5. **Калинчук В.В., Белянкова Т.И.** Динамика поверхностных неоднородных сред. // М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2009. – 78 с.
6. **Леви М.О., Агаян К.Л., Ворович Е.И.** Антиплоская динамическая контактная задача для электромагнитоупругого слоя // Вестник Южного научного центра РАН. – 2014. – Т. 10. – № 3. – С. 10-17.

Bibliography:

1. **Nowacki V.** Elektromagnitnye efekty v tverdyh telah / perevod s polskogo V.A. Shachneff [Electromagnetic Effects in Solid Bodies] // Moscow, Nauchnyj mir Publishing. – 1986. p.160.
2. **Bagdasarayan G.E., Danoyan Z.N.** Elektromagnitnouprugie volny [Electromagnetoelastic waves] // Yerevan, ESU Publishing: – 2006. p. 490.
3. **Peng-Fei Hou, Hao-Jiang Ding, Jiang-Ying Chen.** Green's functions for transversely isotropic magnetoelastic media // International Journal of Engineering Science. – 2005. – №43. – P. 826–858.
4. **V.V. Kalinchuk, T.I. Belyankova, M.O. Levi, K.L. Agayan.** Some features of magnetoelastic dynamics weakly inhomogeneous half-space // Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra. – 2013. – V. 9, – №4. – p. 13-17.

5. V.V. Kalinchuk, T.I. Belyankova. 2009. Dinamika poverkhnosti neodnorodnykh sred. [Surface dynamics of inhomogeneous media] M., Fizmatlit: 312 c. (In Russian).

6. Levi M.O., Agyan K.L., Vorovich E.I. Antiplane dynamical contact problem for an electroelastic layer // Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra. – 2014. – V. 10. – № 3. – p. 10-17.

УДК 539.3

МНОЖЕСТВЕННЫЙ КОНТАКТ ТЕЛ С ПОКРЫТИЯМИ С УЧЕТОМ ИЗНОСА*

А.В. Манжиров^{1,2,3,4}, К.Е. Казаков^{1,2}

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия

²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

⁴Московский технологический университет, г. Москва, Россия

В статье рассматриваются плоские износосеконтактные задачи для систем жестких штампов и упругих оснований с тонкими неоднородными покрытиями. Предполагается, что система штампов регулярна, то есть расстояния между соседними штампами одинаковые, а длины штампов равны друг другу. Задача решена в аналитическом виде в рядах. Получены выражения для контактных давлений под штампами, осадок и углов поворотов штампов. В выражениях для контактных давлений быстро изменяющаяся функция неоднородности покрытия выделена в явном виде.

1. Постановка задачи. На недеформируемом основании лежит слой толщиной H с тонким покрытием толщиной h . И между слоями, и между нижним слоем и подстилающим основанием может осуществляться как гладкий, так и идеальный контакт. Верхний тонкий слой изготовлен из упругого материала, характеризующегося переменной жесткостью $R(x)$, зависящей от условий соединения слоев и обладающей периодичностью с периодом Δa , а нижний — модулем упругости E_2 и коэффициентом Пуассона ν_2 . Считается также, что жесткость верхнего слоя не превышает жесткости нижнего. В некоторый момент времени τ_0 в вышеописанное двухслойное основание начинает вдавливаться регулярная система n плоских штампов ширины \bar{a} , шаг которых Δa . При этом на каждый i -й штамп действует сила $P_i(t)$ и момент $M_i(t)$. Помимо этого штампы колеблются в направлении, перпендикулярном плоскости Oxz . Осредненное значение модуля скорости скольжения штампов по поверхности основания равно V .

Можно показать, что вертикальное перемещение верхней грани слоя под действием постоянной распределенной нагрузки описывается зависимостью

$$u_{i1}(x, t) = \frac{hq_i(x, t)}{R(x)} + \frac{2(1-\nu_2^2)}{\pi E_2} \sum_{j=1}^n \int_{a_j}^{b_j} k_{pl} \left(\frac{x-\xi}{H} \right) q_j(\xi, t) d\xi, \quad i=1, 2, \dots, n, \quad x \in [a_i, b_i], \quad (1)$$

где $q_i(x, t)$ — неизвестные контактные давления под i -м штампом, a_i , b_i — левая и правая границы i -го штампа, $k_{pl}[(x-\xi)/H]$ — известное ядро плоской контактной задачи [1, 2], зависящее от условий контакта между нижним слоем и подстилающим основанием.

Эксперименты показывают [3–5], что в ряде случаев скорость изнашивания слоя прямо пропорциональна действующим на штамп нормальным нагрузкам $q_i(x, t)$ и осредненному

* Работа выполнена при поддержке комплексной программы ОЭММПУ РАН III.4

значению модуля скорости скольжения V (см., например, [6, 7]) и обратно пропорциональна твердости покрытия $T(x)$ [5]:

$$v_{i2}(x, t) = \frac{k_u V q_i(x, t)}{T(x)},$$

где k_u — некоторый безразмерный коэффициент. Тогда вертикальное перемещение верхней грани покрытия вследствие линейного износа задается формулой

$$u_{i2}(x, t) = \frac{k_u V}{T(x)} \int_{\tau_0}^t q_i(x, s) ds, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad x \in [a_i, b_i]. \quad (2)$$

Следует отметить, что при определении деформаций основания мы пренебрегаем силами трения в области контакта, а также инерционными силами, возникающими вследствие движения штампа. Мы также считаем, что необратимые перемещения за счет износа $u_{i2}(x, t)$ малы по сравнению с толщиной покрытия h и соизмеримы с нормальными упругими перемещениями контактирующих тел $u_1(x, t)$. Учитывая это при определении напряженно-деформированного состояния тела граничные условия относятся к неизношенной поверхности.

Если рассматривать кусочно однородные покрытия, отношения жесткостей и твердостей которых совпадают, а также покрытия, технологический процесс нанесения которых делает их жесткости и твердости пропорциональными, то $R(x) = k_T T(x)$.

Приравнивая вертикальные перемещения верхней грани покрытия перемещениям штампов как жесткого целого, с учетом (1)–(3) получим систему интегральных уравнений исследуемой износоконтактной задачи в форме

$$\frac{h q_i(x, t)}{R(x)} + \frac{k_T k_u V}{R(x)} \int_{\tau_0}^t q_i(x, s) ds + \frac{2(1 - \nu_2^2)}{\pi E_2} \sum_{j=1}^n \int_{a_j}^{b_j} k_{pl} \left(\frac{x - \xi}{H} \right) q_j(\xi, t) d\xi = \delta_i(t) + \alpha_i(t)(x - \eta_i), \quad (4)$$

$$i = 1, 2, \dots, n, \quad x \in [-a, a],$$

где $\delta_i(t)$ — осадка i -го штампа, а $\alpha_i(t)$ — угол его поворота, η_i — его срединная координата.

Уравнения (4) дополним условиями равновесия штампов на слое

$$\int_{a_i}^{b_i} q_i(\xi, t) d\xi = P_i(t), \quad \int_{a_i}^{b_i} q_i(\xi, t)(\xi - \eta_i) d\xi = M_i(t). \quad (5)$$

Сделаем в (4), (5) замену переменных по формулам

$$x^* = \frac{2(x - \eta_i)}{\bar{a}}, \quad \xi^* = \frac{2(\xi - \eta_j)}{\bar{a}}, \quad t^* = \frac{t}{\tau_0}, \quad \lambda = \frac{2H}{\bar{a}}, \quad \delta^{i*}(t^*) = \frac{2\delta_i(t)}{\bar{a}}, \quad \alpha^{i*}(t^*) = \alpha_i(t),$$

$$m^*(x) = \frac{E_2}{(1 - \nu_2^2)R(x)} \frac{h}{\bar{a}}, \quad V^* = k_u k_T \frac{V \tau_0}{h}, \quad q^{i*}(x^*, t^*) = \frac{2(1 - \nu_2^2)q_i(x, t)}{E_2}, \quad \eta_i^* = \frac{2\eta_i}{\bar{a}}, \quad (6)$$

$$P^{i*}(t^*) = \frac{4P_i(t)(1 - \nu_2^2)}{E_2 \bar{a}}, \quad M^{i*}(t^*) = \frac{8M_i(t)(1 - \nu_2^2)}{E_2 \bar{a}^2}, \quad k^{ij*}(x^*, \xi^*) = \frac{1}{\pi} k_{pl} \left(\frac{x + \eta_i^* - \xi - \eta_j^*}{H} \right).$$

Убрав в полученных соотношениях звездочки, получим смешанное интегральное уравнение и дополнительные условия

$$m(x) \left[q^i(x, t) + V \int_1^t q^i(x, s) ds \right] + \sum_{j=1}^n \int_{-1}^1 k^{ij}(x, \xi) q^j(\xi, t) d\xi = \delta^i(t) + \alpha^i(t)x, \quad x \in [-1, 1], \quad (7)$$

$$\int_{-1}^1 q^i(\xi, t) d\xi = P^i(t), \quad \int_{-1}^1 q^i(\xi, t) \xi d\xi = M^i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

Таким образом, получена система разрешающих двумерных интегральных уравнений (7), а также дополнительные условия (8). Для построения решения уравнений (7), (8) введем вектор-функции и сделаем замену переменных

$$\begin{aligned} \mathbf{q}(x,t) &= q^i(x,t)\mathbf{i}^i, \quad \boldsymbol{\delta}(t) = \delta^i(t)\mathbf{i}^i, \quad \boldsymbol{\alpha}(t) = \alpha^i(t)\mathbf{i}^i, \quad \mathbf{P}(t) = P^i(t)\mathbf{i}^i, \\ \mathbf{M}(t) &= M^i(t)\mathbf{i}^i, \quad \mathbf{k}(x,\xi) = k^{ij}(x,\xi)\mathbf{i}^i\mathbf{j}^j, \quad \mathbf{Gf}(x) = \int_{-1}^1 \mathbf{k}(x,\xi) \cdot \mathbf{f}(\xi) d\xi, \\ \mathbf{Q}(x,t) &= \sqrt{m(x)}\mathbf{q}(x,t), \quad \mathbf{K}(x,t) = \frac{\mathbf{k}(x,\xi)}{\sqrt{m(x)m(\xi)}}, \quad \mathbf{Ff}(x) = \int_{-1}^1 \mathbf{K}(x,\xi) \cdot \mathbf{f}(\xi) d\xi. \end{aligned} \tag{9}$$

Тогда уравнения (7), (8) примут вид одного операторного уравнения и двух векторных дополнительных условий

$$\mathbf{Q}(x,t) + V \int_1^t \mathbf{Q}(x,s) ds + \mathbf{FQ}(x,t) = \boldsymbol{\delta}(t) + \boldsymbol{\alpha}(t)x \equiv \boldsymbol{\Delta}(x,t), \quad x \in [-1,1], \tag{10}$$

$$\int_{-1}^1 \frac{\mathbf{Q}(\xi,t)}{\sqrt{m(\xi)}} d\xi = \mathbf{P}(t), \quad \int_{-1}^1 \frac{\mathbf{Q}(\xi,t)}{\sqrt{m(\xi)}} \xi d\xi = \mathbf{M}(t). \tag{11}$$

2. Решение плоской задачи. Решение задачи (10), (11) будем искать в классе функций непрерывных по времени в $L_2([-1,1], V)$ (см., например [8–12]). Для этого построим сначала ортонормированный базис в $L_2([-1,1], V)$ с явной зависимостью от $1/\sqrt{m(x)}$. Система вектор-функций $\{\mathbf{p}_k^i(x)\}_{k=0,1,2,\dots; i=1,2,\dots,n}$, удовлетворяющая оговоренным выше условиям, может быть построена, например, на основании [13]:

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_k^i(x) &= \frac{\mathbf{p}_k^{*i}(x)}{\sqrt{m(x)}}, \quad \mathbf{p}_k^{*i}(x) = p_k^{*i}(x)\mathbf{i}^i, \quad d_{-1} = 1, \quad J_k = \int_{-1}^1 \frac{\xi^k d\xi}{m(\xi)}, \\ d_k &= \begin{vmatrix} J_0 & \dots & J_k \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ J_k & \dots & J_{2k} \end{vmatrix}, \quad p_k^{*i}(x) = \frac{1}{\sqrt{d_{k-1}d_k}} \begin{vmatrix} J_0 & J_1 & \dots & J_k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ J_{k-1} & J_k & \dots & J_{2k-1} \\ 1 & x & \dots & x^k \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

Гильбертово пространство $L_2([-1,1], V)$ можно представить в виде прямой суммы ортогональных подпространств $L_2^{(1)}([-1,1], V) \oplus L_2^{(2)}([-1,1], V)$, где $L_2^{(1)}([-1,1], V)$ — евклидово пространство с базисом $\{\mathbf{p}_0^i(x), \mathbf{p}_1^i(x)\}$, а $L_2^{(2)}([-1,1], V)$ — гильбертово пространство с базисом $\{\mathbf{p}_k^i(x)\}_{k=2,3,\dots}$. Можно также заметить, что подынтегральную функцию и правую часть можно представить в виде суммы функций, непрерывных по t в $L_2^{(1)}([-1,1], V)$ и $L_2^{(2)}([-1,1], V)$, соответственно $\mathbf{Q}(x,t) = \mathbf{Q}_0(x,t) + \mathbf{Q}_1(x,t)$, $\boldsymbol{\Delta}(x,t) = \boldsymbol{\Delta}_0(x,t) + \boldsymbol{\Delta}_1(x,t)$. Причем из дополнительных условий (11) сразу можно определить

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_0(x,t) &= z_0^i(t)\mathbf{p}_0^i(x) + z_1^i(t)\mathbf{p}_1^i(x) \in L_2^{(0)}([-1,1], V), \\ z_0^i(t) &= \frac{P^i(t)}{\sqrt{J_0}}, \quad z_1^i(t) = \frac{J_0 M^i(t) - J_1 P^i(t)}{\sqrt{J_0(J_0 J_2 - J_1^2)}}, \end{aligned}$$

а $\boldsymbol{\Delta}_1(x,t) \equiv 0$. Введя ортопроекторы $\mathbf{P}_0 : L_2 \rightarrow L_2^{(0)}$, $\mathbf{P}_1 = \mathbf{I} - \mathbf{P}_0 : L_2 \rightarrow L_2^{(1)}$ и подействовав \mathbf{P}_1 на (10), получим уравнение с известной правой частью

$$\mathbf{Q}_1(x,t) + V \int_1^t \mathbf{Q}_1(x,s) ds + \mathbf{P}_1 \mathbf{FQ}_1(x,t) = -\mathbf{P}_1 \mathbf{FQ}_0(x,t) = \tilde{\boldsymbol{\Delta}}_1(x,t),$$

решение которого строится в виде ряда по собственным функциям оператора $\mathbf{P}_1 \mathbf{F}$:

$$\mathbf{P}_1 \mathbf{F}\boldsymbol{\varphi}_k(x) = \gamma_k \boldsymbol{\varphi}_k(x), \quad \boldsymbol{\varphi}_k(x) = \sum_{l=2}^{\infty} \Psi_{kl}^i \mathbf{p}_l^i(x).$$

Тогда функция $Q_1(x, t) = \sum_{k=2}^{\infty} z_k(t)\varphi_k(x)$ и мы можем получить уравнение для определения функций $z_k(t)$

$$z_k(t) + V \int_1^t z_k(s) ds + \gamma_k z_k(t) = -[K_{0k}^i z_0^i(t) + K_{1k}^i z_1^i(t)],$$

$$K_{0k}^i = \sum_{m=2}^{\infty} K_{m0}^{ji} \Psi_{km}^j, \quad K_{1k}^i = \sum_{m=2}^{\infty} K_{m1}^{ji} \Psi_{km}^j.$$

Тогда

$$z_k(t) = -\frac{K_{0k}^i z_0^i(t) + K_{1k}^i z_1^i(t)}{1 + \gamma_k} + \frac{V}{(1 + \gamma_k)^2} \int_1^t [K_{0k}^i z_0^i(s) + K_{1k}^i z_1^i(s)] \exp\left[-\frac{V(t-s)}{1 + \gamma_k}\right] ds.$$

В результате выражения для контактных давлений под штампами принимают вид

$$q^i(x, t) = \frac{1}{m(x)} [z_0^i(t) p_0^{i*}(x) + z_1^i(t) p_1^{i*}(x) + \dots],$$

то есть в решении в явном виде выделена функция $m(x)$, связанная с жесткостью под штампами, что позволяет производить вычисления даже в случае, когда жесткость описывается быстроизменяющимися и даже разрывными функциями.

Поддействовав оператором P_1 на уравнение (10) можно получить уравнения для определения углов поворота $\alpha^i(t)$ и осадок $\delta^i(t)$, окончательные формулы для которых принимают вид:

$$\alpha^i(t) = \sqrt{\frac{J_0}{J_0 J_2 - J_1^2}} \left[z_1^i(t) + V \int_1^t z_1^i(s) ds + K_{10}^{ij} z_0^j(t) + K_{11}^{ij} z_1^j(t) + \sum_{k=2}^{\infty} K_{1k}^i z_k(t) \right],$$

$$\delta^i(t) = \frac{1}{\sqrt{J_0}} \left\{ -\alpha^i(t) \frac{J_1}{\sqrt{J_0}} + z_0^i(t) + V \int_1^t z_0^i(s) ds + K_{00}^{ij} z_0^j(t) + K_{01}^{ij} z_1^j(t) + \sum_{k=2}^{\infty} K_{0k}^i z_k(t) \right\}.$$

Работа выполнена при поддержке комплексной программы ОЭММПУ РАН III.4 Раздел: «Механика поверхностных и интерфейсных явлений в проектировании материалов с повышенным сопротивлением разрушению и изнашиванию».

Библиографический список:

1. **Ворович И. И., Александров В. М., Бабешко В. А.** Неклассические смешанные задачи теории упругости. М.: Наука, 1974. 456 с.
2. **Арутюнян Н. Х., Манжиров А. В.** Контактные задачи теории ползучести. Ереван: Изд-во НАН РА, 1999. 318 с.
3. **Проников А. С.** Износ и долговечность станков. М.: Машгиз, 1957. 172 с.
4. **Хрущев М. М., Бабичев М. А.** Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. 252 с.
5. **Коллинз Дж.** Повреждение материалов в конструкциях: Анализ, предсказание, предотвращение. — М.: Мир, 1984. 624 с.
6. **Горячева И. Г., Добычин М. Н.** Контактные задачи в трибологии. М.: Машиностроение, 1988. 254 с.
7. **Александров В. М., Коваленко Е. В.** Осесимметричная контактная задача для линейно-деформируемого основания общего типа при наличии износа // Изв. АН СССР. МТТ. 1978. №5. С. 58–66.
8. **Polyanin A. D., Manzhirov A. V.** Handbook of Integral Equations. Second Edition. Boca Raton, London: Chapman & Hall/CRC Press, 2008.
9. **Manzhirov A. V.** Multi-body contact problem for a nonhomogeneous elastic coated foundation with wear // World Tribology Congress 2013. Torino, Italy, September 8–13, 2013. P. 1–4(390).

10. Манжиров А. В. Контактные задачи для оснований с произвольно неоднородными покрытиями // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2014. № 3(21). С. 3–13.

11. Манжиров А. В. Смешанное интегральное уравнение механики и обобщенный проекционный метод // ДАН. 2016. Том 470. №4. С. 401–405.

12. Manzhirov A. V. Mixed integral equations and their applications to contact mechanics and tribology // 9th European Solid Mechanics Conference, 6–10 July, 2015, Madrid, Spain. Madrid: ESMC, 2015. 2 p.

13. Сегё Г. Ортогональные многочлены. М.: Физматлит, 1962. 500 с.

Bibliography:

1. Vorovich I. I., Alexandrov V. M., Babeshko V. A. Nonclassical Mixed Problems of Elasticity Moscow: Nauka, 1974.

2. Arutyunyan N. Kh., Manzhirov A. V. Contact Problems of Theory of Creep. Erevan: Izd-vo Inst. Mekaniki NAN RA, 1999.

3. Pronikov A. S. Wear and durability of machine tools. Moscow: Mashgiz, 1957.

4. Khrushchov M. M., Babichev M. A. Abrasive Wear. Moscow: Nauka, 1970.

5. Collins J. Failure of Materials in Mechanical Design. Analysis, Prediction, Prevention. New York: Wiley, 1981.

6. Goryacheva I. G., Dobychin M. N. Contact Problems in Tribology. Moscow: Mashinostroenie, 1988.

7. Alexandrov V. M., Kovalenko E. V. Axisymmetric contact problem for linear-deformable foundation of common type with wear // Izv. Akad. Nauk SSSR. Mekh. Tberd. Tela. 1978. №5. P. 58–66.

8. Polyanin A. D., Manzhirov A. V. Handbook of Integral Equations. Second Edition. Boca Raton, London: Chapman & Hall/CRC Press, 2008.

9. Manzhirov A. V. Multi-body contact problem for a nonhomogeneous elastic coated foundation with wear // World Tribology Congress 2013. Torino, Italy, September 8–13, 2013. P. 1–4(390).

10. Manzhirov A. V. Contact problems for foundations with arbitrarily nonuniform covers // Vestnik ChGPU im. Yakovleva. Ser. Mekh. Predel. Sost. 2014. № 3(21). С. 3–13.

11. Manzhirov A. V. A mixed integral equation of mechanics and a generalized projection method of its solution // Dokl. Phys. 2016. Vol. 61. No. 10. 489–493.

12. Manzhirov A. V. Mixed integral equations and their applications to contact mechanics and tribology // 9th European Solid Mechanics Conference, 6–10 July, 2015, Madrid, Spain. Madrid: ESMC, 2015. 2 p.

13. Szegö G. Orthogonal Polynomials. Providence: Amer. Math. Soc., 1959.

УДК 621.643.414.6

ВИБРАЦИОННОЕ САМОРАСКРУЧИВАНИЕ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

А.Н. Неверов

*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет
(МАДИ)*

Введение. Воздействие ультразвука на процессы монтажа и демонтажа резьбовых соединений может быть сведено, во-первых, к снижению сил трения и изменению их характера [1, 2] и, во-вторых, к возникновению некоторых сил, способствующих либо

препятствующих этим операциям [1]. Автор предположил, что такие силы возникают в результате контактного взаимодействия болта и гайки.

Физическим аналогом винтовой линии, лежащей в основе образования резьбы, является наклонная плоскость. Если наклонная плоскость колеблется как единое целое, условия равновесия тела на ней не зависят от параметров колебаний плоскости и даже от их наличия. Однако любому известно, что болты при вибрациях всегда раскручиваются и никогда не закручиваются. Различен и характер влияния ультразвука на процессы разборки и сборки резьбовых соединений [3, 4]. При разборке влияние ультразвука монотонно возрастает при повышении амплитуды колебаний. При сборке эффективность применения продольных ультразвуковых колебаний сначала возрастает при повышении амплитуды, а затем практически от нее не зависит.

Аналитические соотношения. Чтобы объяснить эти нестыковки, рассмотрим продольные колебания винтовой поверхности по закону:

$$\xi = \xi_m \cos kx \cos \omega t, \tag{1}$$

где ξ – смещение, ξ_m – его амплитуда, $k = \frac{\omega}{c}$ – волновое число, ω – циклическая частота колебаний c – скорость звука, t – время, x – координата вдоль оси винта. Координата x отсчитывается от сечения, в котором амплитуда смещения максимальна, а амплитуда деформаций $\frac{\partial \xi}{\partial x} = -k \xi_m \sin kx$ равна нулю (рис. 1).

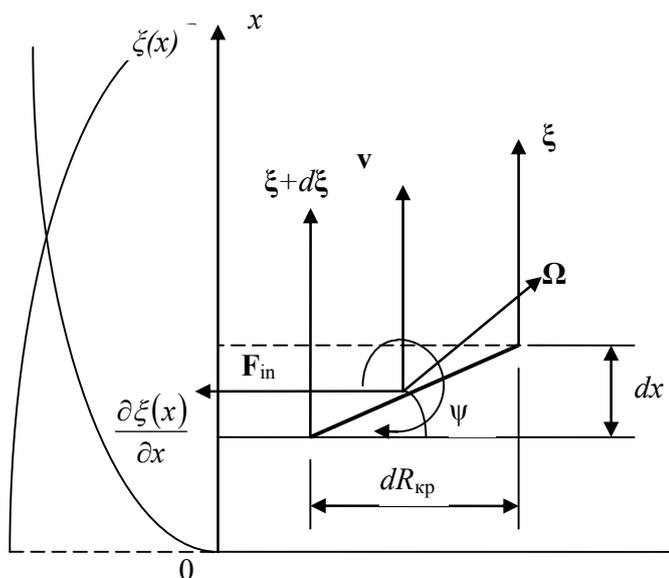


Рис. 1. Развертка элемента винтовой поверхности толщиной dx с углом наклона ψ и распределение амплитуд колебательных смещений ξ и деформаций $\frac{d\xi}{dx}$ вдоль оси стержня

Колебательное смещение левого конца элемента наклонной плоскости толщиной dx больше колебательного смещения правого конца на $d\xi$, такой элемент помимо поступательного вертикального движения со скоростью v совершает и вращательное движение вокруг оси, перпендикулярной плоскости рисунка, по часовой стрелке. Угол поворота элемента Θ зависит как от времени t , так и от координаты x :

$$\Theta(x, t) = \frac{\partial \xi}{\partial x} \operatorname{tg} \psi = -k \xi_m \operatorname{tg} \psi \sin kx \cos \omega t. \tag{2}$$

Вектор угловой скорости Ω направлен перпендикулярно плоскости рис. 1 от нас:

$$\Omega(x, t) = \frac{\partial \Theta(x, t)}{\partial t} = \omega k \xi_m \operatorname{tg} \psi \sin kx \sin \omega t. \tag{3}$$

Во вращающейся системе отсчета любая точка наклонной плоскости движется с центростремительным ускорением $\mathbf{a}_{цб} = -\Omega^2 R_{кр} \mathbf{e}_R$, где $R_{кр}$ – радиус кривизны траектории; \mathbf{e}_R – единичный вектор в направлении от центра кривизны траектории к данной точке, и ускорением Кориолиса $\mathbf{a}_K = 2[\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}]$. Если на колеблющейся наклонной плоскости поместить физическое тело, то в системе отсчета, связанной с наклонной плоскостью, на тело будут действовать две силы инерции: центробежная сила $\mathbf{F}_{цб} = m\Omega^2 R_{кр} \mathbf{e}_R$ и сила Кориолиса $\mathbf{F}_K = 2m[\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}]$. Направлены эти две силы одинаково – перпендикулярно оси стержня (вектору колебательной скорости) в сторону узла деформаций. Поэтому будем эти две силы рассматривать как одну силу инерции:

$$F_{in} = F_{цб} + F_K = F_{inm} \sin^2 \omega t, \tag{4}$$

где $F_{inm} = 1,5 \cdot m\omega^2 \xi_m (k\xi_m) \sin 2kx \operatorname{tg} \psi$.

Распределение амплитуд колебательных смещений и скоростей и сил инерции вдоль оси стержня показано на рис. 2.

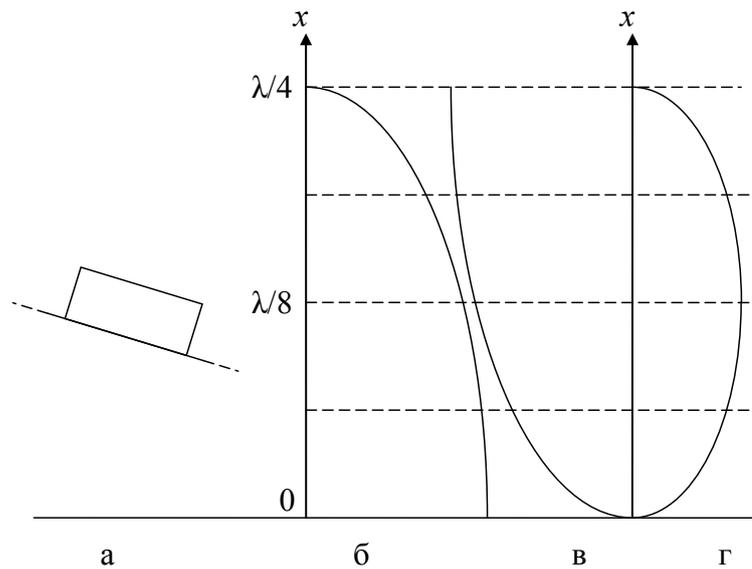


Рис. 2. а) тело на наклонной плоскости; распределение вдоль вертикальной оси: б) амплитуд колебательных смещений $\xi_m(x)$ и

Таким образом, при продольных колебаниях в резьбовых соединениях возникает момент силы, стремящейся повернуть гайку или болт по резьбе в сторону узла механических напряжений.

Из (4) видно, что сила инерции имеет постоянную составляющую $0,5F_{inm}$, направленную перпендикулярно оси стержня к узлу механических напряжений, и переменную составляющую удвоенной частоты $0,5F_{inm} \cdot \cos 2\omega t$.

С учетом сил инерции уравнения движения принимают вид:

$$\begin{cases} (P - F_m \cos \omega t) \sin \psi + F_{inm} \sin^2 \omega t \cos \psi - F_{mp} = ma, \\ (P - F_m \cos \omega t) \cos \psi - F_{inm} \sin^2 \omega t \sin \psi = N. \end{cases} \tag{5}$$

где P – вертикальная сила, прижимающая тело к поверхности (это может быть, в частности, сила тяжести). Моменты начала движения определяются из первого уравнения (5) при, $a = 0$:

$$(P - F_m \cos \omega t) \sin(\rho_{тр} - \psi) = F_{inm} \cos(\rho_{тр} - \psi) \sin^2 \omega t, \tag{6}$$

где $\rho_{тр}$ – угол трения. Графическое решение уравнения (6) приведено на рис. 3.

Движение тела с ускорением происходит в промежутках от t_1 до t_1' и от t_2 до t_2' . Далее некоторое время тело движется по инерции до моментов t_1'' и t_2'' (на рис. 3 моменты t_1'' и t_2'' не показаны). Моменты начала движения t_1 и t_2 определяются решениями уравнения (6):

$$\cos \omega t_{1,2} = \frac{F_m}{2F_{innm}} \operatorname{tg}(\rho_{\text{тр}} - \psi) \pm \sqrt{\left[\frac{F_m}{2F_{innm}} \operatorname{tg}(\rho_{\text{тр}} - \psi) \right]^2 - \frac{P}{F_{innm}} \operatorname{tg}(\rho_{\text{тр}} - \psi) + 1}. \quad (7)$$

Знак «-» перед корнем в (7) соответствует моменту t_1 на рис. 3, а знак «+» - моменту t_2 .

Ускорение тела в промежутках от t_1 до t_1' и от t_2 до t_2' определяется из системы (5):

$$a = \frac{P \sin(\psi - \rho_{mp}) + \frac{1}{2} F_{innm} \cos(\psi - \rho_{mp}) - F_m \cos \omega t \sin(\psi - \rho_{mp}) + \frac{1}{2} F_{innm} \cos 2\omega t \cos(\psi - \rho_{mp})}{m \cos \rho_{mp}}. \quad (8)$$

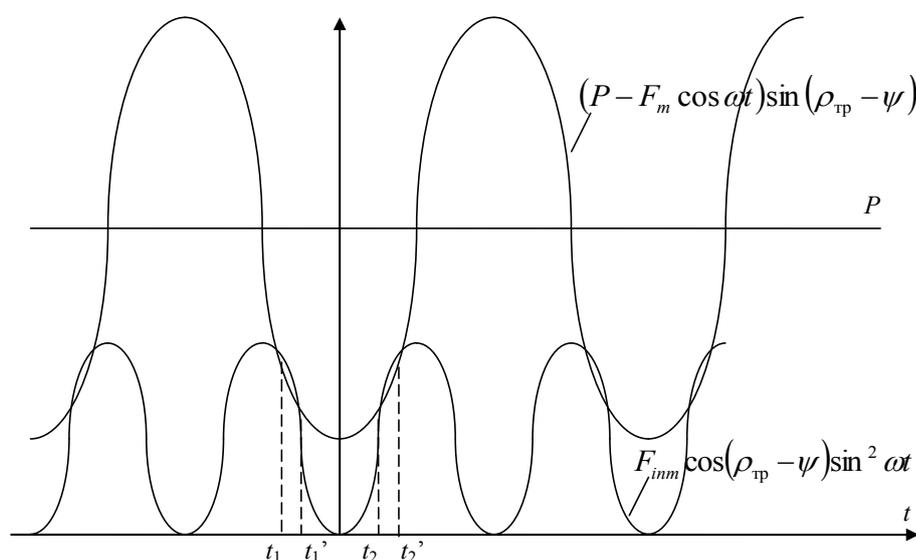


Рис. 3. Графическое решение уравнения (6).
Временные зависимости сил, действующих на тело

Моменты остановки $t_{1,2}''$ определяются из условия равенства нулю скорости тела $v(t_{1,2}'')=0$. Дважды интегрируя (8) в пределах от t_1 до t_1'' и от t_2 до t_2'' , получаем перемещение за период колебаний. Разделив полученное выражение на период, определяем с учетом малости интервалов движения, т.е. при $\omega(t_{1,2}'' - t_{1,2}) \ll 1$, среднюю скорость перемещения тела:

$$v_{cp} \approx \frac{\omega(t_{1,2}'' - t_1)^2}{\pi m \cos \rho_{\text{тр}}} \left[\left(P + F_m \cos \omega t_{1,2} - \frac{2}{3} F_m \omega(t_{1,2}'' - t_{1,2}) \sin \omega t_{1,2} \right) \sin(\psi - \rho_{mp}) + \left(\frac{1}{2} F_{innm} - F_{innm} \cos 2\omega t_{1,2} + \frac{2}{3} F_{innm} \omega(t_{1,2}'' - t_{1,2}) \sin 2\omega t_{1,2} \right) \cos(\psi - \rho_{mp}) \right]. \quad (9)$$

Эксперимент. Экспериментальная проверка теоретических результатов проводилась на установке, блок-схема которой приведена на рис. 4.

Ультразвуковая колебательная система представляла собой серийный двухполуволновой магнитострикционный преобразователь с коническим волноводом, соосно соединенный с составным пьезопреобразователем. Собственная частота магнитострикционного преобразователя составляла 21,1 кГц, пьезопреобразователя – 22,4 кГц. Хвостовик пьезопреобразователя свободно ввинчивался в резьбовое отверстие М10×1 на выходном торце магнитострикционного преобразователя.

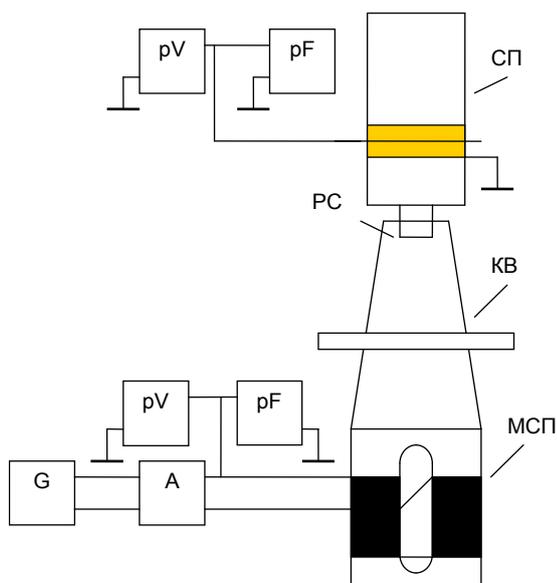


Рис. 4. Блок-схема экспериментальной установки: G – генератор; A – усилитель; pV – вольтметр; pF – частотомер; МСП – преобразователь; КВ – конический волновод; СП – составной пьезопреобразователь; РС – резьбовое соединение

Эксперимент. Экспериментальная проверка теоретических результатов проводилась на установке, блок-схема которой приведена на рис. 4.

Ультразвуковая колебательная система представляла собой серийный двухполуволновой магнитострикционный преобразователь с коническим волноводом, соосно соединенный с составным пьезопреобразователем. Собственная частота магнитострикционного преобразователя составляла 21,1 кГц, пьезопреобразователя – 22,4 кГц. Хвостовик пьезопреобразователя свободно ввинчивался в резьбовое отверстие М10×1 на выходном торце магнитострикционного преобразователя.

Амплитуда колебаний оценивалась по сигналам индукционного датчика, закрепленного на коническом волноводе, и напряжения, снимаемого с пластин составного пьезопреобразователя.

В экспериментах варьировались частота и амплитуда возбуждавшего магнитострикционный преобразователь электрического сигнала, оценивались направление и угловая скорость вращения пьезопреобразователя Ω .

На рис. 5 приведены экспериментальные зависимости угловой скорости Ω вращения пьезопреобразователя от частоты колебаний f при различных амплитудах колебаний. Угловая скорость считается положительной при закручивании пьезопреобразователя и отрицательной при его раскручивании.

Вращение пьезопреобразователя начинается при амплитудах 1 – 1,5 мкм и эта амплитуда слабо зависит от частоты. С увеличением амплитуды колебаний угловая скорость вращения растет приблизительно по квадратичному закону, что соответствует теоретическим результатам (выражение (4)).

На частоте $f_1 = 23,15$ кГц пьезопреобразователь остается неподвижным. Эта частота выше собственных частот как пьезопреобразователя, так и магнитострикционного преобразователя с коническим волноводом, что объясняется, скорее всего, влиянием контактной упругости. Узел деформации при этом совпадает с резьбовым соединением (рис. 6, кривая 1). При увеличении частоты возбуждающего сигнала ($f_2 > f_1$) узел деформации смещается вверх (рис. 6, кривая 2), пьезопреобразователь закручивается, с ростом частоты скорость закручивания возрастает. При снижении частоты возбуждающего сигнала ($f_3 < f_1$) узел деформации смещается вниз (рис. 6, кривая 3), пьезопреобразователь раскручивается, с уменьшением частоты скорость раскручивания возрастает.

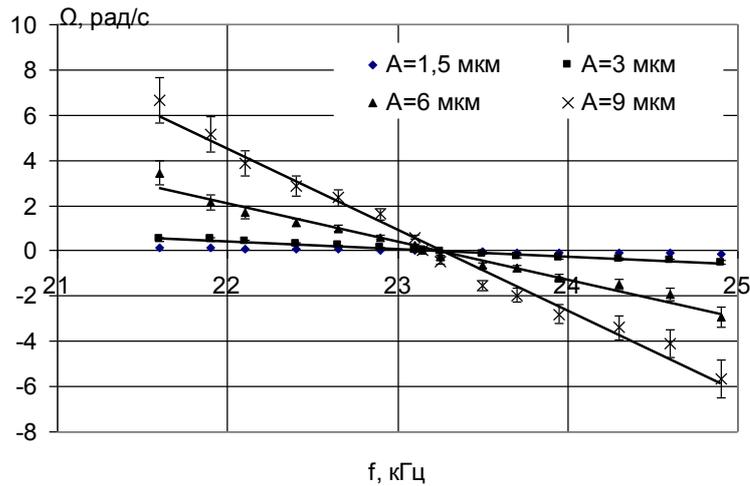


Рис. 5. Экспериментальные зависимости угловой скорости Ω вращения пьезопреобразователя от частоты колебаний f при различных амплитудах колебаний

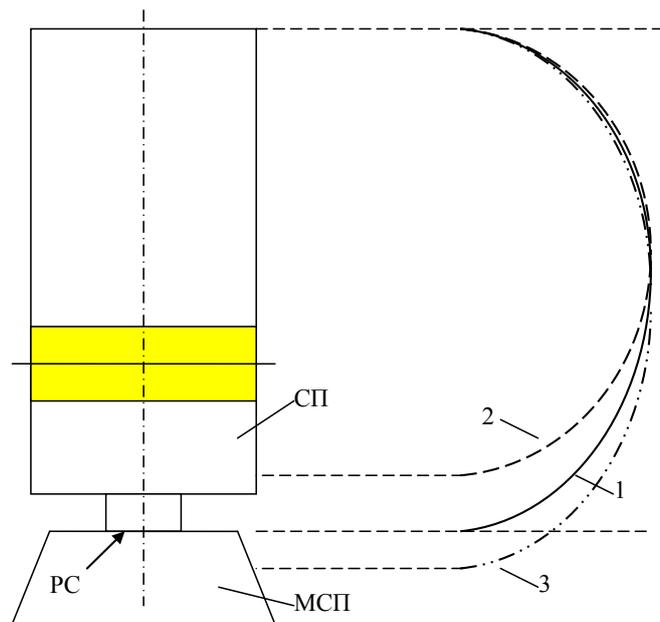


Рис. 6. Распределение амплитуд деформаций вдоль оси колебательной системы: МСП –МС преобразователь; СП – составной пьезопреобразователь; РС – резьбовое соединение; 1 – узел деформаций совпадает с соединением, частота равна f_1 , пьезопреобразователь покоится; 2 – узел деформаций выше соединения, частота $f_2 > f_1$, пьезопреобразователь закручивается; 3 – узел деформации выше соединения, частота $f_3 < f_1$

Отметим, что сигнал пьезопреобразователя оставался синусоидальным даже при достаточно высоких амплитудах колебаний (рис. 7а), только при амплитуде 9 мкм наблюдалась некоторая нелинейность (рис. 7б).

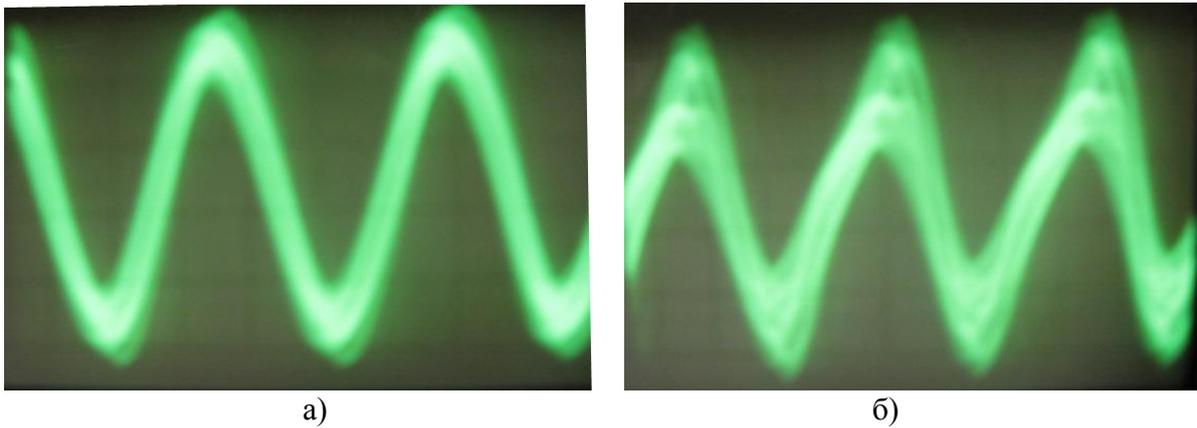


Рис. 7. Осциллограммы сигнала составного пьезопреобразователя: а) $A = 6 \text{ мкм}$; б) $A = 9 \text{ мкм}$

Выводы.

1. Если на винтовой поверхности находится тело, на него при продольных колебаниях стержня действует момент силы, стремящийся его двигать по винтовой поверхности в сторону узла механических деформаций. Этот момент появляется в результате контактного взаимодействия резьбовых поверхностей болта и гайки.

2. Поскольку свободный торец болта (винта, гайки) всегда соответствует узлу деформаций, при наложении колебаний болт всегда будет откручиваться.

Библиографический список:

1. **Блехман, И.И.** Вибрационная механика [Текст] / И.И. Блехман. – М.: Физматлит, 1994. – 400 с.
2. **Неверов А.Н.** О модификации сил трения ультразвуковыми колебаниями [Текст] / А.Н. Неверов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – №4, с. 3-8
3. **Вологдин, М.Ф.** Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке [Текст] / М.Ф. Вологдин, В.В.Калашников, М.С. Нерубай, Б.Л. Штриков. – М.: Машиностроение, 2002. – 264 с.
4. **Неверов А.Н.** Разборка и сборка резьбовых соединений при помощи ультразвуковых продольных колебаний [Текст] / А.Н. Неверов // Вестник МАДИ. – 2014. – вып. 4(39), с. 54-61

Bibliography:

1. **Blekhman, I.I.** Vibration mechanics [Text] / I.I. Blekhman. – M.: Fizmatlit, 1994. – 400 p.
2. **Neverov A.N.** On the modification of frictional forces by ultrasonic vibrations [Text] / A.N. Neverov // Friction and lubricant in the machines and the mechanisms. – 2014. – № 4, p. 3-8
3. **Vologdin, M.F.** Application of ultrasound and explosion during the working and the assembling [Text] / M.F. Vologdin, V.V.Kalashnikov, M.S. Nerubay, B.L. Shtrikov. – M.: Machine building, 2002. – 264 p.
4. **Neverov A.N.** Dismantling and assembling threaded connections with the aid of the ultrasonic longitudinal vibrations [Text] / A.N. Neverov // The messenger of MADi. – 2014. – iss. 4(39), p. 54-61

УДК 531.8; 621.891

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЯЗКОУПРУГОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ КОНТАКТИРУЮЩИХ ТЕЛ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ

П.П. Усов

Национальный исследовательский Университет «Московский институт электронной техники», г. Москва, Зеленоград, Россия

В настоящее время расчет смазываемых узлов трения основан на решении задач упругогидродинамической (УГД) теории смазки, которая рассматривает течение тонкого слоя смазочного материала между поверхностями упругих тел.

Однако в действительности механические свойства поверхностных слоев контактирующих тел отличны от свойств основного материала и зависят от скорости относительных перемещений, взаимодействующих тел. Кроме того, в последнее время наметилась тенденция использования в узлах трения различных композиционных материалов, обладающих реологическими свойствами. В связи с этим возникает необходимость исследования влияния несовершенной упругости контактирующих тел на характеристики смазочного слоя, разделяющего их.

До настоящего времени проведен ряд исследований влияния вязкоупругости контактирующих тел на характеристики смазываемых контактов. В работах [1-4] исследовалось влияние вязкоупругих свойств покрытий, нанесенных на гладкие упругие цилиндрические тела, на характеристики смазываемого контакта. В этих работах показано, что вязкие свойства покрытия оказывают существенное влияние на распределение давления и толщину смазочного слоя. Результаты существенно отличаются от случая контакта однородных упругих тел при малых скоростях относительного движения тел. По мере увеличения скорости движения влияние вязких свойств ослабевает и становится несущественным.

В работе [5] на примере наиболее простой модели смазываемого контакта жесткого шероховатого цилиндра и вязкоупругого слоя исследуется совместное влияние неупругих свойств покрытий и шероховатости на характеристики смазочного слоя. Показано, что вследствие шероховатости характеристики смазываемого контакта, как функции входных параметров, могут иметь разрывы. Приведено сопоставление результатов решения ВУГД задачи с результатами УГД теории смазки шероховатых тел.

В настоящей работе исследовано влияние вязкоупругих свойств тонких поверхностных слоев на характеристики смазочного слоя, разделяющего деформируемые контактирующие тела. Смазка предполагается неньютоновской. В качестве реологической модели вязкоупругих слоев принята одномерная модель Кельвина. Исследовано одновременное влияние неньютоновских свойств смазки и вязкоупругих свойств контактирующих тел на распределение давления в смазочном слое и толщину смазочного слоя.

Рассмотрим задачу о стационарном контакте вращающихся упругих цилиндров, покрытых тонкими слоями из вязкоупругого материала и разделенных тонким слоем неньютоновской вязкой смазки (рис. 1). Полагаем, что имеет место качение со скоростью u без скольжения. Полагаем также, что поверхностные вязкоупругие слои имеют одинаковые механические свойства, а их суммарная толщина равна H . Пусть приведенный модуль упругости цилиндров равен E' , т. е. $\frac{2}{E'} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} = \frac{1}{E_1'} + \frac{1}{E_2'}$, где E_i, ν_i , ($i=1,2$) модуль упругости и коэффициент Пуассона i -го цилиндра соответственно.

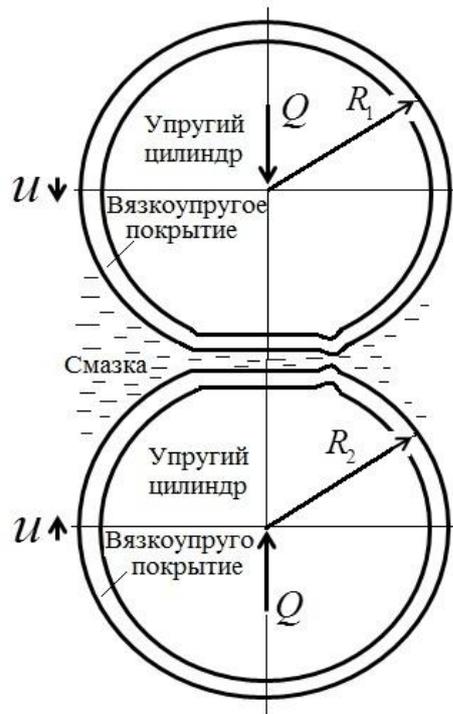


Рис. 1. Схема контакта

В качестве реологической модели вязкоупругих слоев принимаем одномерную модель Кельвина, в которой уравнение, определяющее перемещение поверхности вязкоупругого слоя w вследствие его деформаций, в системе координат, в которой вязкоупругий слой покоится, имеет вид

$$(1+a)p + \lambda \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{E}{H_i} \left(w + \lambda \frac{\partial w}{\partial t} \right) \quad (1)$$

Здесь t - время, H_i - толщина i -го вязкоупругого слоя, p - давление на поверхности вязкоупругого слоя, $\lambda = t_s(1+a)$, t_s и E - время релаксации и мгновенный модуль упругости материала вязкоупругого слоя, соответственно. Отношение $E/(1+a)$ представляет собой длительный модуль упругости. При значении $a = 0$ вязкоупругий слой ведет себя как упругий слой с мгновенным модулем упругости.

Учитывая, что в стационарном режиме $\frac{d}{dt} = u \frac{d}{dx}$, уравнение (1) можно переписать в виде

$$(1+a)p + \lambda u \frac{dp}{dx} = \frac{E}{H_i} \left(w + \lambda u \frac{dw}{dx} \right)$$

В пределах области контакта толщина смазочного слоя может быть определена следующим образом

$$h(x) = h(c) + \frac{x^2 - c^2}{2R} + (w(x) - w(c)) + (w_{1,E}(x) - w_{1,E}(c)) + (w_{2,E}(x) - w_{2,E}(c))$$

где $R = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ - приведенный радиус, $w_{i,E}$ - перемещение поверхности i -го цилиндра вследствие упругих деформаций. Выражения для производной $w_{i,E}$ имеют вид

$$\frac{dw_i}{dx} = - \frac{2(1-\nu_i^2)}{\pi E_i} \int_{-\infty}^c \frac{p(s)}{x-s} ds$$

В качестве реологической модели смазки принимаем модель Эйринга [6], имеющей вид

$$\gamma = \frac{\tau_0}{\eta} \operatorname{sh} \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)$$

Здесь τ_0 - напряжение сдвига Эйринга, η - вязкость смазки, τ - напряжение сдвига в некоторой точке смазочного слоя, γ - скорость сдвига в этой же точке.

Зависимости плотности смазки и ее вязкости от давления принимаем в виде

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{C_1 p}{1 + C_2 p} \right), \quad \eta = \eta_0 \exp(\alpha_p p)$$

где C_1, C_2 - константы, η_0, ρ_0 - вязкость и плотность смазки при атмосферном давлении, α_p - пьезокоэффициент вязкости.

В безразмерных переменных основные уравнения задачи имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\bar{x}} \left(\frac{-\bar{h}^3}{\bar{\rho}} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} \left(3 \frac{\beta \operatorname{ch}(\beta) - \operatorname{sh}(\beta)}{\beta^3} \right) \right) - V \frac{d(\bar{\rho}\bar{h})}{d\bar{x}} &= 0 \\ \beta &= S \frac{\bar{h}}{2} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}}, \quad \bar{\rho} = 1 + \frac{K_1 \bar{p}}{1 + K_2 \bar{p}}, \quad \bar{\eta} = \exp(G\bar{p}) \\ \bar{h}(\bar{x}) &= \bar{h}_c + \frac{\bar{x}^2 - \bar{c}^2}{2} + \frac{2}{\pi} \int_{-\infty}^{\bar{c}} \ln \left| \frac{\bar{c} - \xi}{\xi - \bar{x}} \right| \bar{p}(\xi) d\xi + \theta [W(\bar{x}) - W(\bar{c})] \\ W(\bar{x}) &= \bar{p} + a\alpha \int_{-\infty}^{\bar{x}} \exp[-\alpha(\bar{x} - \xi)] \bar{p}(\xi) d\xi \\ \bar{p}(-\infty) &= 0, \quad \bar{p}(\bar{c}) = 0, \quad \left. \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} \right|_{\bar{x}=\bar{c}} = 0 \\ \int_{-\infty}^{\bar{c}} \bar{p}(\xi) d\xi &= \frac{\pi}{2}, \end{aligned}$$

Здесь $\bar{p} = \frac{p}{p_g}$, $\bar{x} = \frac{x}{b}$, $\bar{h} = \frac{2Rh}{b^2}$, $\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0}$, $\bar{\mu} = \frac{\mu}{\mu_0}$, $p_g = \sqrt{\frac{QE'}{2\pi R}}$, $b = \sqrt{\frac{8QR}{\pi E'}}$, $S = \frac{Q}{\pi R \tau_0}$, $V = 3\pi^2 \frac{\mu_0 u R E'}{Q^2}$, $G = \alpha_p p_g$, $\alpha = \frac{b}{\lambda u}$, $\theta = \frac{1}{2} \frac{H E'}{b E}$, $K_1 = p_g C_1$, $K_2 = p_g C_2$.

Параметр b равен половине ширины площадки контакта, которая имела бы место при сухом контакте упругих цилиндров с приведенным радиусом R и с приведенным модулем упругости E' . Параметр p_g равен максимальному давлению в этом контакте (давлению по теории Герца).

Значению $\theta = 0$ соответствует случай контакта упругих тел. При этом параметры a и α задавать не надо. Значению $S = 0$ соответствует случай ньютоновской смазки. При $V \rightarrow \infty$ решение задачи стремится к решению задачи теории смазки жестких тел.

На рис. 2 приведены зависимости \bar{h}_{\min}/V от $\lg V$ для случаев контакта упругих тел при ньютоновской смазке (кривая 1), контакта упругих тел при неньютоновской смазке (кривая 2), контакта упругих тел с вязкоупругими покрытиями при ньютоновской смазке (кривая 3) и для случая упругих тел с вязкоупругими покрытиями при неньютоновской смазке (кривая 4). Здесь \bar{h}_{\min} - минимальное значение безразмерной толщины смазочного слоя. Безразмерные параметры вязкоупругих покрытий принимались следующими: $a = 10$, $\alpha = 1$, $\theta = 0.1$.

Безразмерный параметр S , определяющий неньютоновские свойства смазки, принимался равным $S=10$.

Отношение $\bar{h}_{\min}/V = Qh_{\min}/(12\pi\mu_0uR)$ не зависит от E' , а параметр V пропорционален E' . Если все входные параметры зафиксировать, а изменять только E' , то кривые на рис.2 будут демонстрировать влияние E' на толщину смазочного слоя. При больших значениях E' (или малых нагрузках), которым соответствуют большие значения V , решение задачи близко к решению задачи для жестких тел. При этом толщина смазочного слоя мала и реология смазки существенно влияет на нее. А именно, при высоких значениях параметра V минимальная толщина смазочного слоя в случае неньютоновской смазки более чем в три раза ниже толщины смазочного слоя в случае ньютоновской смазки. Таким образом, при малых нагрузках, при которых деформации тел малы, минимальная толщина смазочного слоя существенно зависит от реологических свойств смазки.

При уменьшении приведенного модуля упругости E' (уменьшении параметра V) упругие деформации тел растут, что приводит к росту толщины смазочного слоя. Из приведенных на рис. 2 результатов расчетов следует, что при уменьшении значения V от 100 до 0.05 минимальная толщина смазочного слоя в случае ньютоновской смазки возрастает более чем в 10 раз, а в случае неньютоновской смазки – более чем в 27 раз. Что касается роста толщины смазочного слоя вследствие роста вязкости смазки с ростом давления, расчеты показывают, что это рост обычно не превышает в 3 раза. Данные результаты указывают на то, что толщина смазочного слоя при высоких нагрузках определяется, главным образом, деформациями тел, и в значительно меньшей степени зависит от реологических свойств смазки.

Из приведенных на рис. 2 результатов расчетов следует, что вязкоупругое покрытие слабо влияет на минимальную толщину смазочного слоя.

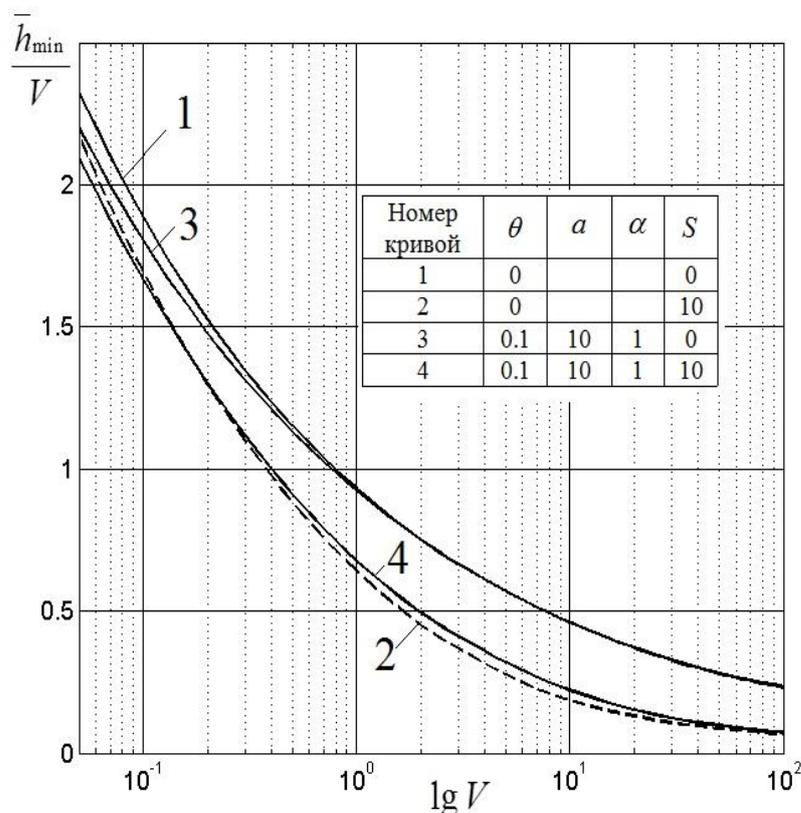


Рис. 2. Зависимости \bar{h}_{\min}/V от $\lg V$ при различных значениях параметров θ, a, α, S

На рис. 3 приведены зависимости $\bar{h}(\bar{x})/V$ и $\bar{p}(\bar{x})$ для контакта упругих тел при ньютоновской (левая часть рисунка) и неньютоновской (правая часть рисунка) смазках и при различных значениях параметра V . Расчеты приводились при значениях параметров $G = 7$, $K_1 = 0.6$, $K_2 = 1.7$, $S = 10$.

На приведенных рисунках видно, что при $V = 50$ (кривые 7) зависимости $\bar{p}(\bar{x})$ и $\bar{h}(\bar{x})$ имеют вид, характерный для случая жестких тел. А именно, функция $\bar{h}(\bar{x})$ имеет вид, близкий к параболе, и в случае ньютоновской смазки функция $\bar{p}(\bar{x})$ имеет максимум, имеющий координату, близкую $\bar{x} = -\bar{c}$.

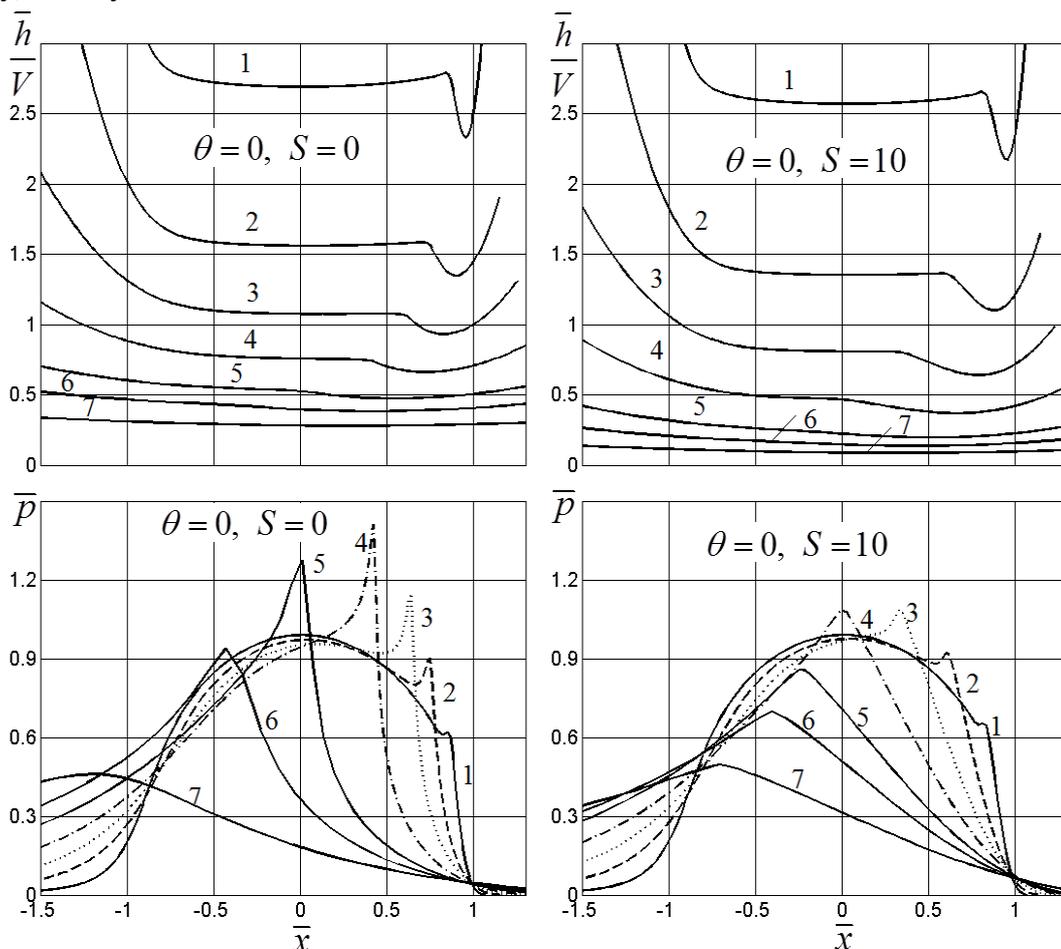


Рис. 3. Зависимости $\bar{h}(\bar{x})/V$ и $\bar{p}(\bar{x})$ для контакта упругих тел при ньютоновской и неньютоновской смазках и различных значениях параметра V : кривая 1 - $V = 0.05$; 2 - $V = 0.3$; 3 - $V = 1$; 4 - $V = 3$; 5 - $V = 9$; 6 - $V = 18$; 7 - $V = 50$

По мере уменьшения значения параметра V максимум давления смещается вправо и до некоторого значения V растет и заостряется. Заострение максимума давления особенно ярко выражено в случае ньютоновской смазки. Рост максимального давления в случае ньютоновской смазки происходит при уменьшении V до значения $V = 3$ (кривая 4 на левой нижней части рисунка). При этом максимум давления расположен правее линии действия нагрузки (координаты $\bar{x} = 0$). При дальнейшем уменьшении параметра V максимум давления уменьшается и продолжает сдвигаться вправо, к выходной точке смазочного слоя. При этом левее максимума функция $\bar{p}(\bar{x})$ стремится принять вид, характерный для сухого контакта тел,

в котором имеется максимум в точке $\bar{x}=0$. В результате при некотором значении V перемещающийся максимум становится вторым максимумом давления. При дальнейшем уменьшении V этот, второй максимум давления продолжает уменьшаться и при некотором значении V исчезает.

Таким образом, второй максимум давления имеет место в некотором диапазоне изменения параметра V .

При неньютоновской смазке функция распределения давления изменяется с уменьшением V аналогичным образом, однако второй максимум давления здесь значительно ниже, чем при ньютоновской смазке. Таким образом, неньютоновские свойства смазки способствуют понижению максимума давления.

На рис. 3 видно также, каким образом преобразовывается функция $\bar{h}(\bar{x})$ при уменьшении значения параметра V от вида, близкого к параболе до вида, характерного для тяжело нагруженного УГД контакта.

На рис. 4 приведены кривые, аналогичные кривым на рис. 3, только для случая контакта упругих тел с вязкоупругими покрытиями. На рисунке видно, что при уменьшении параметра V от значения $V=50$ максимум давления, в отличие от случая отсутствия вязкоупругих покрытий, растет вплоть до самого наименьшего значения. При этом он сначала сдвигается вправо, к выходной точке смазочного слоя, а затем сдвигается влево, к входной точке. Второго пика давления не возникает, ни при каком значении параметра V . При высоких нагрузках максимальное давление заметно ниже, чем в случае отсутствия вязкоупругих покрытий. Толщина смазочного слоя при высоких нагрузках близка к постоянной толщине в более широкой области, чем при отсутствии вязкоупругих покрытий.

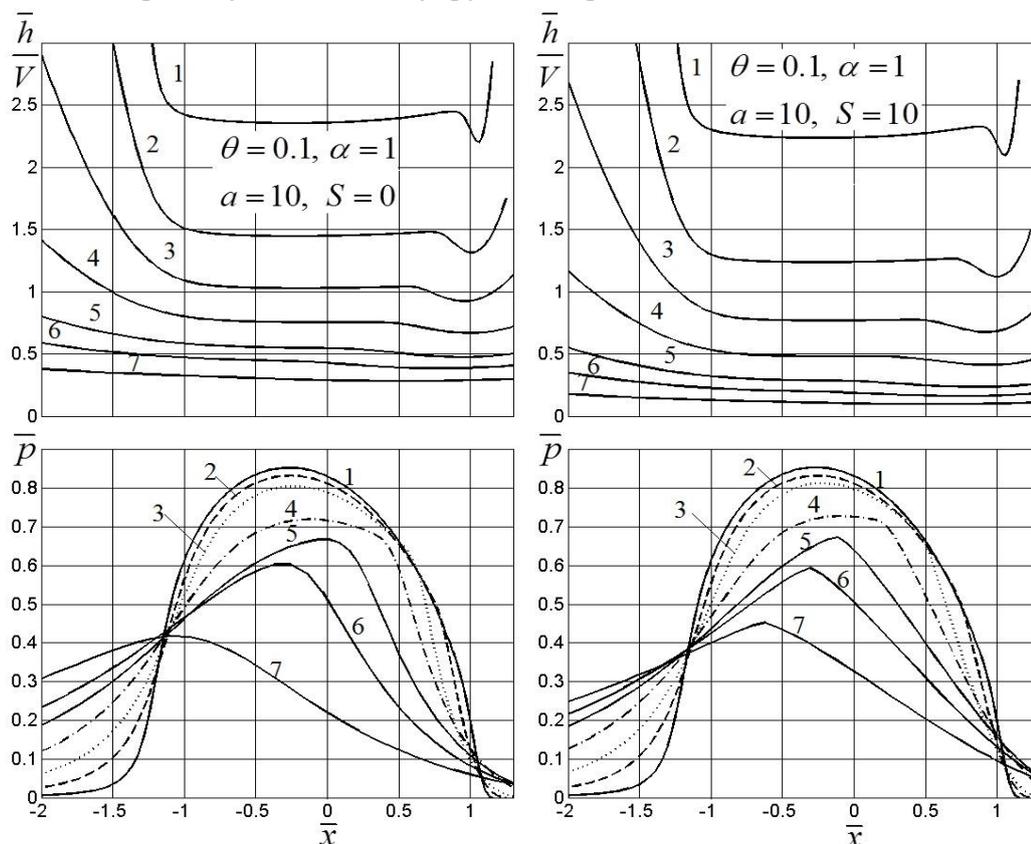


Рис. 4. Зависимости $\bar{h}(\bar{x})/V$ и $\bar{p}(\bar{x})$ для контакта упругих тел с вязкоупругими покрытиями при ньютоновской и неньютоновской смазках и различных значениях параметра V : кривая 1 - $V=0.05$; 2 - $V=0.3$; 3 - $V=1$; 4 - $V=3$; 5 - $V=9$; 6 - $V=18$; 7 - $V=50$

Библиографический список:

1. **Kalker, J.J.** Viscoelastic multilayered cylinders rolling with dry friction // Journal of Applied Mechanics. - 1991, - V. 58, - P. 666-679
2. **Goryacheva, I. G., Sadeghi, F., and Xu, G.** Viscoelastic effects in lubricated contacts// Wear. - 1996, - V.198, - P. 307-312
3. **Горячева, И. Г.** Механика фрикционного взаимодействия //Москва. Наука. – 2001 - 478с.
4. **Горячева, И. Г., Усов, П. П.** Численный анализ вязкоупругогидродинамического точечного контакта при стационарных условиях // Трение и износ. – 2010, - Т. 31, - № 1, - С. 1-10.
5. **Горячева, И. Г., Усов, П. П.** Численный анализ контакта вязкоупругих шероховатых тел при наличии слоя вязкой смазки // Прикладная математика и механика. – 2012, - Т. 76, - вып. 5, - С. 766-778.

Bibliography:

1. **Kalker, J.J.** Viscoelastic multilayered cylinders rolling with dry friction // Journal of Applied Mechanics. - 1991, - V. 58, - P. 666-679
2. **Goryacheva, I. G., Sadeghi, F., and Xu, G.** Viscoelastic effects in lubricated contacts// Wear. - 1996, - V.198, - P. 307-312
3. **Goryacheva, I. G.** Contact Mechanics in Tribology: Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers. - 1988.
4. **Goryacheva, I. G., Usov, P. P.** Numerical Analysis of Viscous Elastohydrodynamic Point Contact under Stationary Conditions // Journal of Friction and Wear. – 2010, - Vol. 31, - № 1, - P. 1-10.
5. **Goryacheva, I. G., Usov, P. P.** A numerical analysis of the contact of rough viscoelastic bodies in the presence of a layer of viscous lubricant // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – 2012, - Vol. 76, - №. 5, - P. 766-778.

УДК 539.3

К ТЕОРИИ КАНАТОВ. ЗАДАЧА РАСТЯЖЕНИЯ-КРУЧЕНИЯ

Ю.А.Устинов

*Институт математики и механики им. И.И.Ворovichа
Южного Федерального университета*

Введение. Существуют различные конструкции канатов, которые отличаются, главным образом, способом их плетения и профилем поперечного сечения проволоки, из которой они свиваются [1]. Такое разнообразие вызвано различными условиями их эксплуатации. Наибольшее распространение получили круглые стальные канаты одинарной и двойной свивок. У канатов одинарной свивки проволоки (волокна) располагаются по винтовым спиралям вокруг центрального прямолинейного волокна в несколько слоев. Канаты двойной свивки плетутся из прядей.

Известны два основных подхода к построению теории каната одинарной свивки. Один из таких подходов опирается на представление о канате, как о дискретной системе криволинейных стержней и использует методы строительной механики [1,2], второй подход основывается на уравнениях упругой сплошной среды с криволинейной анизотропией [3,4].

В отличие от прямолинейных стержней, где все известные подходы к построению элементарной теории приводят к одинаковому конечному результату:

$$B_r = ES \tag{1}$$

где E — модуль Юнга, S — площадь поперечного сечения, в теории канатов разные подходы приводят к различным аналитическим выражениям для B_r .

Обзор некоторых из этих исследований содержится в [5]. В этой же работе вводится понятие матрицы жесткостей с элементами d_{ij} ($i, j = 1, 2$) построение которой осуществлялось на основе решения Сен-Венана для цилиндра из волокнистого композита со слабым наполнителем. Поскольку построение решения связано с численным интегрированием дифференциального уравнения второго порядка, у которого коэффициент при старшей производной стремится к нулю при стремлении к нулю модуля Юнга наполнителя, процесс численного интегрирования является неустойчивым и не позволил в этой работе получить точный результат в предельном случае. В настоящей работе для определения d_{ij} используется новый подход, который позволяет получить выражения для этих элементов в виде элементарных функций от механических и геометрических параметров каната.

1. Основные соотношения теории упругости в винтовой системе координат. Метод построения основных соотношений теории упругости для волокнистых композитов с винтовой анизотропией подробно описан в работе [5]. Здесь приведем в основном конечные результаты этих исследований. С геометрическим центром тяжести одного из торцов цилиндра совместим начало декартовой системы координат x_1, x_2, x_3 эту систему координат будем называть основной. Введем винтовую систему координат r, θ, z , связанную с основной соотношениями Обозначим через E_1, ν_1 модуль Юнга и коэффициент Пуассона винтовых спиралей, через E_2, ν_2 — упругие характеристики наполнителя. Для описания интегральных упругих свойств такого цилиндра используется теория усреднения.

Поясним основные идеи и необходимые для понимания приводимых ниже формул. Введем винтовую систему координат r, θ, z , связанную с декартовой системой следующими соотношениями:

$$x_1 = r \cos(\theta + \tau z), \quad x_2 = r \sin(\theta + \tau z), \quad x_3 = z \tag{2}$$

Соотношения (2) при $r = const, \theta = const$ являются параметрическими уравнениями винтового волокна. Радиус-вектор точек волокна (линии) представим в виде

$$\mathbf{R} = r\mathbf{e}'_1 + z\mathbf{e}'_3 \tag{3}$$

Здесь

$$\begin{aligned} \mathbf{e}'_1 &= \mathbf{e}_r = \mathbf{i}_1 \cos(\theta + \tau z) + \mathbf{i}_2 \sin(\theta + \tau z) \\ \mathbf{e}'_2 &= \mathbf{e}_\theta = -\mathbf{i}_1 \sin(\theta + \tau z) + \mathbf{i}_2 \cos(\theta + \tau z) \\ \mathbf{e}'_3 &= \mathbf{e}_z \end{aligned} \tag{4}$$

и $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \mathbf{i}_3$ — орты основной (декартовой) системы координат. С винтовой линией свяжем естественный базис (репер Френе) $\mathbf{e}_1 = \mathbf{n}, \mathbf{e}_2 = \mathbf{b}, \mathbf{e}_3 = \mathbf{t}$ — орты главной нормали, бинормали и касательной соответственно. Ортогональная матрица перехода от базиса \mathbf{e}_j к базису \mathbf{e}'_i имеет вид

$$A = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{vmatrix}$$

где $\alpha = \arctan(x), x = r\tau$

Материал цилиндра, полученный описанным выше способом, неоднороден, однако, при достаточно большом количестве слоев намотки, основываясь на теории усреднения, его можно в каждой точке цилиндра рассматривать как локально трансверсально изотропный, при этом направление главной оси симметрии упругих свойств совпадает с вектором $\mathbf{e}_3 = \mathbf{t}$.

Для описания упругих свойств цилиндра будем использовать векторно-матричную форму обобщенного закона Гука [6]:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma} &= \mathbf{C}\mathbf{e}, \quad \mathbf{C} = (c_{ij}), \quad i, j = 1, \dots, 6 \\ \boldsymbol{\sigma} &= [\sigma_1, \dots, \sigma_6]^T, \quad \mathbf{e} = [e_1, \dots, e_6]^T \end{aligned} \tag{5}$$

где σ_{ij}, e_{ij} — компоненты тензоров напряжений и малых деформаций соответственно.

Известно [6], что упругие свойства трансверсально-изотропного материала определяются пятью техническими постоянными: модулями Юнга E, E' , коэффициентами Пуассона ν, ν' и модулем сдвига G' . Элементы матрица \mathbf{C} выражаются через эти постоянные формулы

$$c_{11} = c_{22} = \frac{E(E' + \nu^2 E)}{E'(1 + \nu^2) - 2E\nu'(1 + \nu)}; \quad c_{12} = \frac{E(\nu E' + \nu^2 E)}{E'(1 + \nu^2) - 2E\nu'(1 + \nu)}$$

$$c_{13} = c_{23} = \frac{E\nu E'}{E'(1 - \nu) - 2E'\nu'^2}; \quad c_{33} = \frac{E'^2(1 - \nu)}{E'(1 - \nu) - 2E'\nu'^2}$$

$$c_{44} = G'; \quad 2c_{66} = c_{11} - c_{12}$$

На основе теории усреднения имеем:

$$E = \left(\frac{k_1(1 - \nu_1^2)}{E_1} + \frac{k_2(1 - \nu_2^2)}{E_2} + \frac{\nu'^2}{E'} \right)^{-1}$$

$$\nu = E \left(\frac{k_1(\nu_1 - \nu_1^2)}{E_1} + \frac{k_2(\nu_2 - \nu_2^2)}{E_2} + \frac{\nu'^2}{E'} \right)$$

$$E = \left(\frac{2k_1(1 + \nu_1^2)}{E_1} + \frac{2k_2(1 + \nu_2^2)}{E_2} \right)^{-1}$$

$$E' = k_1 E_1 + k_2 E_2, \quad \nu' = k_1 \nu_1 + k_2 \nu_2, \quad k_1 + k_2 = 1$$

где k_1, k_2 — концентрации по сечению, перпендикулярному e_3 , несущих элементов и заполнителя соответственно.

В результате перехода от базиса e_j к базису e_i' получаем соотношения обобщенного закона Гука в винтовой системе координат [5].

Компоненты тензора деформаций в базисе винтовой системы координат выражаются через смещения следующими соотношениями

$$e_{rr} = \partial_r u_r, \quad e_{\theta\theta} = (u_r + \partial_\theta u_\theta)/r, \quad e_{zz} = Du_z \quad (6)$$

$$2e_{r\theta} = \partial_r u_\theta + \frac{\partial_\theta u_r - u_\theta}{r}, \quad 2e_{z\theta} = \partial_\theta u_z/r + Du_\theta \quad 2e_{rz} = \partial_r u_z + Du_r$$

Используя уравнения равновесия в напряжениях и соотношения закона Гука, получим систему дифференциальных уравнений относительно компонент вектора смещений

$\mathbf{u} = [u_r, u_\theta, u_z]^T$, которую вместе с условием отсутствия напряжений на боковой поверхности символически запишем в виде:

$$L(\partial)\mathbf{u} = 0, \quad \partial = \frac{\partial}{\partial z} \quad (7)$$

Если отыскивать решение в виде

$$\mathbf{u} = \mathbf{a}(r, \theta)e^{i\lambda z} \quad (8)$$

После подстановки (8) в (7) получим спектральную задачу на сечении

$$L(i\lambda)\mathbf{a} = 0$$

Оператор L имеет бесконечное множество собственных значений (СЗ), среди которых $\lambda_0 = 0, \lambda_1^\pm = \pm\tau$ — четырехкратные. Линейные комбинации из собственных и присоединенных векторов этих СЗ определяют решение Сен-Венана задач растяжения-кручения, чистого изгиба и изгиба поперечными силами. Остальные СЗ — комплексные и симметрично расположены в комплексной плоскости. Эти свойства позволяют решение Сен-Венана представить в виде:

$$\mathbf{u} = \sum_{n=1}^{12} C_n \mathbf{u}_n$$

где C_n — произвольные постоянные, которые определяются при удовлетворении граничным условиям на торцах цилиндра $z = 0, l$, \mathbf{u}_n — элементарные решения Сен-Венана.

2. Матрица жесткостей каната. Для каната построение решений Сен-Венана задач растяжения и кручения в конечном итоге приводит к следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} 2\pi \int_0^a \sigma_{zz} r dr &= d_{11} C_1 + d_{12} C_2 = P_z \\ 2\pi \int_0^a \sigma_{z\theta} r^2 dr &= d_{12} C_1 + d_{22} C_2 = M_z \end{aligned} \quad (9)$$

где P_z, M_z — проекции главного вектора и главного момента напряжений, действующих в поперечном сечении, $C_1 = \varepsilon, C_2 = \varphi$ — произвольные постоянные, первую из которых можно интерпретировать как относительное удлинение оси каната и относительный угол его поперечного сечения:

$$\begin{aligned} d_{11} &= \frac{\pi a^2 E \ln(1 + kt_1^2)}{t_1 k} \\ d_{12} = d_{21} &= \frac{1}{2} \frac{\pi a^3 E' (kt_1^2 - \ln(1 + kt_1^2))}{t_1^2 k^2} \\ d_{22} &= \frac{1}{2} \frac{\pi a^4 E' (kt_1^2 - \ln(1 + kt_1^2))}{t_1^3 k^2} \\ t &= \tan(\alpha), \quad t_1 = \tan(\beta), \quad \beta = \tau a \\ k &= \frac{1 + \nu_1}{2} = \frac{E'}{4G'}, \quad r = \frac{at}{t_1} \end{aligned}$$

Библиографический список:

1. Глушко М. Ф. Стальные подъемные канаты. // Киев. Техника. 1966, 323 с.
2. Динник А. Н. Статьи по горному делу. // Углетехиздат СССР. 1957, 202 с.
3. Thwaites J. J. Elastic deformation of rod with helical anisotropy. // Int. J. Mech. Sci. 1977. v.19. №4 3. 161-169.
4. Мусалимов В. М., Мокряк В. М. О некоторых задачах для спирально-изотропной среды. в сб. "МСС". // Изд. ТГУ. Томск. 1983. С. 88-96.
5. Гетман И.П., Устинов Ю.А. О методах расчета канатов. Задача растяжения-сжатия. // ПММ, т. 72. Вып.1, 208, с. 81-90.
6. Лехницкий С. Г. Теория упругости анизотропного тела. // М.:Наука. 1977. 416 с.

Bibliography:

1. Glushko M. F. Steel lifting cables. // Kiev. Technika. 1966, 323 p.
2. Dinnik A.N. Papers on mining engineering. // Ugletekhizdat USSR. 1957, 202 p.
3. Thwaites J. J. Elastic deformation of rod with helical anisotropy. // Int. J. Mech. Sci. 1977. v.19. №4 3. 161-169.
4. Musalimov V.M., Mokryak V.M. On some problems for spiral-isotropic medium, in "MSS". // TSU Publ. Tomsk. 1983. pp. 88-96.
5. Getman I.P., Ustinov Yu.A. On methods of cables calculating. A tension-compression problem // PMM, Vol. 72. Issue.1, 208, pp. 81-90.
6. Lekhnitsky S.G. Theory of elasticity of anisotropic body. // M.: Nauka. 1977. 416 p.

УДК 539.3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА НЕОДНОРОДНЫХ ОСНОВАНИЙ*

М.И. Чебаков^{1,2}, С.А. Данильченко^{1,2}, А.А. Ляпин¹

¹Южный федеральный университет, ²Ростовский государственный университет путей сообщения

Введение. Износ компонентов узла трения является решающим фактором, влияющим на срок его службы. Поэтому прогнозирование износа представляется важной задачей машиностроения. В литературе описано достаточно много различных моделей износа. Их математические выражения варьируются от простых эмпирических соотношений до сложных уравнений, опирающихся на физические понятия и определения. Параметры и переменные, используемые в них, часто действительны только для конкретных случаев. В русскоязычной литературе представлены работы Галина Л.А., Горячевой И.Г., Александрова В.М., Комогорцева В.Ф. и др., описывающие контактные задачи о движении штампа при наличии износа в различных постановках (см. работы [1-4] и др.).

В представляемой статье рассмотрена контактная задача об изнашивании упругого неоднородного основания конечных размеров под воздействием движущегося жесткого штампа. Представлены результаты расчетов величины износа при различных параметрах изнашивания и нескольких вариантах неоднородности: наличие тонкого приповерхностного слоя; модуль упругости основания изменяется по глубине согласно линейному закону. Расчеты производились с помощью метода конечных элементов и программного комплекса ANSYS. Проведено сравнение с аналитическим решением контактной задачи с учетом износа для относительно тонкого бесконечного слоя.

Постановка задачи. Упругий неоднородный блок ($-b \leq x \leq b$; $0 \leq y \leq h_1$; $-L_1/2 \leq z \leq L_1/2$) закреплен по основанию $y = 0$. На границу $y = h_1$ действует жесткий штамп ($-a \leq x \leq a$; $h_1 \leq y \leq h_2$; $-L_2/2 \leq z \leq L_2/2$), с основанием, совпадающим с границей $y = h_1$, и нагруженный нормальным усилием P (рис. 1). Боковые грани и поверхность блока, не взаимодействующая со штампом, свободны от напряжений. Штамп совершает возвратно – поступательные движения вдоль направляющей Oz с постоянным модулем скорости V . При этом между штампом и блоком учитывается трение, подчиняющееся закону Кулона, с коэффициентом k .

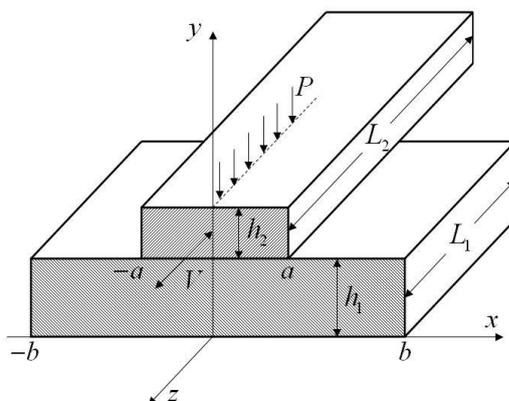


Рис. 1 Схема задачи

* Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10467) проекта РФФИ № 16-08-00852

Будем считать, что на поверхности блока в области контакта со штампом возникает износ, при этом сам штамп не изнашивается.

Решение задачи. Для решения данной задачи был использован метод конечных элементов и специальный программный комплекс ANSYS. Для улучшения сходимости алгоритма расчета задачи и сокращения времени вычислений, решение осуществлялось в два этапа. На первом этапе решалась статическая контактная задача теории упругости о вдавливании жесткого штампа в упругое основание. На втором этапе – нестационарная задача скольжения штампа по поверхности основания с учетом трения и износа. Скорость износа рассчитывалась согласно модели Аркарда [5]:

$$\bar{w} = \frac{K}{H} V_{rel}^n p^m,$$

где K - коэффициент износа, H - твердость материала, V_{rel} - относительная скорость скольжения, p - контактное давление, n, m - положительные числа.

Конечно – элементная сетка строилась с использованием 20-узловых упругих элементов SOLID186. С помощью специальных макросов APDL ANSYS было обеспечено присвоение этим элементам различных постоянных значений модуля Юнга.

Для моделирования контактного взаимодействия между поверхностью основания и штампом создавалась контактная пара, определяемая элементами CONTA174 и TARGE170. Контактный элемент CONTA174 покрывал границу $y = h_1$, а ответные элементы TARGE170 задавались как недеформируемая поверхность плоской формы, соответствующая основанию штампа.

Для решения нестационарной задачи были установлены минимальное и максимальное количество подшагов, максимальное количество итераций для каждого подшага, а также установлены параметры, позволяющие пакету определять оптимальный шаг по времени при расчетах.

Результаты. Численные расчеты производились для двух типов задач: 1 – блок состоял из двух слоев материалов, обладающих различными физико – механическими характеристиками; 2 – блок выполнен из материала, обладающего градиентными свойствами. В обоих случаях использовались одинаковые геометрические параметры блока и штампа, а также скорость, время движения, нагрузка и коэффициент трения. Так, длина блока $L_1 = 0.3$ м, ширина блока $2b = 0.4$ м, толщина $h_1 = 0.05$ м, длина штампа $L_2 = 0.6$ м, ширина $2a = 0.2$ м. Скорость движения штампа $V = 0.15$ м/с, величина вдавливающей силы $P = 0.2$ МН, коэффициент трения $k = 0.05$. Время одного цикла движения штампа «туда - обратно» составляло 1 с, общее время движения $t = 10$ с (10 циклов). Соотношение K/H также считалось постоянным и равнялось $K/H = 0.5 \cdot 10^{-13}$.

В первом варианте задачи нижнему слою ($-b \leq x \leq b$; $0 \leq y \leq h_1 - h_{cl}$; $-L_1/2 \leq z \leq L_1/2$) в этом случае присваивались постоянные значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона равные $E_{осн} = 2 \cdot 10^5$ МПа и $\nu_{осн} = 0.3$. Для верхнего слоя соответствующие параметры имели значения $E_{cl} = 5 \cdot 10^5$ МПа и $\nu_{осн} = 0.33$. Был произведен расчет данной задачи при различных значениях толщины верхнего слоя h_{cl} . Показатели m и n брались равными 1. В таблице 1 приведены значения максимальных величин износа и контактного давления.

Таблица 1. Результаты расчета задачи 1 при различной толщине приповерхностного слоя

Толщина слоя $h_{cl}, 10^{-3}$ м	Величина износа $\delta_{max}, 10^{-6}$ м	Контактное давление $q_{max}, МПа$
0.1	0.256	2.840
0.5	0.255	2.843
1	0.254	2.846

Из таблицы следует, что при увеличении толщины приповерхностного слоя величина износа незначительно уменьшалась, а контактное давление наоборот увеличивалось.

Далее был произведен ряд расчетов при различных значениях показателей m и n . Полученные результаты свидетельствуют о том, что значение степени при контактном давлении (m) оказывает большее влияние на величину износа, чем значение степени при скорости скольжения (n). На рисунках 2 и 3 приведены графики результатов для слоя толщиной $h_{ст} = 0.1 \cdot 10^{-3}$ м.

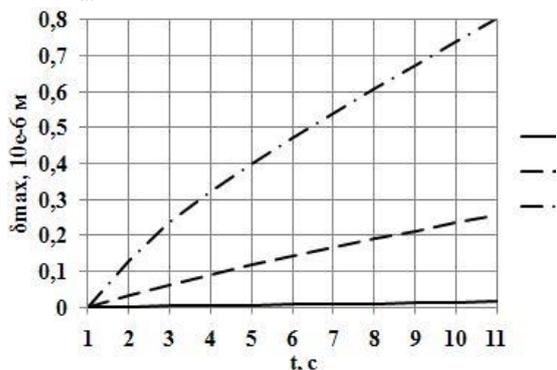


Рис. 2 Величина износа при различных m , $n = 1$

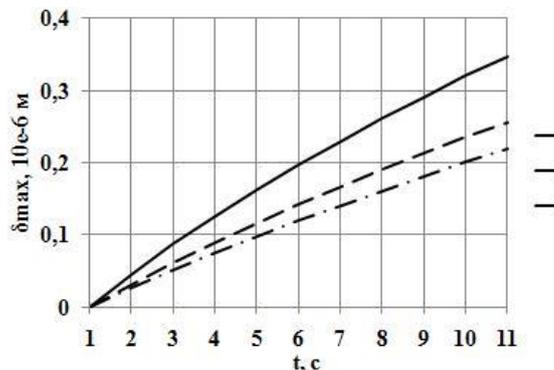


Рис. 3 Величина износа при различных n , $m = 1$

В задаче 2 моделировалось изменение модуля Юнга по глубине по зависимости $E_y / E_1 = f(y)$, где $f(y) = 2.5 + 1.5y / h_1$ - закон изменения модуля Юнга по толщине h_1 . Для этого был записан специальный макрос APDL ANSYS, который обеспечивал формирование конечных элементов с различными постоянными значениями модуля Юнга, равными значениям функции $f(y)$ в центральных точках элементов. Коэффициент Пуассона всюду считался постоянным и равным $\nu_1 = 0.3$, $E_1 = 2 \cdot 10^5$ МПа, $m=1$, $n=1$. Результаты расчета величины износа и контактных давлений при различных значениях коэффициента трения представлены на рисунках 4 и 5.

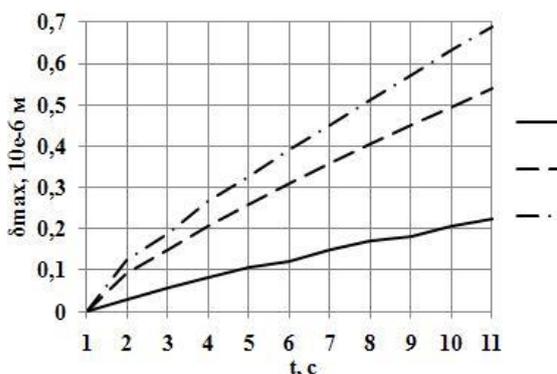


Рис. 4 Величина износа при различных значения k

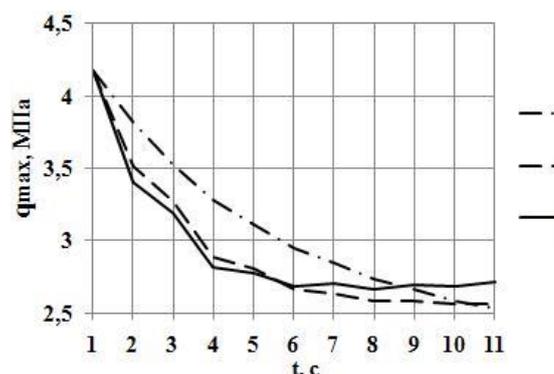


Рис. 5 Значения контактных давлений при различных значения k

Для оценки точности конечно-элементных расчетов и выбора параметров проведено сравнение результатов для случая, когда блок состоит из однородного материала и $h_1 / a \ll 1$. Аналитическое решение для бесконечного тонкого слоя относительно малой толщины описано в [6]. Согласно [6] для случая, когда штамп плоский, величина износа δ и контактное давление q определяются из следующих соотношений:

$$\delta(t) = \frac{\alpha Pt}{2a}, \quad q(x,t) = \frac{P}{2a}, \quad \alpha = lkV.$$

Результаты расчетов при различных значениях параметров скорости, коэффициента трения и нагрузки приведены в таблице 2, где через $\varepsilon(\xi) = 100|\xi - \xi_A|/\xi_A$ обозначается относительная погрешность в процентах для величин δ и q . $h_1 = 0.005 \text{ м}$, $t = 10 \text{ с}$. Как видно из таблицы погрешность $\varepsilon(\xi) \leq 3\%$, что свидетельствует о достаточно высокой точности результатов, полученных с помощью построенной модели. Необходимо отметить, что такое согласование достигается при $lk = K/H$.

Таблица 2. Результаты расчетов параметров скорости, коэффициента трения и нагрузки

$V, \text{ м/с}$	k	$P, \text{ МН}$	$\varepsilon(\delta)$	$\varepsilon(q)$
0.05	0.05	0.2	1.80	3.01
0.05	0.1	0.2	1.65	3.01
0.05	0.2	0.2	2.03	3.01
0.1	0.05	0.2	1.65	3.01
0.15	0.05	0.2	2	3.01
0.05	0.05	0.1	1.20	2.55
0.05	0.05	0.4	1.65	2.62

Выводы. Результаты расчетов показали, что увеличение упругих характеристик материала вблизи области контакта приводит к снижению величины износа. При этом толщина такого слоя незначительно влияет на результат.

Варьирование различных входных параметров привело к вполне ожидаемым результатам. Увеличение параметров скорости, нагрузки, коэффициента трения приводило к увеличению износа.

Проведенное сравнение с аналитическим решением контактной задачи с учетом износа для относительно тонкого слоя позволяет сделать вывод о том, что метод конечных элементов с использованием пакета ANSYS для этой задачи оказался весьма эффективным и дает возможность проводить исследования для различных значений входных геометрических и физико - механических параметров.

Постановка задачи, написание программы и макроса APDL ANSYS, моделирование и расчеты методом конечных элементов выполнены М.И. Чебаковым и С.А. Данильченко за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10467) в Ростовском государственном университете путей сообщения. Расчеты выполнены А.А. Ляпиным при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 16-08-00852 в Южном федеральном университете.

Библиографический список:

1. Александров В.М., Галин Л.А., Пириев Н.П. Плоская контактная задача при наличии износа для упругого слоя большой толщины // Изв. АН СССР. МТТ. - 1978. - № 4. - С. 60-67.
2. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости при наличии износа // ПММ. - 1976. Т. 40. Вып. 6. - С. 981-986.
3. Горячева И.Г., Добычин М.Н. Контактные задачи в трибологии. - М: Машиностроение, 1988. - 254 с.
4. Комогорцев В.Ф. Контакт движущегося штампа с упругой полуплоскостью при наличии ее износа // ПММ. - 1985. Т. 49. Вып. 2. - С. 321-325.
5. J.F. Archard Contact and rubbing of flat surfaces // Journal of Applied Physics. - Vol. 24.1. - 1953. - P.18-28.
6. Александров В.М., Чебаков М.И. Введение в механику контактных взаимодействий. - Ростов-на-Дону: ООО «ЦВВР», 2007. - 114 с.

Bibliography:

1. **Alexandrov V.M., Galin L.A., Piriev N.P.** Plane contact problem with wear for the elastic layer of large thickness. *Izvestiya AS USSR. MTT*, 1978, No. 4, p. 60-67.
2. **Galín L.A.** Contact problems of the elastic theory with wear. *PMM*, 1976, Vol. 40 Is. 6, p. 981-986.
3. **Goryacheva I.G., Dobychin M.N.** Contact problems in tribology. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 254 p.
4. **Komogorcev V.F.** Contact a moving stamp with elastic half-plane in the presence of her wear. *PMM*, 1985, Vol. 49 Is. 2, p. 321-325. J.F. Archard Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*. Vol. 24.1, 1953, p. 18-28.
5. **Alexandrov V.M., Chebakov M.I.** Introduction to contact mechanics. Publishing OOO «CVVR», 2007, 114 p.

УДК 621.2.082.18

ИЗНАШИВАНИЕ НАНОНЕРОВНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

Суслов А.Г., Шалыгин М.Г.

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Существующие методики оценки интенсивности изнашивания трущихся поверхностей, зачастую, не учитывают наличие на поверхностях нанонеровностей (субшероховатости), размеры которых по высоте не превышают 100 нм. В то же время, установлено, что контакт трущихся поверхностей в начальный период трения осуществляется лишь по трем точкам контакта шероховатых поверхностей. Явление субшероховатости принято объяснять с точки зрения наличия дефектов в кристаллической решетке (зерне) материала, как объемных, таких как дислокации, дисклинации, двойникование, так и точечных – вакансии, замещение. При исследовании субшероховатости с точки зрения зернистости материала в первую очередь следует учитывать его микроструктуру. В работах [1, 2] установлено, что субшероховатость слабо зависит от вида механической обработки и имеет достаточно сильную корреляцию с зернистостью материала. Принято считать, что износ поверхностей трения происходит в следствие совместного воздействия молекулярной и деформационной составляющих [3].

Очевидно, что в процессе трения и изнашивания будет меняться характер контактного взаимодействия поверхностей. Принимая за основу предложенную в работе А.Г. Суслова [4] физическую картину контактного взаимодействия деталей машин при трении и изнашивании предположим, что смещение поверхностей перед каждым новым приложением нагрузки будет вызывать упругие и пластические деформации или срез ранее не контактирующих поверхностей. Согласно [5] после многократных смещений и повторных приложений нагрузки все большая часть неровностей будет деформироваться упруго, и все меньшая их часть будет иметь пластический характер деформаций. В этой же работе автор указывает, что многократное приложение нормальных и касательных нагрузок приводит к усталостному разрушению и образованию новых неровностей. Следовательно, можно сделать вывод, что непрерывное образование новых неровностей при изнашивании поверхностей вызывает упругие, пластические деформации или же срез вновь образовавшихся выступов, что также будет происходить и на уровне субшероховатости материала.

В соответствии с теорией И.В. Крагельского [3] износ поверхностей трения определяется усталостным изнашиванием. Примем, что на уровне субшероховатости износ контактирующих поверхностей также обусловлен усталостными свойствами. Тогда, удельный износ определяется как

$$u = u_{пл} + u_{упр} + u_{ср},$$

$$u_{пл} = \frac{V_{деф.пл}}{A_r L_{пл}},$$

$$u_{упр} = \frac{V_{деф.упр}}{A_r L_{упр}},$$

$$u_{ср} = \frac{V_{деф.ср}}{A_r L_{ср}},$$

где $V_{деф.пл}$, $V_{деф.упр}$, $V_{деф.ср}$ - объем деформируемого материала при пластическом, упругом контакте и при срезе; A_r - площадь фактического касания; $L_{ср}$ - путь трения.

Объем деформируемого материала при упругом, пластическом контакте или срезе определяется как сумма объемов деформируемых выступов на число циклов до разрушения, тогда как суммарный объем деформируемых выступов определяется как объем единичного деформируемого выступа $V_{деф.в}$ на число взаимодействующих выступов $n_{вз}$. Число циклов до разрушения материала при резании $n_{у.ср} = 1$, при пластической деформации можно определить из работы [6].

Выступы субшероховатости претерпевают как упругие, так и пластические деформации. При этом часть из них также подвергается срезу. Число взаимодействий субшероховатости поверхности с контртелом можно определить, как отношение среднего распределение зерен мартенсита на поверхности детали и относительное сближение трущихся поверхностей. Размер зерен (игл) мартенсита никогда не превосходит исходного зерна аустенита. Среднее распределение зерен мартенсита на поверхности в первом приближении можно рассчитать как отношение числа зерен мартенсита k_M на площади зерна аустенита к этой площади S_3 .

Относительное сближение определим, как отношение абсолютного сближения на наибольший выступ субшероховатости. Абсолютное сближение будет равным разности наибольшего выступа субшероховатости и глубины внедрения выступа в контртело. При этом, на практике, наибольший выступ субшероховатости не будет превышать наибольшего размера кристалла мартенсита. В связи с тем, что, к примеру, кристалл мартенситной стали имеет тетрагональную объемно-центрированную сингонию, наибольший размер зерна мартенсита будет меньше или равен диагонали зерна. Тогда абсолютное сближение определяется как разность диагонали кристалла $l_{д.кр}$ и глубины внедрения выступа субшероховатости в контртело. Таким образом, число взаимодействий выступов субшероховатости с контртелом для пластического контакта

$$n_{вз.пл} = \frac{k_M l_{д.кр}}{S_3 h_{вн.пл}},$$

для упругого контакта

$$n_{вз.упр} = \frac{k_M l_{д.кр}}{S_3 h_{вн.упр}},$$

число взаимодействий выступов субшероховатости подверженных срезу

$$n_{вз.ср} = \frac{k_M l_{д.кр}}{S_3 h_{вн.ср}}.$$

Здесь k_M - среднее число зерен мартенсита; S_3 - площадь зерна аустенита; $l_{д.кр}$ - длина диагонали кристалла; $h_{вн.пл}$, $h_{вн.упр}$, $h_{вн.ср}$ - глубина внедрения при пластической, упругой

деформации и срезе. Объем фактически деформируемого материала зависит от геометрии контактирующей поверхности, нагрузки и реакции опоры и равнее при пластической деформации

$$V_{\phi.пл} = \pi \frac{\tau_{сдв} abh_{\phi.пл}^2}{4\sigma_{\phi.p} R_p^2} \left(2R_p - \frac{h_{\phi.пл}}{3}\right),$$

при упругой деформации

$$V_{\phi.упр} = \pi \frac{\sigma_n abh_{\phi.упр}^2}{4\sigma_{\phi.p} R_p^2} \left(2R_p - \frac{h_{\phi.упр}}{3}\right),$$

где σ_n - нормальная нагрузка; $\sigma_{\phi.p}$ – предел прочности; σ_T – предел текучести; $\tau_{сдв}$ – напряжение сдвига; a, b - наименьший и наибольший диаметры пятна контакта субшероховатости с контртелом; R_p - максимальная высота неровностей субшероховатости.

Так как при микрорезании число циклов до разрушения равно единицы, то объем деформируемого материала будет зависеть только от геометрии поверхности и от глубины внедрения субшероховатости в контртело

$$V_{\phi.ср} = \pi \frac{abh_{\phi.ср}^2}{4R_p^2} \left(2R_p - \frac{h_{\phi.ср}}{3}\right).$$

Молекулярную составляющую износа принято описывать с точки зрения адгезионной теории. Существующие методики расчета адгезии основаны на моделях парного взаимодействия молекул. Так модель Джонсона-Кендалла-Робертса (ДКР) [7] определяет адгезию как изменение поверхностной энергии только в зоне контакта двух тел. Модель предложенная Фуллером и Тейбором [8], основанная на модели Дерягина-Муллера-Топорова (ДМТ) [9] учитывает взаимодействие молекул вне контакта. Модель Арчарда [10] не учитывает влияние на износ микрогеометрии контакта. Большой вклад в расчет характеристик адгезионного контакта с учетом микро- и нанорельефа поверхности внес В.В. Измайлов [11]. Предположим, что в процессе трения, в зоне действия пластических деформаций, под действием избыточных давлений пленки окислов разрушаются и происходит непосредственный контакт трущихся материалов (рис. 1) [12].

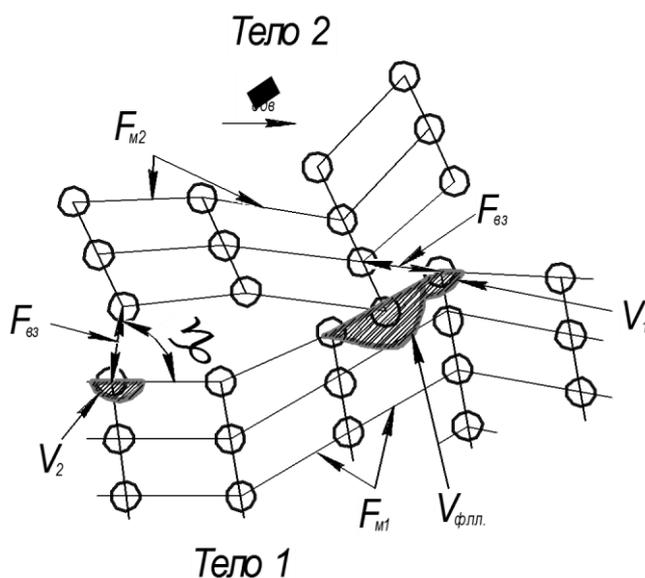


Рис. 1. Схема деформационно-адгезионного износа

Адгезионное взаимодействие является сложной функцией потенциальной и поверхностной энергий, геометрии тел, расстояния осуществления адгезии, сил притяжения и отталкивания тела и контртела. На границе двух фаз находятся некомпенсированные связи,

которые направлены в сторону менее плотной среды. Эти связи испытывают избыточное силовое воздействие со стороны частиц твердого тела, которое стремится втянуть частицы поверхностного слоя внутрь более плотной среды. В общем случае силу адгезии можно описать как функцию зависимости сил притяжения и отталкивания некомпенсированных связей тела и контртела

$$F_{\text{вз}} = f[(F_{\text{пр.т}} + F_{\text{пр.к}}) > (F_{\text{отт.т}} + F_{\text{отт.к}})].$$

Адгезия обусловлена различного типа взаимодействиями, наиболее универсальными и часто встречающимися из которых являются силы дисперсионного взаимодействия или силы Лондона. Согласно силам Лондона, энергия связи обратно пропорциональна шестой степени расстояния между диполями. Тогда силу адгезионного взаимодействия можно записать

$$F_{\text{вз}} = \frac{A_H W^2}{z_0^2 \nu_1 \nu_2}, \quad (1)$$

где A_H - константа Гамакера; ν_1, ν_2 - число некомпенсированных связей тела и контртела; W - число некомпенсированных связей молекулы, образовавших адгезионную связь; z_0 – компенсированное расстояние на котором энергия взаимодействия равна нулю $F_{\text{прит}} = F_{\text{отт}}$.

Адгезионное взаимодействие осуществимо, когда свободная молекулярная связь активирована, поэтому в выражении (1) константа Гамакера по своей сути характеризует энергию активации адгезии. Исходя из кристаллической решетки, к примеру мартенсита, некомпенсированными связями у единичной молекулы, находящейся на границе раздела фаз являются $k \approx 5$ связей. Компенсированное расстояние z_0 в реальных условиях является постоянно изменяющейся функцией, зависящей от частоты собственных колебаний молекул и других параметров.

Адгезионный износ осуществим в случае когда сила взаимодействия молекул контртела $F_{\text{вз.к}}$ больше силы адгезионного взаимодействия $F_{\text{вз}}$ и силы взаимодействия молекул тела $F_{\text{вз.т}}$, то есть $F_{\text{вз.к}} > F_{\text{вз}} > F_{\text{вз.т}}$. Приведенное неравенство по своей сути является необходимым условием осуществление адгезионного износа тела или контртела. Проведя простейшие преобразования неравенства получим параметр

$$A = \frac{F_{\text{вз}} - F_{\text{вз.т}}}{F_{\text{вз.к}}}. \quad (2)$$

При значениях параметра $A \leq 0$ будет осуществляться адгезионный износ контртела, при $A > 0$ – адгезионный износ тела. В некоторых случаях, когда $F_{\text{вз}} > F_{\text{вз.т}}$ и $F_{\text{вз}} > F_{\text{вз.к}}$ возможен как износ тела, так и контртела.

Сила взаимодействия молекул твердых тел зависит от числа связей единичной молекулы, находящейся на границе раздела фаз, и силы межмолекулярного взаимодействия каждой из этих связей, направленных в сторону от поверхности.

$$F_{\text{вз.т}} = k_m F_{\text{вз.т.м}}, \quad (3)$$

$$F_{\text{вз.к}} = k_k F_{\text{вз.к.к}}, \quad (4)$$

где k_m, k_k - число связей тела и контртела; $F_{\text{вз.т.м}}, F_{\text{вз.к.к}}$ - сила взаимодействия единичной молекулы тела и контртела.

Здесь под числом связей понимается число соседних молекул, оказывающих воздействие на молекулу образовавшую адгезионную связь. Для кристаллических тел число связей можно определить по их сингонии, по форме и размерам кристаллической решетки.

Так как молекулы тела стремятся занять положение, соответствующее ее минимуму их потенциальной энергии, то сила взаимодействия единичной молекулы можно описать простой векторной зависимостью сил притяжения и отталкивания. Полученная сила после преобразования в энергию взаимодействия полностью совпадает с энергией взаимодействия Леннард-Джонса.

Адгезионный износ в первом приближении можно определить как износ осуществляемый под действием напряжения сдвига $\tau_{сдв}$ на поверхности характеризуемой геометрией χ_a отнесенное к параметру характеризующему условие осуществление адгезионного износа A на число этих параметров $n_{адз}$

$$m = \frac{\tau_{сдв}\chi_a}{n_{адз}A}, \quad (5)$$

где $\tau_{сдв}$ - напряжение сдвига; $n_{адз}$ – число адгезионных связей (число систем A); χ_a – параметр, характеризующий геометрию адгезионного вырыва.

После подстановки зависимостей (2), (3), (4) в выражение (5) и приняв, что контртело не оказывает воздействие на систему и сила адгезии не зависит от числа некомпенсированных связей образовавших адгезионную, тогда

$$m = \frac{\tau_{сдв}\chi_a}{(F_{вз} - k_m F_{вз.м.м})n_{адз}}.$$

Атомы кристаллических решеток сопряженных поверхностей расположенные близко к зоне пластических деформаций и образовавшие молекулярную связь могут привести к увеличению отделяемого объема V_1 в процессе изнашивания. Возможны случаи, когда неровности трущихся поверхностей оказываются на некотором расстоянии друг от друга, достаточном, чтобы между ними образовалась молекулярная связь и при этом на некотором удалении от зоны фактического контакта. В этом случае также возможно увеличение отделяемого объема V_2 при износе. Изнашивание в следствие разрыва молекулярных связей, образовавшихся между трущимися телами, и отделение части объема тела принято называть адгезионным износом. В таком случае объем отделяемый при адгезионном износе, если такой произошел [13], можно определить из формы и характеристик кристаллической решетки, а также физико-механических свойств зерен материала.

Предположим, что при разрыве такой связи произошел износ тела 1 (рис. 1), тогда требуется определить объем V_a отделяемый при разрыве. Примем, что тело 2 обладает максимально возможной силой межмолекулярного взаимодействия $F_{м.2} \Rightarrow \max$ и адгезионный износ данного тела не происходит. Предположим, что объем отделяемый при адгезионном износе определяется силой взаимодействия атомов $F_{м.1}$ в теле 1. Стальные детали, имеющие мартенситную структуру, обладают тетрагональной объемноцентрированной сингонией. Каждый атом в решетке взаимодействует со всеми соседними атомами. Учитывая, что решетка имеет четкую структуру можно предположить, что сопротивление отделению объемов тела при адгезионном изнашивании оказывается по векторам, направленным от атома, образовавшего адгезионную связь, вдоль соседних атомов и чья сила межмолекулярного взаимодействия $F_{м.1}$ меньше силы адгезионной связи $F_{вз}$. Тогда, зная направления и длины векторов, можно определить объем фигуры, ограниченной векторами l_i (рис. 2).

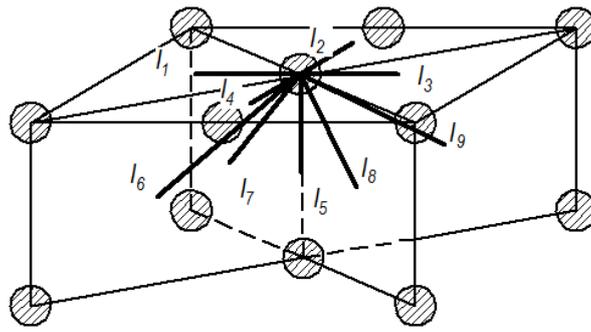


Рис. 2. Направление векторов сопротивления адгезионному вырыву

Очевидно, что векторы, расположенные на поверхности (границе двух фаз) имеют меньшее число соседних атомов, чем векторы, направленные от поверхности вглубь тела. Учитывая, что реальные поверхности имеют неровности, такие как шероховатость и субшероховатость, адгезионная связь $F_{э3}$ образуется на поверхностях, расположенных по отношению друг к другу под некоторым углом γ . Следовательно, величина угла γ будет влиять на длину вектора l_i , так как атомы тела расположенный ближе к вершине неровности легче поддадутся отрыву. Кроме того, атомы тела, расположенные ближе к вершине, имеют большую вероятность образовать адгезионную связь с контртелом.

Атом находящейся внутри объема тела взаимодействует с большим числом соседних атомов k_k , чем атомы расположенные на поверхности тела и имеющие определенное число некомпенсированных связей v_1 . Причем обще число возможных соседних атомов $k = k_k + v_1$ определяется из кристаллической решетки. Тогда выражение для расчета длин векторов l , расположенных на поверхности

$$l_i = \left| \frac{F_{э3}}{F_M G} \operatorname{tg}(F_{э3}, F_M) \right|$$

В то же время, выражение для расчета длин векторов направленных от поверхности в глубину тела должно учитывать большое число соседних атомов

$$l_i = \left| \frac{v_1 F_{э3}}{k F_M G} \operatorname{tg}(F_{э3}, F_M) \right|,$$

где G – модуль сдвига; k – возможное число соседних атомов; $k_k = k - v_1$ – реальное число соседних атомов.

Тогда, для мартенситной стали, объем фигуры ограниченной векторами можно определяется по выражению

$$V_a = \frac{1}{6\sqrt{2}} [(l_2 + l_4)(l_1 l_6 + l_3 l_8) + \frac{1}{12} (l_7 (l_5 + l_2)(l_6 + l_8) + l_9 (l_4 + l_5)(l_6 + l_8))].$$

В целом, объем фигуры ограниченной векторами, равен параметру характеризующему геометрию поверхности $\chi_a = V_a$. Таким образом, усталостную и адгезионную составляющие износа на уровне субшероховатости можно определить исходя из зернистости материала, геометрии поверхности и физико-механических свойств материала. При этом все данные необходимые для проведения расчета можно получить существующими, широко применяющимися методами.

Библиографический список:

1. Сулов А.Г., Шалыгин М.Г., Кузнецов С.В. Исследование поверхностей с различной механической обработкой на уровне субшероховатости // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2015. – № 9. – С. 45-47.

2. **Сулов А.Г., Порошин В.В., Шалыгин М.Г., Кузнецов С.В.** Взаимосвязь нанонеровностей (субшероховатости поверхности деталей и зернистости материала) // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2015. – № 11. – С. 3-7.
3. **Крагельский И.В.** Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480с.
4. **Сулов А.Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 208с.
5. **Сулов А.Г.** К вопросу трения и изнашивания деталей машин // Трение и износ. 1990. – №5. С. – 801-807.
6. **Сулов А.Г., Богомолов Д.Ю., Шалыгин М.Г.** Усталостное изнашивание поверхностей трения на уровне субшероховатости // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. – №4. – С. 7-10.
7. **Johnson K.L., Kendall K., and Roberts A.D.** Surface Energy and the Contact of Elastic Solids // Proc. Roy. Soc. – 1971 (A324), no. 1558, 301-313
8. **Fuller K.N.G., Tabor D.** The effect of surface roughness on the adhesion of elastic solids // Proc. Roy. Soc. A345: 327-342, 1975
9. **Derjagin B.V., Muller V.M., and Toporov Yu.P** Effect of Contact Deformations on the Adhesion of Particles // Journal of Colloid and Interface Science. – 1975(53), 314-326.
10. **Archard, J.F.** (1953). "Contact and Rubbing of Flat Surface". J. Appl. Phys. 24 (8): 981–988.
11. **Измайлов, В.В.** Расчет характеристик дискретного адгезионного // Трение и износ. 2014. – №5. – С. 518-527.
12. **Шалыгин М.Г.** Моделирование изнашивания неровностей субшероховатости поверхностей трения // Строительные и дорожные машины. 2016. – №3. – С. 42-44.
13. **Сулов А.Г., Порошин В.В., Шалыгин М.Г.** Адгезионный износ поверхности трения на уровне субшероховатости // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. – №7. – С. 29-31.

Bibliography:

1. **Suslov A.G., Shalygin M.G., Kuzntsov S.V.** The study of surfaces with different mechanical treatment on the level of subroughness // Science intensive technologies in mechanical engineering. – 2015. no. 9, pp. 45-47.
2. **Suslov A.G., Poroshin V.V., Shalygin M.G., Kuzntsov S.V.** Correlation nanoroughness – subroughness the surface of detail and grain size of the material. // Science intensive technologies in mechanical engineering. – 2015. no. 11, pp. 3-7.
3. **Kragelskiy I.V.** Friction and wear. Moscow: Machinebuilding – 1968. p. 480.
4. **Suslov A.G.** Technological support of state parameters of the surface layer. Moscow: Machinebuilding – 1987. p. 280.
5. **Suslov A.G.** The question of friction and wear of machine parts // Friction and wear. – 1990. no. 5, pp. 801-807.
6. **Suslov A.G., Bogomolov D.Yu., Shalygin M.G.** Fatigue wear of the friction surfaces at the level of the surface subroughness. // Friction & lubrication in machines and mechanisms. – 2015. no. 4, pp. 7-10.
7. **Johnson K.L., Kendall K., and Roberts A.D.** Surface Energy and the Contact of Elastic Solids // Proc. Roy. Soc. – 1971 (A324), no. 1558, 301-313
8. **Fuller K.N.G., Tabor D.** The effect of surface roughness on the adhesion of elastic solids // Proc. Roy. Soc. A345: 327-342, 1975
9. **Derjagin B.V., Muller V.M., and Toporov Yu.P** Effect of Contact Deformations on the Adhesion of Particles // Journal of Colloid and Interface Science. – 1975(53), 314-326.
10. **Archard, J.F.** (1953). "Contact and Rubbing of Flat Surface". J. Appl. Phys. 24 (8): 981–988.
11. **Izmaylov V.V.** Calculation of the characteristics of the discrete adhesive contact // Friction and wear. – 2014. no. 5, pp. 518-527.

12. **Shalygin M.G.** Modeling of the wear subroughness of friction surfaces // Construction and road machines. – 2016. no. 3, pp. 42-44.

13. **Suslov A.G., Poroshin V.V., Shalygin M.G.** Adhesive wear of the friction surfaces at the level of subroughness // Friction & lubrication in machines and mechanisms. – 2015. no. 7, pp. 29-31.

УДК 539.3

УСТОЙЧИВОСТЬ УПРУГИХ ПЛИТ С ПОВЕРХНОСТНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ*

Д.Н. Шейдаков, И.Б. Михайлова

ФГБУН Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону, Россия

Вследствие развития современных технологий и появления новых материалов достаточно большую актуальность приобретает вопрос анализа устойчивости равновесия деформируемых тел с учетом различных поверхностных явлений. Для их моделирования, особенно в наномеханике, в последнее время получила развитие теория упругости с поверхностными напряжениями. В рамках этой теории помимо обычных напряжений, распределенных в объеме, учитываются еще и независимые поверхностные напряжения на границе тела или ее части, которые обобщают известное в гидромеханике скалярное поверхностное натяжение на случай твердых тел. Целью настоящего исследования является изучение потери устойчивости нелинейно-упругих прямоугольных плит с поверхностными напряжениями.

В рамках модели Гертгина–Мердока, которая с механической точки зрения эквивалентна деформируемому телу, на поверхности которого приклеена упругая мембрана, система уравнений статики нелинейно упругого тела с поверхностными напряжениями при отсутствии массовых сил состоит из уравнений равновесия

$$\mathring{\nabla} \cdot \mathbf{D} = 0 \tag{1}$$

условий равновесия на части поверхности тела Ω_s , где действуют поверхностные напряжения

$$\left(\mathbf{n} \cdot \mathbf{D} - \mathring{\nabla}_s \cdot \mathbf{D}_s \right) \Big|_{\Omega_s} = \mathbf{t} \tag{2}$$

уравнений состояния

$$\mathbf{D} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{C}, \quad \mathbf{P} = 2 \frac{\partial W(\mathbf{G})}{\partial \mathbf{G}}, \quad \mathbf{D}_s = \mathbf{P}_s \cdot \mathbf{C}_s, \quad \mathbf{P}_s = 2 \frac{\partial W_s(\mathbf{G}_s)}{\partial \mathbf{G}_s} \tag{3}$$

и геометрических соотношений

$$\mathbf{G} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{C}^T, \quad \mathbf{C} = \mathring{\nabla} \mathbf{R}, \quad \mathbf{G}_s = \mathbf{C}_s \cdot \mathbf{C}_s^T, \quad \mathbf{C}_s = \mathring{\nabla}_s \mathbf{R} \Big|_{\Omega_s} \tag{4}$$

Здесь \mathbf{D} и \mathbf{P} — тензора напряжений Пиолы и Кирхгофа, соответственно, $\mathring{\nabla}$ — трехмерный набла-оператор в лагранжевых координатах, $\mathring{\nabla}_s$ — поверхностный набла-оператор, \mathbf{D}_s и \mathbf{P}_s — тензора поверхностных напряжений типа Пиолы и типа Кирхгофа, \mathbf{n} —

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-08-00802-а).

единичный вектор нормали к поверхности недеформированного тела, \mathbf{t} — вектор поверхностной нагрузки, W и W_s — плотности объемной и поверхностной потенциальной энергии деформации, соответственно, \mathbf{G} и \mathbf{G}_s — меры деформации Коши–Грина в объеме и на поверхности, \mathbf{C} и \mathbf{C}_s — градиенты деформации, \mathbf{R} — радиус-вектор, определяющий положение частиц тела в деформированном состоянии.

С учетом (3), в случае изотропного тела для тензора напряжений Кирхгофа \mathbf{P} справедливы следующие соотношения:

$$\mathbf{P} = \sum_{k=1}^3 \chi_k \mathbf{d}_k \otimes \mathbf{d}_k, \quad \chi_k = 2 \frac{\partial W(G_1, G_2, G_3)}{\partial G_k} \quad (5)$$

где $G_k, \mathbf{d}_k (k=1, 2, 3)$ — собственные значения и собственные векторы меры деформации Коши–Грина \mathbf{G} :

$$\mathbf{G} = \sum_{k=1}^3 G_k \mathbf{d}_k \otimes \mathbf{d}_k \quad (6)$$

В тоже время, выражение тензора поверхностных напряжений типа Кирхгофа \mathbf{P}_s имеет вид:

$$\mathbf{P}_s = \kappa_1 \mathbf{E}_s + 2\kappa_2 \mathbf{G}_s, \quad \kappa_\alpha = 2 \frac{\partial W_s(j_1, j_2)}{\partial j_\alpha}, \quad \alpha = 1, 2; \quad j_1 = \text{tr} \mathbf{G}_s, \quad j_2 = \text{tr} \mathbf{G}_s^2 \quad (7)$$

Здесь j_1, j_2 — инварианты меры поверхностной деформации типа Коши–Грина \mathbf{G}_s , \mathbf{E} и $\mathbf{E}_s = \mathbf{E} - \mathbf{n} \otimes \mathbf{n}$ — трехмерный и поверхностный единичные тензора, соответственно.

Рассмотрим однородную прямоугольную плиту толщины $2h$ и со сторонами b_1 и b_2 . Будем полагать, что на ее верхней $\Omega_+(x_3 = h)$ и нижней $\Omega_-(x_3 = -h)$ лицевых поверхностях действуют поверхностные напряжения, т.е. $\Omega_s = \Omega_+ \cup \Omega_-$. В случае двухосного растяжения–сжатия плиты радиус-вектор \mathbf{R} определяется следующими соотношениями:

$$\mathbf{R} = \lambda_1 x_1 \mathbf{e}_1 + \lambda_2 x_2 \mathbf{e}_2 + \lambda_3 x_3 \mathbf{e}_3 \quad (8)$$

$$0 \leq x_\alpha \leq b_\alpha, \quad \alpha = 1, 2; \quad |x_3| \leq h$$

где x_1, x_2, x_3 — декартовы координаты в отсчетной конфигурации (лагранжевы координаты), $\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3\}$ — ортонормированный векторный базис декартовых координат, λ_1 и λ_2 — коэффициенты растяжения–сжатия вдоль осей x_1 и x_2 , соответственно, λ_3 — неизвестная величина, характеризующая толщинную деформацию плиты.

Согласно выражениям (4), (8), градиенты деформации в объеме и на поверхности равны:

$$\mathbf{C} = \sum_{k=1}^3 \lambda_k \mathbf{e}_k \otimes \mathbf{e}_k, \quad \mathbf{C}_\pm = \sum_{\alpha=1}^2 \lambda_\alpha \mathbf{e}_\alpha \otimes \mathbf{e}_\alpha \quad (9)$$

Здесь и далее индексами «+» и «-» отмечены поверхностные величины, относящиеся к верхней и нижней лицевым поверхностям прямоугольной плиты, соответственно.

Из соотношений (4), (9) получим выражения для соответствующих мер деформации Коши–Грина

$$\mathbf{G} = \sum_{k=1}^3 \lambda_k^2 \mathbf{e}_k \otimes \mathbf{e}_k, \quad \mathbf{G}_\pm = \sum_{\alpha=1}^2 \lambda_\alpha^2 \mathbf{e}_\alpha \otimes \mathbf{e}_\alpha \quad (10)$$

Очевидно, что в случае рассмотренной начальной деформации собственные вектора $\mathbf{d}_k (k=1, 2, 3)$ меры деформации Коши–Грина совпадают с векторным базисом декартовых координат, т.е. $\mathbf{d}_k = \mathbf{e}_k$, а собственные значения $G_k = \lambda_k^2$. Тогда, с учетом (5), (7), для тензоров напряжений Кирхгофа справедливы следующие соотношения:

$$\mathbf{P} = \sum_{k=1}^3 \chi_k \mathbf{e}_k \otimes \mathbf{e}_k, \quad \mathbf{P}_{\pm} = \sum_{\alpha=1}^2 (\kappa_1^{\pm} + 2\lambda_{\alpha}^2 \kappa_2^{\pm}) \mathbf{e}_{\alpha} \otimes \mathbf{e}_{\alpha} \quad (11)$$

Подставляя полученные выражения в (3) найдем представления тензора напряжений Пиолы \mathbf{D} и тензоров поверхностных напряжений типа Пиолы \mathbf{D}_{+} и \mathbf{D}_{-} в случае деформации двухосного растяжения–сжатия прямоугольной плиты

$$\mathbf{D} = \sum_{k=1}^3 \lambda_k \chi_k \mathbf{e}_k \otimes \mathbf{e}_k, \quad \mathbf{D}_{\pm} = \sum_{\alpha=1}^2 \lambda_{\alpha} (\kappa_1^{\pm} + 2\lambda_{\alpha}^2 \kappa_2^{\pm}) \mathbf{e}_{\alpha} \otimes \mathbf{e}_{\alpha} \quad (12)$$

Уравнения равновесия (1) с учетом (12) удовлетворяются автоматически, а условия равновесия (2) на лицевых поверхностях Ω_{+} и Ω_{-} при отсутствии поверхностных нагрузок запишутся следующим образом

$$\lambda_3 \chi_3 \Big|_{x_3 = \pm h} = 0 \quad (13)$$

Данные условия служат для отыскания неизвестной величины λ_3 при заданной плотности потенциальной энергии деформации W .

Предположим теперь, что помимо описанного выше состояния равновесия плиты с поверхностными напряжениями при тех же внешних нагрузках существует бесконечно близкое равновесное состояние, определяемое радиус-вектором $\tilde{\mathbf{R}} = \mathbf{R} + \eta \mathbf{v}$. Здесь η – малый параметр, \mathbf{v} — вектор добавочных перемещений.

Возмущенное состояние равновесия нелинейно упругого тела описывается уравнениями:

$$\mathring{\nabla} \cdot \mathbf{D}^{\bullet} = 0, \quad \mathbf{D}^{\bullet} = \left[\frac{d}{d\eta} \mathbf{D}(\mathbf{R} + \eta \mathbf{v}) \right]_{\eta=0} \quad (14)$$

$$\mathbf{D}^{\bullet} = \mathbf{P}^{\bullet} \cdot \mathbf{C} + \mathbf{P} \cdot \mathring{\nabla} \mathbf{v} \quad (15)$$

Здесь \mathbf{D}^{\bullet} и \mathbf{P}^{\bullet} — линеаризованные тензоры напряжений Пиолы и Кирхгофа, соответственно. Чтобы найти выражение последнего, проведем линеаризацию соотношений (5), (6)

$$\mathbf{P}^{\bullet} = \sum_{k=1}^3 (\chi_k^{\bullet} \mathbf{d}_k \otimes \mathbf{d}_k + \chi_k \mathbf{d}_k^{\bullet} \otimes \mathbf{d}_k + \chi_k \mathbf{d}_k \otimes \mathbf{d}_k^{\bullet}) \quad (16)$$

$$\mathbf{G}^{\bullet} = \sum_{k=1}^3 (G_k^{\bullet} \mathbf{d}_k \otimes \mathbf{d}_k + G_k \mathbf{d}_k^{\bullet} \otimes \mathbf{d}_k + G_k \mathbf{d}_k \otimes \mathbf{d}_k^{\bullet})$$

Учитывая, что векторы \mathbf{d}_k и \mathbf{d}_k^{\bullet} ($k = 1, 2, 3$) взаимноортогональны, т.е. $\mathbf{d}_k \cdot \mathbf{d}_k^{\bullet} = 0$, из (16) получим ($m = 1, 2, 3; k \neq m$)

$$\mathbf{d}_k \cdot \mathbf{P}^{\bullet} \cdot \mathbf{d}_k = \chi_k^{\bullet}, \quad \mathbf{d}_k \cdot \mathbf{P}^{\bullet} \cdot \mathbf{d}_m = \frac{\chi_k - \chi_m}{G_k - G_m} \mathbf{d}_k \cdot \mathbf{G}^{\bullet} \cdot \mathbf{d}_m \quad (17)$$

где соотношения для χ_k^{\bullet} имеют вид:

$$\chi_k^{\bullet} = \sum_{n=1}^3 \chi_{kn} G_n^{\bullet}, \quad \chi_{kn} = \frac{\partial \chi_k(G_1, G_2, G_3)}{\partial G_n}, \quad G_n^{\bullet} = \mathbf{d}_n \cdot \mathbf{G}^{\bullet} \cdot \mathbf{d}_n \quad (18)$$

Формулы (17), (18) дают представление всех компонент линеаризованного тензора напряжений Кирхгофа \mathbf{P}^{\bullet} в базисе $\{\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \mathbf{d}_3\}$ через компоненты линеаризованной меры деформации Коши–Грина \mathbf{G}^{\bullet} , а сам тензор \mathbf{G}^{\bullet} равен

$$\mathbf{G}^{\bullet} = \mathring{\nabla} \mathbf{v} \cdot \mathbf{C}^T + \mathbf{C} \cdot \mathring{\nabla} \mathbf{v}^T \quad (19)$$

Согласно (2), линеаризованные условия равновесия на лицевых поверхностях плиты Ω_{+} и Ω_{-} , где действуют поверхностные напряжения, имеют вид:

$$\left(\mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{D}^* - \overset{\circ}{\nabla}_{\pm} \cdot \mathbf{D}_{\pm}^* \right) \Big|_{x_3 = \pm h} = 0 \quad (20)$$

Здесь \mathbf{D}_{+}^* и \mathbf{D}_{-}^* — линейризованные тензоры поверхностных напряжений типа Пиолы, для которых с учетом выражений (3), (7) справедливы следующие соотношения

$$\mathbf{D}_{\pm}^* = \mathbf{P}_{\pm}^* \cdot \mathbf{C}_{\pm} + \mathbf{P}_{\pm} \cdot \overset{\circ}{\nabla}_{\pm} \mathbf{v}_{\pm}, \quad \mathbf{P}_{\pm}^* = \kappa_1^{\pm} \mathbf{E}_{\pm} + 2\kappa_2^{\pm} \mathbf{G}_{\pm} + 2\kappa_2^{\pm} \mathbf{G}_{\pm}^* \quad (21)$$

где

$$\kappa_{\alpha}^{\pm} = \sum_{\beta=1}^2 \kappa_{\alpha\beta}^{\pm} j_{\beta}^{\pm}, \quad \kappa_{\alpha\beta}^{\pm} = \frac{\partial \kappa_{\alpha}^{\pm}(j_1^{\pm}, j_2^{\pm})}{\partial j_{\beta}^{\pm}}, \quad \alpha = 1, 2; \quad j_1^{\pm} = \text{tr} \mathbf{G}_{\pm}^*, \quad j_2^{\pm} = 2\text{tr}(\mathbf{G}_{\pm} \cdot \mathbf{G}_{\pm}^*)$$

$$\mathbf{G}_{\pm}^* = \overset{\circ}{\nabla}_{\pm} \mathbf{v}_{\pm} \cdot \mathbf{C}_{\pm}^T + \mathbf{C}_{\pm} \cdot \overset{\circ}{\nabla}_{\pm} \mathbf{v}_{\pm}^T, \quad \mathbf{v}_{\pm} = \mathbf{v} \Big|_{x_3 = \pm h} \quad (22)$$

Здесь \mathbf{P}_{+}^* и \mathbf{P}_{-}^* — линейризованные тензоры поверхностных напряжений типа Кирхгофа, \mathbf{G}_{+}^* и \mathbf{G}_{-}^* — линейризованные меры поверхностной деформации типа Коши–Грина, а \mathbf{v}_{+} и \mathbf{v}_{-} — векторы добавочных перемещений верхней и нижней лицевых поверхностей.

Будем полагать, что на краях плиты ($x_1 = 0, b_1; x_2 = 0, b_2$) выполняются условия «скользящей заделки», т.е. задано постоянное нормальное перемещение и отсутствуют силы трения. Это приводит к следующим линейризованным граничным условиям:

$$\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{D}^* \cdot \mathbf{e}_2 \Big|_{x_1=0, b_1} = \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{D}^* \cdot \mathbf{e}_3 \Big|_{x_1=0, b_1} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_1 \Big|_{x_1=0, b_1} = 0 \quad (23)$$

$$\mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{D}^* \cdot \mathbf{e}_1 \Big|_{x_2=0, b_2} = \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{D}^* \cdot \mathbf{e}_3 \Big|_{x_2=0, b_2} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_2 \Big|_{x_2=0, b_2} = 0$$

Запишем представление вектора добавочных перемещений \mathbf{v} в базисе декартовых координат:

$$\mathbf{v} = v_1 \mathbf{e}_1 + v_2 \mathbf{e}_2 + v_3 \mathbf{e}_3 \quad (24)$$

Выражения (14), описывающие возмущенное состояние равновесия прямоугольной плиты, представляют собой систему трех уравнений в частных производных относительно трех неизвестных функций v_1, v_2, v_3 . Подстановка

$$v_1 = V_1(x_3) \sin \gamma_1 x_1 \cos \gamma_2 x_2, \quad v_2 = V_2(x_3) \cos \gamma_1 x_1 \sin \gamma_2 x_2, \quad v_3 = V_3(x_3) \cos \gamma_1 x_1 \cos \gamma_2 x_2 \quad (25)$$

$$\gamma_1 = \pi m_1 / b_1, \quad \gamma_2 = \pi m_2 / b_2, \quad m_1, m_2 = 0, 1, 2, \dots$$

приводит к отделению переменных x_1, x_2 в этих уравнениях и позволяет удовлетворить линейризованным краевым условиям (23).

Учитывая соотношения (9) – (11), (15), (17) – (19), (24), (25), уравнения нейтрального равновесия (14) записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} & (\chi_3 + \lambda_1^2 B_{13}) V_1'' - (\gamma_1^2 [\chi_1 + 2\lambda_1^2 \chi_{11}] + \gamma_2^2 [\chi_2 + \lambda_1^2 B_{12}]) V_1 - \\ & - \lambda_1 \lambda_2 \gamma_1 \gamma_2 (B_{12} + 2\chi_{12}) V_2 - \lambda_1 \lambda_3 \gamma_1 (B_{13} + 2\chi_{13}) V_3' = 0 \\ & (\chi_3 + \lambda_2^2 B_{23}) V_2'' - (\gamma_1^2 [\chi_1 + \lambda_2^2 B_{12}] + \gamma_2^2 [\chi_2 + 2\lambda_2^2 \chi_{22}]) V_2 - \\ & - \lambda_1 \lambda_2 \gamma_1 \gamma_2 (B_{12} + 2\chi_{12}) V_1 - \lambda_2 \lambda_3 \gamma_2 (B_{23} + 2\chi_{23}) V_3' = 0 \\ & (\chi_3 + 2\lambda_3^2 \chi_{33}) V_3'' - (\gamma_1^2 [\chi_1 + \lambda_3^2 B_{13}] + \gamma_2^2 [\chi_2 + \lambda_3^2 B_{23}]) V_3 + \\ & + \lambda_1 \lambda_3 \gamma_1 (B_{13} + 2\chi_{13}) V_1' + \lambda_2 \lambda_3 \gamma_2 (B_{23} + 2\chi_{23}) V_2' = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

Согласно выражениям (9) – (11), (20) – (22), (24), (25), линейризованные условия равновесия на лицевых поверхностях плиты имеют вид ($x_3 = \pm h$):

$$(\chi_3 + \lambda_1^2 B_{13})V_1' + 2\lambda_1\lambda_2\gamma_1\gamma_2(\kappa_2^\pm + \xi_{12}^\pm)V_2 - \lambda_1\lambda_3\gamma_1 B_{13}V_3 +$$

$$+ (\gamma_1^2 [\kappa_1^\pm + 6\lambda_1^2\kappa_2^\pm + 2\lambda_1^2\xi_{11}^\pm] + \gamma_2^2 [\kappa_1^\pm + 2(\lambda_1^2 + \lambda_2^2)\kappa_2^\pm])V_1 = 0$$

$$(\chi_3 + \lambda_2^2 B_{23})V_2' + 2\lambda_1\lambda_2\gamma_1\gamma_2(\kappa_2^\pm + \xi_{12}^\pm)V_1 - \lambda_2\lambda_3\gamma_2 B_{23}V_3 +$$

$$+ (\gamma_1^2 [\kappa_1^\pm + 2(\lambda_1^2 + \lambda_2^2)\kappa_2^\pm] + \gamma_2^2 [\kappa_1^\pm + 6\lambda_2^2\kappa_2^\pm + 2\lambda_2^2\xi_{22}^\pm])V_2 = 0 \tag{27}$$

$$(\chi_3 + 2\lambda_3^2\chi_{33})V_3' + 2\lambda_1\lambda_3\gamma_1\chi_{13}V_1 + 2\lambda_2\lambda_3\gamma_2\chi_{23}V_2 + (\gamma_1^2 [\kappa_1^\pm + 2\lambda_1^2\kappa_2^\pm] + \gamma_2^2 [\kappa_1^\pm + 2\lambda_2^2\kappa_2^\pm])V_3 = 0$$

Таким образом, исследование устойчивости прямоугольной плиты с поверхностными напряжениями сводится к решению линейной однородной краевой задачи (26), (27) для системы трех обыкновенных дифференциальных уравнений.

Легко показать, что если упругие свойства верхней и нижней лицевых поверхностей плиты одинаковы, т.е. $\kappa_\alpha^+ = \kappa_\alpha^-$, $\kappa_{\alpha\beta}^+ = \kappa_{\alpha\beta}^-$, $\alpha, \beta = 1, 2$, то сформулированная выше краевая задача имеет два независимых класса решений. **Первый класс** образован решениями, для которых прогиб плиты является нечетной функцией координаты x_3 :

$$V_1(x_3) = V_1(-x_3), \quad V_2(x_3) = V_2(-x_3), \quad V_3(x_3) = -V_3(-x_3)$$

Для решений **Второго класса**, наоборот, прогиб – четная функция x_3 :

$$V_1(x_3) = -V_1(-x_3), \quad V_2(x_3) = -V_2(-x_3), \quad V_3(x_3) = V_3(-x_3)$$

Благодаря этому свойству линеаризованной краевой задачи (26), (27) при исследовании устойчивости достаточно рассмотреть лишь половину плиты, например, верхнюю ($0 \leq x_3 \leq h$). Из четности и нечетности неизвестных функций V_1, V_2, V_3 следуют граничные условия при $x_3 = 0$:

а) для **Первого класса** решений:

$$V_1'(0) = V_2'(0) = V_3(0) = 0 \tag{28}$$

б) для **Второго класса** решений:

$$V_1(0) = V_2(0) = V_3'(0) = 0 \tag{29}$$

В результате, при одинаковых лицевых поверхностях исследование устойчивости прямоугольной плиты с поверхностными напряжениями сводится к решению двух линейных однородных краевых задач — (26) – (28) и (26), (27), (29) — для половины плиты.

УДК 531/534

ОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕОДНОРОДНОГО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ В УПРУГИХ И ЭЛЕКТРОУПРУГИХ ТЕЛАХ*

А.О. Ватульян¹, Р.Д. Недин²

¹Южный федеральный университет,

²Владикавказский научный центр РАН

Математические модели предварительного напряженного состояния (ПНС)

Рассмотрим упругое тело в двух конфигурациях. В начальной деформированной конфигурации κ_0 в результате действия некоторых конечных деформаций в теле присутствует самоуравновешенное поле начальных (предварительных) напряжений. Будем считать эту конфигурацию отсчетной и использовать материальный (лагранжевый) способ описания движения. Далее, возмущая конфигурацию κ_0 и накладывая на нее малые деформации, получим вторую конфигурацию κ . Будем считать, что тело в конфигурации κ имеет объем V , ограниченный поверхностью $S = S_u \cup S_\sigma$; тело жестко зашпечлено на части границы S_u и нагружено меняющейся во времени нагрузкой \underline{P} на части границы S_σ . Линеаризованная краевая задача о колебаниях предварительно напряженного тела имеет следующий общий вид [1-4]:

$$\begin{aligned} T_{ij,j} + \rho b_i &= \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}, \quad T_{ij} = \Gamma_{ij} + \sigma_{ij}, \quad \sigma_{ij,j} + \rho b_i^0 = 0, \\ u_i^0|_{S_u^0} &= f_i^0, \quad \sigma_{ij}^0 n_j|_{S_\sigma^0} = P_i^0, \quad u_i|_{S_u} = 0, \quad T_{ij} n_j|_{S_\sigma} = P_i, \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь принято обозначение $u_{i,j} = \partial u_i / \partial x_j^0$, где x_k^0 – координаты тела в начальной деформированной конфигурации; ρ – плотность тела; величины с верхним индексом «ноль» относятся к начальному состоянию, величины без индекса – компоненты соответствующих добавочных векторов и тензоров: массовой силы (b_i), поверхностной нагрузки (P_i), перемещений (u_i), напряжений Коши (σ_{ij}); T_{ij} – компоненты несимметричного добавочного первого тензора напряжений Пиолы—Кирхгофа. Соотношения $\Gamma_{ij}^I = u_{i,m} \sigma_{mj}^0$, $\Gamma_{ij}^{II} = \frac{1}{4} \sigma_{mj}^0 (3u_{i,m} - u_{m,i}) - \frac{1}{4} \sigma_{mi}^0 (u_{j,m} + u_{m,j})$ и $\Gamma_{ij}^{III} = \sigma_{ij}^0 u_{m,m} - \frac{1}{2} \sigma_{mj}^0 (u_{m,i} - u_{i,m}) - \frac{1}{2} \sigma_{mi}^0 (u_{j,m} + u_{m,j})$ определяют три распространенных представления тензора Пиолы в рамках этой модели ПН, предложенные Е. Трефтцем, М. Био, К. Бицено, Х. Генки и Р. Саусвеллом и доработанные впоследствии В.В. Новожиловым, Л.М. Зубовым, К. Васидзу, Л. Робертсоном, А. Хогер, К. Труселлом и др.

Теперь рассмотрим другую, более общую модель преднапряженного пезоупругого тела, в котором учитывается не только поле ПН, но и поле предварительных перемещений (ПП) u_i^0 . Введем еще одну конфигурацию – естественную \mathcal{K} , в которой тело не подвержено каким-либо внешним воздействиям и не содержит остаточных напряжений и деформаций. Будем считать, что в возмущенной конфигурации κ тело имеет объем V , ограниченный кусочно-гладкой границей $S = S_u \cup S_\sigma$, $S = S_D \cup S_\pm$, где S_u – зашпечленная часть

* Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований по стратегическим направлениям развития науки Президиума РАН №1 «Фундаментальные проблемы математического моделирования» (114072870112) «Математическое моделирование неоднородных и многофазных структур», Гранта Президента Российской Федерации МК-5440.2016.1, РФФИ (№ 16-01-00354, № 16-38-60157 мол_а_дк).

поверхности, S_σ – часть поверхности, нагруженная механической нагрузкой, S_D и S_\pm – соответственно неэлектропроводная и электропроводная части поверхности. В качестве отсчетной конфигурации выберем естественную (\mathcal{K}^0), а в качестве текущей – возмущенную конфигурацию (\mathcal{K}). Линеаризованная краевая задача связанной электроупругости имеет в этом случае вид

$$T_{ij,j} + \rho b_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}, \quad D_{i,i} = 0, \quad T_{ij} = \sigma_{ij} + u_{i,m}^0 \sigma_{mj} + u_{i,m} \sigma_{mj}^0, \\ \sigma_{ij} = \hat{C}_{ijkl} u_{k,l} + \hat{e}_{mij} \varphi_{,m}, \quad D_k = e_{kij}^* u_{i,j} - \dot{\varphi}_{,k}^*, \quad (2)$$

$$T_{ij} n_j |_{S_\sigma} = P_i, \quad u_i |_{S_u} = 0, \quad D_i n_i |_{S_D} = 0, \quad \varphi |_{S_\pm} = \pm V_0.$$

$$\hat{C}_{ijkl} = C_{ijkl} + C_{ijkl}^0, \quad \hat{e}_{mij} = e_{mij} + \hat{e}_{mij}^0, \quad e_{mij}^* = e_{mij} + e_{mij}^0, \quad \dot{\varphi}_{,mn}^* = \dot{\varphi}_{,mn} + \dot{\varphi}_{,mn}^0,$$

Здесь D_i – компоненты вектора электрической индукции. Компоненты C_{ijkl} образуют тензор классических упругих постоянных, e_{mij} – тензор пьезоэлектрических постоянных, $\dot{\varphi}_{,mn}$ – тензор диэлектрических проницаемостей. Компоненты с верхним индексом «0» в представлениях эффективных постоянных зависят от начальных деформаций и потенциала [5].

Моделирование колебаний пьезоупругого преднапряженного стержня

В качестве конкретного примера рассмотрим установившиеся колебания пьезоупругого стержня длины l , консольно закрепленного одним концом, под действием продольной силы $Pe^{i\omega t}$. Будем считать, что неоднородность материала стержня характеризуется тем, что модуль Юнга и пьезомодуль переменны и зависят от осевой координаты. Будем также считать, что стержень находится в условиях неоднородного одноосного ПНС, характеризуемого компонентой тензора ПН $\sigma_{11}^0 = \sigma_{11}^0(x)$ и продольной компонентой вектора ПП $u_1^0 = u_1^0(x)$, остальные компоненты тензора ПН и вектора ПП положим равными нулю.

На основе постановки (2) сформулированы уравнения движения и граничные условия; для этого использована общая слабая постановка задачи с применением соответствующих гипотез для описанного стержня. Рассмотрим несколько возможных вариантов граничных условий для электрических факторов:

- а) $D(0) = 0, D(l) = 0$ – при отсутствии электродов на торцах стержня;
- б) $\varphi(0) = 0, \varphi(l) = 0$ – при закороченных электродах на торцах;
- в) $\varphi(0) = -V_0, \varphi(l) = V_0$ – при заданной разности потенциалов на торцах.

В общем случае краевая задача для стержня примет вид:

$$\left[(E^* u' + d^* \varphi') F \right]' + \rho F \omega^2 u = 0, \quad \left[(d^* u' - \dot{\varphi}') F \right]' = 0, \quad (3)$$

$$u(0) = 0, \quad E^* u'(l) + d^* \varphi'(l) = P, \quad (4)$$

$$d^* u'(0) - \dot{\varphi}'(0) = 0, \quad d^* u'(l) - \dot{\varphi}'(l) = 0. \quad (5)$$

где E^* и d^* – эффективные модуль Юнга и пьезомодуль, определяемые по формулам $E^* = E \left[(1 + u_0')^2 + \sigma_0 \right]$, $d^* = d(1 + u_0')$; $V = [0, l] \times F$, $F = F(x)$ – площадь поперечного сечения стержня; при состоянии растяжения эффективный модуль упругости увеличивается, при сжатии уменьшается.

Для граничного условия (а) можно выразить производную потенциала через перемещение, удовлетворив соответствующим граничным условиям (5): $\varphi' = \frac{d^*}{\delta} u'$. Тогда можно записать (3)-(5) в виде постановки относительно функции перемещения с ужесточенным модулем:

$$\left[\left(E^* + \frac{d^{*2}}{\delta} \right) u'F \right]' + \rho F \omega^2 u = 0, \quad u(0) = 0, \quad \left(E^* + \frac{d^{*2}}{\delta} \right) u'(l) = P, \quad (6)$$

Аналогично получаются постановки задач для граничных условий (б) и (в). Уравнение движения и электростатики и граничные условия для механических факторов снова примут вид (3), (4); соответствующие граничные условия для электрических факторов в задаче для стержня при закороченных электродах на его торцах запишутся в виде (б), а в задаче для стержня при заданной разности потенциалов на его торцах в виде (в), соответственно. Отметим, что, в отличие от первого случая для граничных условий (а), свести две эти задачи к постановкам относительно перемещения удастся только в том случае, если известны величины $u(l)$ или $u'(l)$; в противном случае необходимо решать задачу в полной постановке (3)-(5).

Сформулированные постановки описывают краевые задачи о продольных установившихся колебаниях преднапряженного пьезоупругого стержня, неоднородного по осевой координате, при различных граничных условиях, накладываемых на электрические факторы. Задавая определенный вид неоднородности законов изменения модуля Юнга и пьезомодуля, получим постановку задачи для конкретного типа пьезоэлектрического стержня, в частности, выполненного из функционально-градиентного пьезоэлектрика. В случае отсутствия ПНДС в стержне полученная постановка задачи совпадет с классической постановкой для пьезоэлектрического стержня.

Задача об идентификации ПНС в стержне и пластине

Выведены уточненные постановки краевых задач об установившихся колебаниях различных тел в рамках плоского напряженного состояния. На основе гипотез $u_1 = \theta x_3 + \zeta$, $u_2 = 0$, $u_3 = w$ (где $\theta = \theta(x_1)$ – угол поворота главной оси стержня, обусловленный изгибом, $\zeta = \zeta(x_1)$ – продольное смещение, $w = w(x_1)$ – прогиб) осуществлен вывод краевой задачи

$$\begin{aligned} & \left[(E_2 + \Sigma_{11}^2)\theta' + (E_1 + \Sigma_{11}^1)\zeta' + \Sigma_{13}^1\theta \right]' - Mw' - \Sigma_{13}^1\theta' - \Sigma_{13}^0\zeta' - (M + \Sigma_{33}^0)\theta + \omega^2(P_1\zeta + P_2\theta) = 0 \\ & \left[(E_1 + \Sigma_{11}^1)\theta' + (E_0 + \Sigma_{11}^0)\zeta' + \Sigma_{13}^0\theta \right]' + \omega^2(P_0\zeta + P_1\theta) = 0, \quad \left[(M + \Sigma_{11}^0)w' + M\theta \right]' + \omega^2 P_0 w = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$w(0) = 0, \quad \theta(0) = 0, \quad \zeta(0) = 0, \quad \left[(E_2 + \Sigma_{11}^2)\theta' + (E_1 + \Sigma_{11}^1)\zeta' + \Sigma_{13}^1\theta \right](l) = 0,$$

$$\left[(E_1 + \Sigma_{11}^1)\theta' + (E_0 + \Sigma_{11}^0)\zeta' + \Sigma_{13}^0\theta \right](l) = 0, \quad \left[(M + \Sigma_{11}^0)w' + M\theta \right](l) = -P$$

для предварительно напряженного упругого изотропного стержня в рамках модели Тимошенко, где введены следующие обозначения

$$M = \int_F \mu dF, E_0 = \int_F E dF, E_1 = \int_F E x_3 dF, E_2 = \int_F E x_3^2 dF,$$

$$\Sigma_{11}^0 = \int_F \sigma_{11}^0 dF, \Sigma_{11}^1 = \int_F \sigma_{11}^0 x_3 dF, \Sigma_{11}^2 = \int_F \sigma_{11}^0 x_3^2 dF,$$

$$\Sigma_{13}^0 = \int_F \sigma_{13}^0 dF, \Sigma_{13}^1 = \int_F \sigma_{13}^0 x_3 dF, \Sigma_{33}^0 = \int_F \sigma_{33}^0 dF, P_0 = \int_F \rho dF, P_1 = \int_F \rho x_3 dF, P_2 = \int_F \rho x_3^2 dF,$$

представляющие собой осредненные характеристики соответствующих функций, зависящие от осевой координаты x . При этом рассмотрен самый общий случай неоднородности всех параметров задачи, включая объемное распределение ПНС.

Теперь рассмотрим более общий случай, при котором учитываются как предварительный прогиб w_0 , так и предварительный угол θ_0 ; соответствующие гипотезы для начальных перемещений имеет вид $u_1^0 = \theta_0 x_3, u_2^0 = 0, u_3^0 = w_0$. В этом случае постановку задачи для стержня можно получить на основе общей постановки задачи (2), пренебрегая электрическими факторами:

$$(Q^\circ)' - R^\circ = 0, \quad (Q^Z)' - R^Z = 0, \quad (Q^W)' - R^W = 0, \\ w(0) = 0, \quad \theta(0) = 0, \quad \zeta(0) = 0, \\ Q^\circ|_{x=l} = -SP_1 / F, \quad Q^Z|_{x=l} = -P_1, \quad Q^W|_{x=l} = -P_2.$$

где обозначено

$$Q^\circ = T_{13}^2 \theta_0 + T_{13}^1 + T_{11}^1 \theta_0 + \Sigma_{11}^2 \theta' + \Sigma_{11}^1 \zeta' + \Sigma_{13}^1 \theta, \quad Q^Z = T_{13}^1 \theta_0 + T_{13}^0 + T_{11}^0 \theta_0 + \Sigma_{11}^1 \theta' + \Sigma_{11}^0 \zeta' + \Sigma_{13}^0 \theta, \\ Q^W = T_{13}^0 w_0' + T_{11}^0 + T_{11}^0 w', \quad R^\circ = T_{11}^1 \theta_0 + T_{11}^0 + \Sigma_{13}^1 \theta' + \Sigma_{13}^0 \zeta' + \Sigma_{33}^0 \theta - \omega^2 (\theta P_2 + \zeta P_1), \\ R^Z = -\omega^2 (\theta P_1 + \zeta P_0), \quad R^W = -\omega^2 w P_0, \quad M_k = \int_F \mu x_3^k dF,$$

$$T_{11}^p = M_{p+1} (\theta \theta_0)' + M_p (\zeta \theta_0 + \theta + w'), \quad T_{13}^p = E_{p+2} \theta' \theta_0 + E_{p+1} (\zeta \theta_0 + \theta') + E_p (w' w_0 + \zeta').$$

Остальные обозначения уже введены выше.

На основе гипотез $u_1 = \theta_1 x_3 + \zeta_1, u_2 = \theta_2 x_3 + \zeta_2, u_3 = w$, (где $\theta_\alpha = \theta_\alpha(x_\beta)$ – углы поворота нормали вдоль осей $x_\alpha, \zeta_\alpha = \zeta_\alpha(x_\beta)$ – перемещения в плоскости пластины, $w = w(x_\beta)$ – прогиб пластины, $\alpha, \beta = 1, 2$) проведен вывод краевой задачи

$$Q_{\alpha\beta,\beta} - S_\alpha + \omega^2 (P_2 \theta_\alpha + P_1 \zeta_\alpha) = 0, \quad R_{\alpha\beta,\beta} + \omega^2 (P_1 \theta_\alpha + P_0 \zeta_\alpha) = 0, \quad T_{\alpha,\alpha} + P_0 \omega^2 w = 0, \quad (8) \\ w|_{l_\alpha} = 0, \quad \theta_\alpha|_{l_\alpha} = 0, \quad \zeta_\alpha|_{l_\alpha} = 0, \quad Q_{\alpha\beta} n_\beta|_{l_\alpha} = 0, \quad R_{\alpha\beta} n_\beta|_{l_\alpha} = 0, \quad T_\alpha n_\alpha|_{l_\alpha} = -P.$$

для предварительно напряженной тонкой изотропной пластины в рамках модели Тимошенко в общем случае неоднородности всех параметров задачи; при этом обозначено

$$\Psi_{\alpha\beta}^\gamma = \delta_{\alpha\beta} (\Lambda_\gamma \theta_{m,m} + \Lambda_{\gamma-1} \zeta_{m,m}) + M_\gamma (\theta_{\alpha,\beta} + \theta_{\beta,\alpha}) + M_{\gamma-1} (\zeta_{\alpha,\beta} + \zeta_{\beta,\alpha}) + \Sigma_{m\beta}^\gamma \theta_{\alpha,m} + \Sigma_{m\beta}^{\gamma-1} \zeta_{\alpha,m} + \Sigma_{\beta 3}^{\gamma-1} \theta_\alpha$$

$$Q_{\alpha\beta} = \Psi_{\alpha\beta}^2, \quad R_{\alpha\beta} = \Psi_{\alpha\beta}^1, \quad \Lambda_p = \int_{-h/2}^{h/2} \lambda x_3^p dx_3, \quad M_p = \int_{-h/2}^{h/2} \mu x_3^p dx_3, \quad P_p = \int_{-h/2}^{h/2} \rho x_3^p dx_3,$$

$$\Sigma_{\alpha\beta}^p = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{\alpha\beta}^0 x_3^p dx_3, \quad S_\alpha = M_0 (w_{,\alpha} + \theta_\alpha) + \Sigma_{m3}^1 \theta_{\alpha,m} + \Sigma_{m3}^0 \zeta_{\alpha,m} + \Sigma_{33}^0 \theta_\alpha,$$

$$T_\alpha = M_0 (w_{,\alpha} + \theta_\alpha) + \Sigma_{\alpha m}^0 w_{,m}, \quad \alpha, \beta, \gamma, m = 1, 2, \quad p = 0, 1, 2.$$

С помощью МКЭ получено численное решение ряда краевых задач, исследовано влияния уровней ПН на амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) точек области; осуществлено сравнение моделей Эйлера—Бернулли и Тимошенко на примере изгибных колебаний стержня и моделей Кирхгофа и Тимошенко на примере изгибных колебаний тонкой пластины.

В постановке обратной задачи требуется определить компоненты тензора ПН в теле, если к свободной поверхности тела S_σ прикладывается периодическая зондирующая нагрузка, поле смещений $\underline{f}|_{S_\sigma} = \underline{u}|_{S_\sigma}$ измеряется в заданном наборе точек для нескольких частот $\omega_k \in [\omega_-, \omega_+]$ ($k = 1, m$). В рамках такой постановки обратная задача нелинейна и некорректна; для ее решения применен метод итерационной регуляризации, в основе которого лежит обобщенное соотношение взаимности

$$\int_V \sigma_{mj}^{0(n)} u_{i,j}^{(n-1)} u_{i,m}^{(n-1)} dV + \int_{S_\sigma} P_i (f_i - u_i^{(n-1)}) dS_\sigma = 0 \quad (9)$$

полученное в работе [2]. Уравнение (9) позволяет сформулировать итерационный процесс, на каждом шаге которого решается прямая задача для текущего приближения для ПН

$\tilde{\sigma}_{ij}^0$ и вычисляется соответствующее поле смещений и деформаций, после чего из уравнения (9) находятся новые поправки к неизвестным функциям ПН $\sigma_{ij}^{0(n)}$, и в конце итерации текущее приближение уточняется с учетом вычисленной поправки: $\tilde{\sigma}_{ij}^0 := \tilde{\sigma}_{ij}^0 + \sigma_{ij}^{0(n)}$. Такой подход требует знания начального приближения $\sigma_{ij}^{0(0)}$, поиск которого можно осуществлять в каком-нибудь узком классе функций, например, в классе постоянных или линейных функций.

Рассмотрены одномерные обратные задачи об идентификации одноосного ПНС в ленточных пластинах при планарных и изгибных колебаниях в рамках модели Кирхгофа и в стержне в рамках модели Тимошенко при изгибных колебаниях. Все обратные задачи сведены к итерационному процессу, исходя из (9): для задач о ленточной пластине при планарных и изгибных колебаниях в рамках модели Кирхгофа и о стержне в рамках модели Тимошенко уравнения взаимности сводятся к интегральным уравнениям Фредгольма (ИУФ) 1-го рода с непрерывными ядрами

$$\int_{\Omega} \sigma_{11}^{0(n)} \left[(u_{1,1}^{(n-1)})^2 + (u_{2,1}^{(n-1)})^2 \right] d\Omega = \int_{l_{\sigma}} P_{\alpha} (u_{\alpha}^{(n-1)} - f_{\alpha}) dl_{\sigma},$$

$$\int_S \sigma_{11}^{0(n)} \left[\frac{h^3}{12} \left((w_{,11}^{(n-1)})^2 + (w_{,12}^{(n-1)})^2 \right) + h (w_{,1}^{(n-1)})^2 \right] dS = \int_{l_{\sigma}} q(w^{(n-1)} - f) dS,$$

$$\int_0^l \sigma_{11}^{0(n)} \left(J[\theta^{(n-1)}]^2 + F[w^{(n-1)}]^2 \right) dx_1 = P(w^{(n-1)}(l) - f(l)), \omega \in [\omega_-, \omega_+],$$

соответственно. Отметим, что построение решения ИУФ 1-го рода представляет собой некорректную задачу; для его нахождения использован метод регуляризации А.Н. Тихонова.

Также рассмотрены двумерные обратные задачи об идентификации плоского ПНС в пластине при планарных и изгибных колебаниях в рамках модели Тимошенко. Соотношения взаимности при этом имеют общий вид

$$\int_{\Omega} \left[\sigma_{11}^{0(n)} K_{11}^{(n-1)} + \sigma_{22}^{0(n)} K_{22}^{(n-1)} + \sigma_{12}^{0(n)} K_{12}^{(n-1)} \right] d\Omega = F^{(n-1)}, \quad (10)$$

где в случае планарных колебаний ядра и правая часть интегрального уравнения имеют вид

$$K_{11}^{(n-1)} = (u_{1,1}^{(n-1)})^2 + (u_{2,1}^{(n-1)})^2, \quad K_{22}^{(n-1)} = (u_{1,2}^{(n-1)})^2 + (u_{2,2}^{(n-1)})^2,$$

$$K_{12}^{(n-1)} = 2(u_{1,1}^{(n-1)}u_{1,2}^{(n-1)} + u_{2,1}^{(n-1)}u_{2,2}^{(n-1)}),$$

$$F^{(n-1)} = \int_{l_{\sigma}} P_{\alpha} (u_{\alpha}^{(n-1)} - f_{\alpha}) dl_{\sigma},$$

а в случае изгибных колебаний в рамках модели Тимошенко –

$$K_{11}^{(n-1)} = H \left[(\theta_{1,1}^{(n-1)})^2 + (\theta_{2,1}^{(n-1)})^2 \right] + h (w_{,1}^{(n-1)})^2, \quad K_{22}^{(n-1)} = H \left[(\theta_{1,2}^{(n-1)})^2 + (\theta_{2,2}^{(n-1)})^2 \right] + h (w_{,2}^{(n-1)})^2,$$

$$K_{12}^{(n-1)} = 2 \left[H (\theta_{1,1}^{(n-1)}\theta_{1,2}^{(n-1)} + \theta_{2,1}^{(n-1)}\theta_{2,2}^{(n-1)}) + h w_{,1}^{(n-1)} w_{,2}^{(n-1)} \right], \quad F^{(n-1)} = - \int_{l_{\sigma}} P(w^{(n-1)} - f) dl_{\sigma}$$

Подход к реконструкции основан на предварительном разбиении области пластины на сетку суперэлементов $\{\Omega_k\}_{k=1}^N$, на каждом из которых задана функция Эри $\Phi_k|_{\Omega_k}(x_1, x_2)$, через которую выражены неизвестные поправки к ПН. Представляя функции Φ_k в виде линейной комбинации бигармонических полиномов, уравнение (6) сводится к плохо обусловленной системе линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов разложения каждой функции $\Phi_k|_{\Omega_k}$; для ее решения использован метод регуляризации А.Н. Тихонова. Результат реконструкции, найденный в классе кусочно-постоянных функций, сглаживался с помощью кубической сплайн-интерполяции.

Во всех рассмотренных обратных задачах поиск начального приближения к неизвестной функции ПН осуществлялся в классе линейных функций на основе минимизации функционала невязки. Проведены вычислительные эксперименты по реконструкции ПНС. Максимальная относительная погрешность между точным и восстановленным законом не превосходит 8%. Для большинства рассмотренных примеров второй частотный диапазон оказался более благоприятным с точки зрения точности результаты восстановления, по сравнению с первым и третьим; при планарных колебаниях пластины нагружение касательной нагрузкой на свободных гранях пластины является более эффективным, чем нагружение нормальной нагрузкой.

Библиографический список:

1. **Ватульян, А.О.** Предварительные напряжения: моделирование и идентификация. Монография/А.О. Ватульян, В.В. Дударев, Р.Д. Недин. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2014. – 206с.
2. **Nedin, R.D.** Inverse Problem of Non-homogeneous Residual Stress Identification in Thin Plates/R.D. Nedin, A.O. Vatulyan// Int. J. Solids Struct. – 2013. – No.50. – P.2107-2114.
3. **Nedin, R.D.** Concerning one approach to the reconstruction of heterogeneous residual stress in plate/R.D. Nedin, A.O. Vatulyan// ZAMM: Z. angew. Math. Mech. – 2014. – V.94, No.1-2. – P.142-149.
4. **Dudarev, V.V.** On restoring of the pre-stressed state in elastic bodies/V.V. Dudarev, A.O. Vatulyan// ZAMM: Z. angew. Math. Mech. – 2011. – V.91, No.6. – P.485-492
5. **Kuang, Z.B.**: Theory of Electroelasticity. – Springer: Heidelberg, New York, 2014. – 645P.

Bibliography:

1. **Vatulyan, A.O.** Residual stress: modeling and identification. Monograph./A.O. Vatulyan, V.V. Dudarev, R.D. Nedin. – Rostov-on-Don: SfedU Publ., 2014. – 206P.
2. **Nedin, R.D.** Inverse Problem of Non-homogeneous Residual Stress Identification in Thin Plates/R.D. Nedin, A.O. Vatulyan// Int. J. Solids Struct. – 2013. – No.50. – P.2107-2114.
3. **Nedin, R.D.** Concerning one approach to the reconstruction of heterogeneous residual stress in plate/R.D. Nedin, A.O. Vatulyan// ZAMM: Z. angew. Math. Mech. – 2014. – V.94, No.1-2. – P.142-149.
4. **Dudarev, V.V.** On restoring of the pre-stressed state in elastic bodies/V.V. Dudarev, A.O. Vatulyan// ZAMM: Z. angew. Math. Mech. – 2011. – V.91, No.6. – P.485-492
5. **Kuang, Z.B.**: Theory of Electroelasticity. – Springer: Heidelberg, New York, 2014. – 645P.

**СЕКЦИЯ 5
НОВЫЕ ИЗНОСОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ И
УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 621. 762:678.546

**О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОРИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТРИЦ НА ОСНОВЕ НА-КМЦ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПОРОШКАМИ ДЛЯ
ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ
АНТИФРИКЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ**

¹Н.М. Антонова, ²А.П. Бабичев

¹Каменский институт (филиал) ЮРГПУ(НПИ) им. М.И. Платова,
г. Каменск-Шахтинский, Россия

²Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Введение

Пористые композиты широко используются как сорбенты, мембраны, фильтры, антифрикционные материалы. Способы их изготовления существенно различаются, применение зависит от размера, формы и упорядоченности системы пор. Большой интерес представляют материалы, формируемые в результате самосборки систем, с контролируемой пористостью. Нами были получены [1] относительно недорогим и экологически безопасным методом композиционные пористые пленочные материалы из суспензий биополимера натрия – карбоксиметилцеллюлозы (Na – КМЦ) с металлическим наполнителем – порошком алюминия и микродобавками наночастиц бемита - AlOOH [2]. Открытые упорядоченные ячейки - поры формировались в результате самоорганизации систем, по мере отверждения пленок. Изменение содержания бемита позволяло управлять размерами генерируемых ячеек в диапазоне 100÷1200 мкм. Сформированные материалы отличались простотой изготовления, не требовали металлоемкого оборудования и представляли интерес как пористые композиционные матрицы, пригодные для наполнения смазками типа графита, дисульфида молибдена, для формирования покрытий с антифрикционными свойствами.

В работе показана возможность использования разработанных новых высокопористых материалов на основе полимера Na – КМЦ с порошком Al и наночастицами бемита для создания антифрикционных покрытий путем наполнения пор-ячеек твердой смазкой – дисульфидом молибдена.

Методика эксперимента

На фторопластовых подложках, при температуре (55±1) °С, из суспензий очищенного полимера Na–КМЦ с наполнителем порошком алюминия (марки АСД-1) и добавками наноразмерного оксигидроксида алюминия (AlOOH), формировали пленки с упорядоченными порами-ячейками. Наночастицы AlOOH были получены ранее, в соответствии с методикой, изложенной в работе [2]. Растворителем служила дистиллированная вода, пластификатором – глицерин. В эксперименте использованы соотношения компонентов (табл. 1), предложенные в работе [1].

Таблица 1 - Состав для изготовления пленок с ячейками

Содержание компонентов в суспензии				
Na-КМЦ, %	Водный раствор Na-КМЦ, г	Глицерин, г	Al, г	AlOOH, г
2,50-3,20	100,00	3,25	2,50	0,15

Определяли возможность применения полученных пористых пленок в качестве матриц для создания антифрикционных материалов. Покрытие смачивали водой, высаживали на поверхность стали 08кп и выдерживали в термошкафу при температуре 40°C 30 минут. Открытые поры пленок заполняли твердой смазкой - дисульфидом молибдена (MoS_2) марки МВЧ-1 (ЦМЕУ 06-1-68).

Исследовали антифрикционные свойства исходной стальной поверхности и поверхности, защищенной пленкой, с ячейками, наполненными ТСП - MoS_2 . Испытания проводили на стендовой установке трения УСУТ-2 при возвратно-поступательном движении рельса по вкладышу, нагрузке до 6 МПа, скорости скольжения 0,04 м/с. Рабочей средой служил воздух.

Морфологию исходных порошков и полученных в эксперименте пористых пленок исследовали с помощью электронно-сканирующих микроскопов Quanta 200 (ЦКП «ЮРГПУ(НПИ)»), Hitachi S – 5500 («ИХ ДВО РАН»), VEGA II LMU (ЦКП «ЮФУ»).

Дисперсность порошков алюминия и дисульфида молибдена определяли на анализаторе MicroTrac Bluewave (оборудовании ЦКП «Нанотехнологии» ЮРГПУ (НПИ)).

Фазовый состав пленок с порами определяли по дифрактограммам, полученным с использованием дифрактометра ARL X'TRA в угловом интервале 2θ от 5° до 80° с шагом 0.020°, излучение – $\text{CuK}\alpha$, $\text{K}\beta$ (ЦКП «ЮРГПУ(НПИ)»). Инфракрасные спектры (ИК - спектры) органической составляющей композитов и полимерных порошков регистрировали на спектрофотометрах Varian Excalibur 3100 FT-IR (ЦКП «ЮФУ») в интервале 600÷4000 см^{-1} методом НВПО (нарушенное полное внутреннее отражение).

Общая поверхностная пористость пленок определялась с помощью программного обеспечения «Morphology» (фирмы Tescan, ЦКП «ЮФУ»).

Термостойкость полученных пористых пленок с определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), с помощью калориметра DSC-1 фирмы METTLER TOLEDO в интервале температур 30,00 - 500,00°C при скорости нагревания образца 20°C мин⁻¹ и расходе воздуха 50 мл мин⁻¹ в алюминиевом стандартном тигле (оборудование ОАО «Каменскволокно»).

Результаты и их обсуждение

На рис. 1, а - б представлены РЭМ - изображения порошков Na-КМЦ и алюминия.

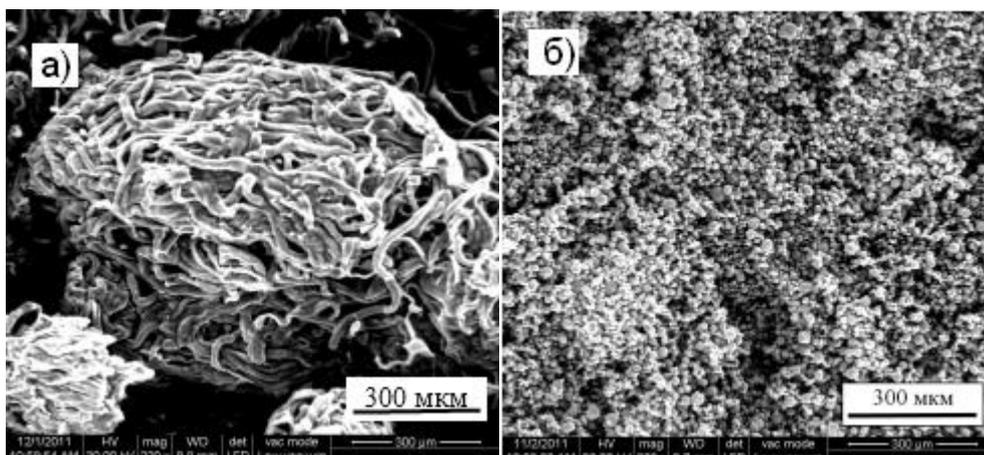


Рис. 1 - Микрофотографии исходных порошков: Na-КМЦ – (а); алюминия - (б)

Полимер Na-КМЦ состоит из волокон, собранных в клубки. Поперечная толщина волокон около 20 мкм (рис. 1, а). Форма частиц порошка Al близка к сферической форме (<40 мкм, рис. 1 б). Синтезированный бемит [7] - продукт с высокой пористостью, образован трубками с поровым пространством ~ 50 нм, толщиной стенок ~10 нм (рис. 2, а). Следует

отметить, что формирование пленок с ячейками происходило лишь при наличии в суспензии бемита. Смазочный материал - порошок дисульфида молибдена, использованный для заполнения пор пленок, обладает слоистой структурой, склонен к агломерации (рис. 2 б). Гистограммы распределений частиц порошков Al и MoS₂ по размерам приведены на рис. 3. В конечном счете, за счет слипания плоских частиц, распределение частиц MoS₂ по размерам близко к распределению по размерам частиц алюминия. В обоих случаях присутствует субмикронная фракция, преобладают частицы и агломераты, образовавшиеся в результате слипания с размерами 10-20 мкм, что позволило надеяться на плотную упаковку частиц MoS₂ в ячейках-порах пленок.

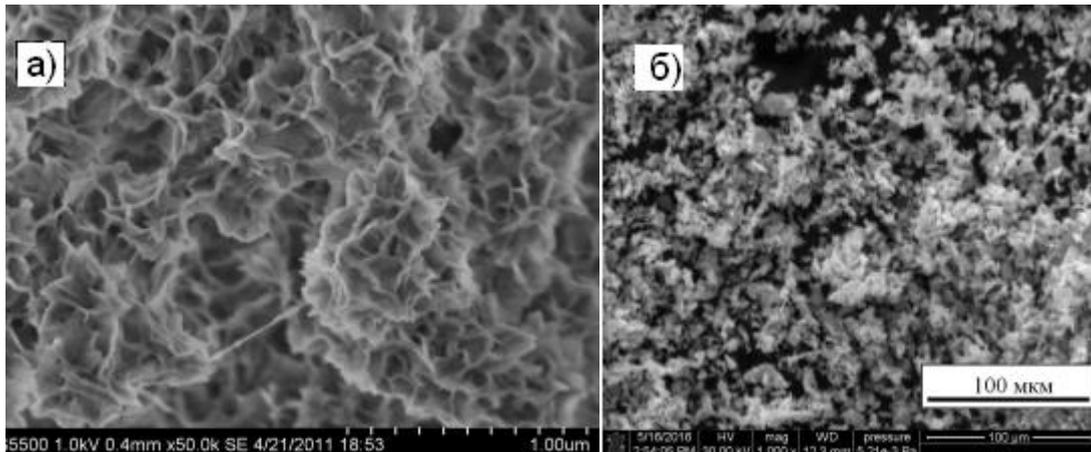


Рис. 2 - Микрофотографии исходных порошков: бемита – (а); MoS₂– (б)

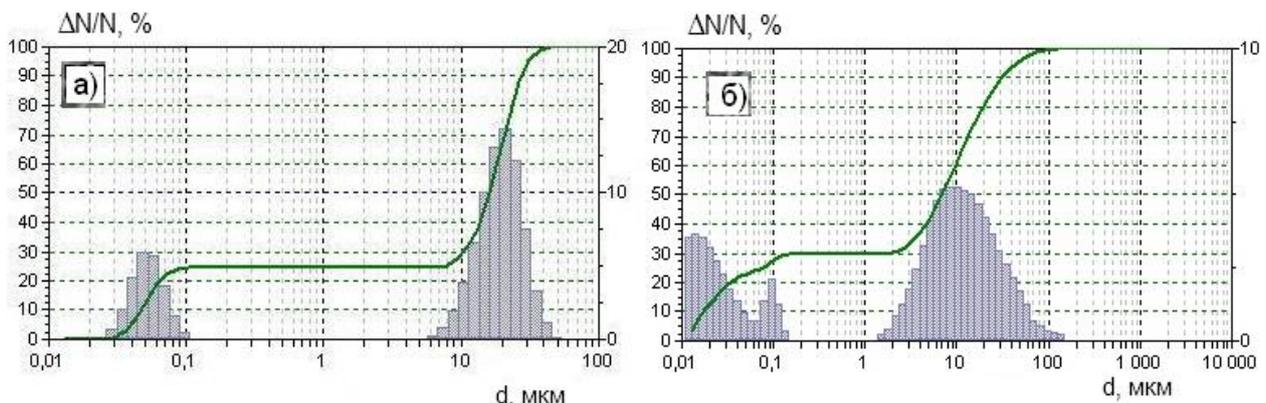


Рис. 3 - Гистограммы распределения частиц по размерам: порошка Al – (а); MoS₂ – (б)

Рентгенофазовый анализ пористой пленки, полученной из суспензии Na-КМЦ с Al и бемитом (рис. 4) показал наличие металлического алюминия в композитах (кубическая ячейка Al, пространственная группа Fm-3m, параметр элементарной ячейки $a = 4.0494 \text{ \AA}$, карточка PDF 000-04-0787). Отсутствие бемита и имеющих в виде пленок на частицах порошка алюминия оксидов алюминия, может объясняться их низким содержанием в исходной композиции. Рефлекс в области $2\theta = 18-20^\circ$, согласно данным [3], характерен для целлюлоз. Анализ ИК – спектров показал, что спектры исходного полимерного порошка Na – КМЦ и пористой композиционной пленки практически идентичны. Это позволяет сделать заключение, что исходные компоненты в пленках с генерируемыми ячейками сохраняют неизменным свой химический состав.

Поверхность пленки с порами, сформированная на фторопластовой подложке, показана на рис. 5, а. На поверхности пленок, сформированных на границе с воздухом, ячейки – поры имеют куполообразную форму, образованную преимущественно пленкой полимера. Зоны между ячейками заполнены частицами алюминия, толщина перемычки ~ 300 мкм. Основания пор открыты, размеры ячеек достигают 1200 – 600 мкм. В процессе формирования ячеек

частицы алюминия сохранили первоначальную форму и размеры. Общая поверхностная пористость пленки, определенная с помощью программного обеспечения «Morphology» (фирмы Tescan) составила 65%.

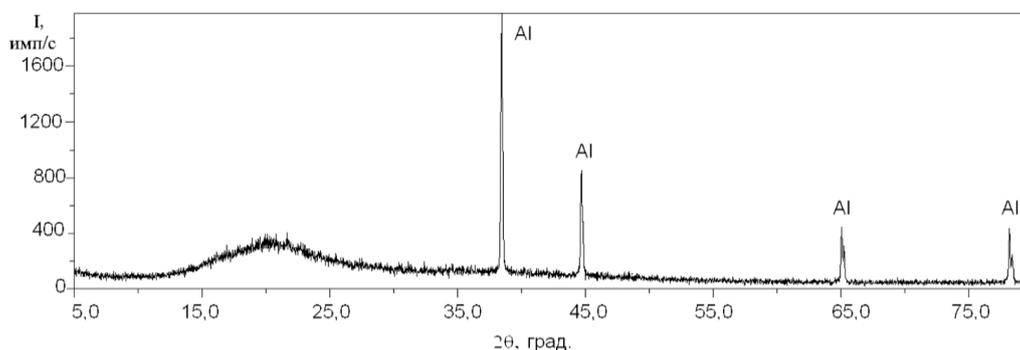


Рис. 4 - Дифрактограмма пленки с ячейками (Na-КМЦ + Al+бемит)

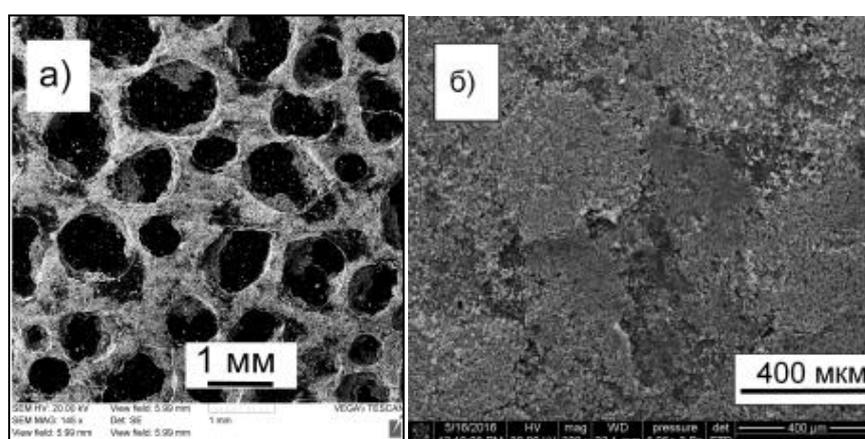


Рис. 5 - Поверхность пористой пленки (Na-КМЦ + Al+бемит) – (а); пленка с порами, заполненными порошком MoS_2

Поверхность пленки с порами, заполненные MoS_2 , показана на рис. 5, б. Порошок MoS_2 относительно плотно упакован в поры. В процессе работы пары трения, по мере повышения температуры, порошок дисульфида молибдена «выдавливается» из пор и заполняет смазочной пленкой поверхность металлоорганической матрицы. Слоистая структура MoS_2 обеспечивает "легкое" скольжение трущихся поверхностей относительно друг друга, способствуя снижению коэффициента трения и повышению износостойкости поверхности деталей.

Проведены исследования и испытания пар трения всухую. Материал образцов и исходное состояние поверхности приведены в таблице 2. Контртело изготовлено из стали 47ГТ. Изменение коэффициента трения K_T по времени (τ) показано на рис. 6, а. Анализируя результаты исследований можно отметить, что K_T для образца 2, защищенного пористым покрытием с MoS_2 уменьшается на 30% по сравнению с коэффициентом трения для стальной поверхности. В процессе работы пары трения образец номер 1, без покрытия, разогревается интенсивнее (рис. 6, б). Это объясняется более высокой теплопроводностью алюминия и дисульфида молибдена по сравнению со сталью, и как следствие, лучшим отводом теплоты от стальной поверхности посредством композиционного покрытия. Сила трения для образцов с покрытиями снижается на 5-10 Н (рис. 6, в).

Таблица 2 - Материал образцов и исходное состояние поверхности

Номер образца	Материал образцов	Исходное состояние поверхности
1	Сталь 08кп	шлифованная
2	Сталь 08кп	покрытие Na-КМЦ+Al+ MoS_2

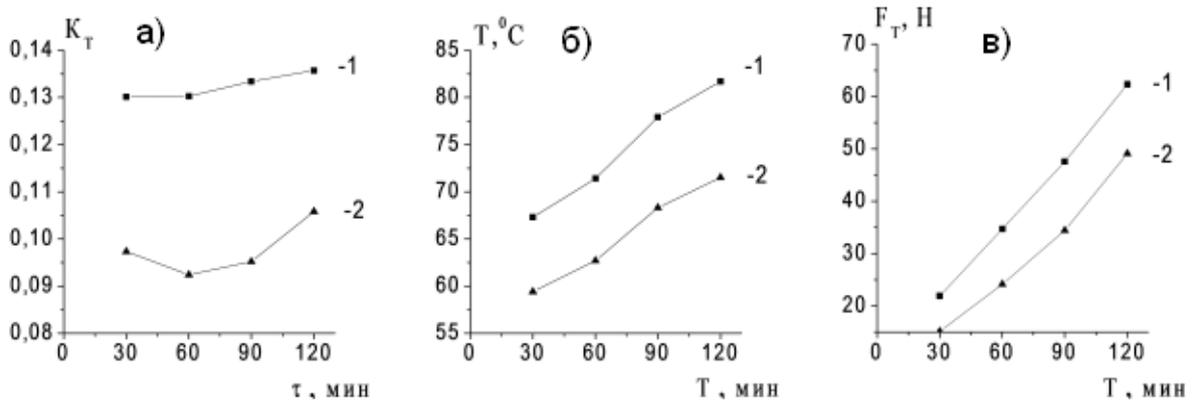


Рис. 6 - Изменение по времени для образцов 1-2: коэффициента трения K_T – (а); температуры образца (Т) – (б); силы трения (F_T) – (в)

Результаты исследований износостойкости от продолжительности испытаний приведены на гистограмме, на рис. 7. Повышенный линейный износ образцов в течение первых 30 минут испытаний объясняется наличием неровностей, как на образцах, так и на поверхности контртела, однако после выравнивания поверхностей износ заметно снижается. Износ покрытых образцов в течение первого часа идет активнее, чем у стали затем, по истечении 90 минут, снижается. После истирания образец с пленочным покрытием приобретает гладкую, блестящую поверхность, нет следов схватывания, что приводит к увеличению износостойкости.

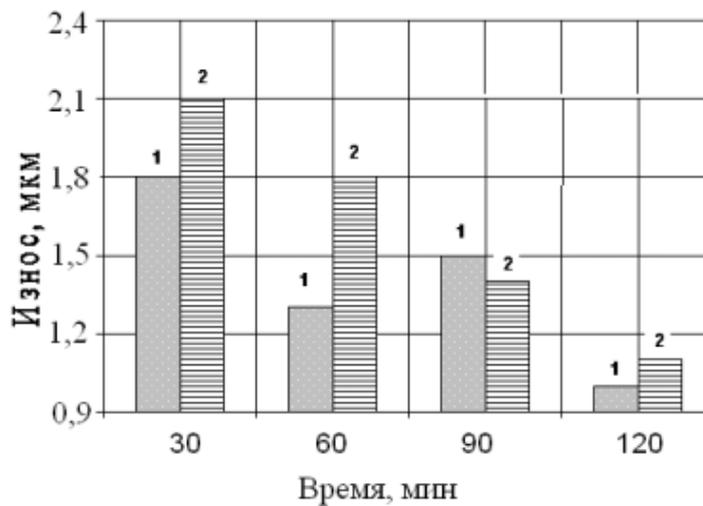


Рис. 7 - Диаграмма изнашивания исходных и покрытых образцов 1-3

Термический анализ покрытия на основе Na – КМЦ с порошком алюминия, бемитом и дисульфидом молибдена, проведенный методами ДСК показал, что термодеструкция покрытия начинается при температуре 306,00°C. Потере воды при нагреве в исследуемом образце соответствует эндотермический пик, а деструкции органического полимера – экзотермический пик. Следует отметить, что в процессе нагрева, происходит, видимо, лишь термическая деструкция целлюлозных компонентов. Вторая стадия, соответствующая деструкции лигнина (при температуре ~370 °C), на термограмме отсутствует. Термическим порогом разрушения для покрытия - Na-КМЦ+Al+ MoS₂, является температура 300,00-306,00°C.

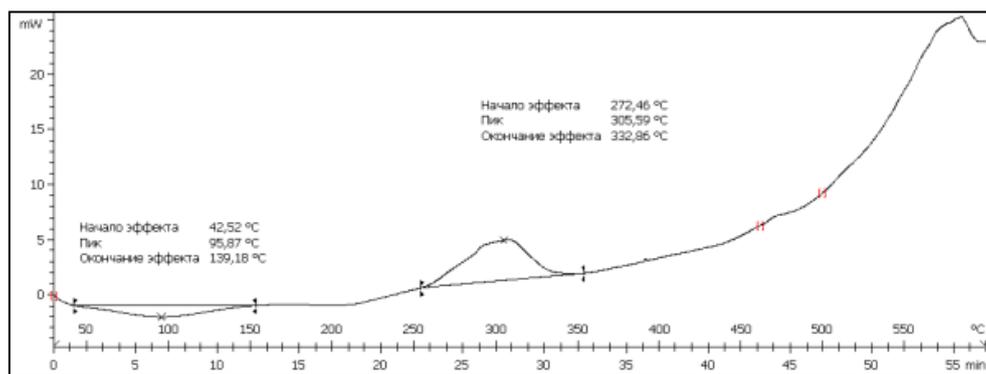


Рис. 8 - Термограмма покрытие Na-КМЦ+Al+ MoS₂

Испытания покрытия Na-КМЦ+Al+ MoS₂ в статических средах показали, что покрытия отличаются хорошей устойчивостью к органическим растворителям, лакам, маслам. Инертность буферной матрицы к смазкам, возможность создавать матрицы с ячейками заданного размера, позволяет использовать для заполнения широкий спектр смазочных материалов с различными свойствами и дисперсность, управляя тем самым требуемыми антифрикционными свойствами.

Заключение:

- Разработаны новые пористые композиционные материалы на основе полимера натрий - карбоксиметилцеллюлозы с микрочастицами порошка алюминия и наночастицами бемита. Методами РФА и ИК - спектроскопии установлено, что химический состав композиции в процессе отверждения остается неизменным.

- Показана перспективность использования разработанных композитов в качестве буферных матриц для создания антифрикционных покрытий. Заполнение пор смазочным материалом – дисульфидом молибдена позволяет понизить коэффициент трения, способствует увеличению теплопроводности покрытия и износостойкости.

Библиографический список:

1. **Н. М. Антонова, О. С. Овчинников, А. П. Бабичев.** Исследование влияния наночастиц алюминия и нановолокон бемита на генерацию ячеек в композитах на основе полимера Na-КМЦ / Наноинженерия. 2014. № 3, С. 17-22.
2. **N. M. Antonova, A. P. Babichev, V. Yu. Dorofeev.** Regularities of Formation of the Structure of Al-containing Nanocomposites upon Interaction of ASD-6 Powder with Polymer Suspension./ Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. -2013. Vol. 49, № 7. P. 868-872.
3. **Петропавловский Г.А.** Гидрофильные частично замещенные эфиры целлюлозы и их модификация путем химического сшивания. Л.: Наука, 1988. 298 с.

Bibliography:

1. **N.M. Antonova, O.S. Ovchinnokov, A.P. Babichev.** The study of influence nanoparticles and nanofibres of boehmite on the generation of pore-cell in the composites based on polymer Na-CMC / Nanoengineering. 2014. №3, PP. 17-22.
2. **N. M. Antonova, A. P. Babichev, V. Yu. Dorofeev.** Regularities of Formation of the Structure of Al-containing Nanocomposites upon Interaction of ASD-6 Powder with Polymer Suspension./ Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. -2013. Vol. 49, № 7. P. 868-872.
3. **G. A. Petropavlovskii,** Hydrophilic Partly Substituted Cellulose Ethers and Their Modification by Means of Chemical Cross-Linking (Nauka, Leningrad, 1988).

УДК 539.3 : 621.891; 678.5

**ОБЪЕМНАЯ ПЛОТНОСТЬ ЭНЕРГИИ ДЕФОРМАЦИИ В ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИТАХ С НАПОЛНЕННЫМИ СМАЗКОЙ
СФЕРИЧЕСКИМИ МИКРОКАПСУЛАМИ И ДИСПЕРСНЫМИ
ВКЛЮЧЕНИЯМИ БЕСЩЕЛОЧНОГО СТЕКЛА***

В.В. Бардушкин¹, А.И. Сорокин¹, А.П. Сычев^{2,3}

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Россия, Москва;

²Ростовский государственный университет путей сообщения,
Россия, Ростов-на-Дону;

³Южный научный центр РАН, Россия, Ростов-на-Дону

Покрyтия (лаки) с применением технологий капсулирования находят все большее применение в триботехнике. Их используют, в частности, для улучшения антифрикционных и антикоррозионных свойств контактирующих поверхностей [1]. Так, например, фирмой Vachem (Германия) разработан новый тип антифрикционных лаков с равномерно распределенными в них шарикоподобными микрокапсулами, наполненными смазочным веществом. Микрокапсулы выделяют смазку лишь при наличии нагрузок на поверхностях трения, при этом образуется высокоэффективная смазывающая пленка с длительным сроком эксплуатации. В процессе использования покрытий с микрокапсулами они находятся в сложном напряженно-деформированном состоянии. Поэтому при разработке подобных лаков актуальной становится задача прогнозирования их физико-механических (в частности, упругих) свойств [2, 3]. В работе [3] была решена задача численного моделирования эксплуатационных (эффективных) упругих свойств полимерных композитов с наполненными смазкой сферическими микрокапсулами и дисперсными включениями бесщелочного стекла. Однако наряду с эффективными характеристиками важной проблемой является прогнозирование локальных (внутренних) упругих свойств подобных материалов [2, 4, 5]. Одной из важнейших локальных упругих характеристик неоднородных сред является объемная плотность энергии деформации [2]

$$E(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} \varepsilon_{ij}(\mathbf{r}) \sigma_{ij}(\mathbf{r}) \quad (1)$$

В формуле (1) \mathbf{r} – радиус вектор случайной точки среды; $\varepsilon_{ij}(\mathbf{r})$, $\sigma_{ij}(\mathbf{r})$ ($i, j = 1, 2, 3$) – компоненты соответственно тензоров деформаций ε и напряжений σ , произведение которых понимается как свертка по соответствующим индексам. Прогнозирование значений указанной энергетической характеристики в отдельном элементе неоднородности в зависимости от состава, структуры, геометрической формы и концентрации компонентов, а также вида и величины механического (или температурного) воздействия, позволяет учитывать перераспределение $E(\mathbf{r})$ в неоднородной среде.

Воспользовавшись обобщенным законом Гука

$$\varepsilon_{ij}(\mathbf{r}) = s_{ijkl}(\mathbf{r}) \sigma_{kl}(\mathbf{r}),$$

где $s_{ijkl}(\mathbf{r})$ ($i, j, k, l = 1, 2, 3$) – компоненты тензора податливости $s(\mathbf{r})$, соотношение (1) можно записать следующим образом:

$$E(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} s_{ijkl}(\mathbf{r}) \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \sigma_{ij}(\mathbf{r}) \quad (2)$$

* Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 14-08-00654-а и 16-08-00262-а.

Для анализа распределения значений объемной плотности энергии $E(\mathbf{r})$ необходимо установление связи между напряжениями $\sigma_{ij}(\mathbf{r})$ в каждом элементе неоднородности и средним (внешним) напряжением $\langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$, приложенным ко всему композиту (угловые скобки здесь и далее определяют процедуру статистического усреднения, которая при выполнении гипотезы эргодичности совпадает с усреднением по объему [2, 6]). Подобную связь можно установить с помощью безразмерного оператора концентрации напряжений $K^\sigma(\mathbf{r})$ (тензора четвертого ранга) [2, 4, 5]

$$\sigma_{ij}(\mathbf{r}) = K_{ijkl}^\sigma(\mathbf{r}) \langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle \quad (3)$$

Тогда, учитывая (3), выражение (2) можно переписать следующим образом:

$$E(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} s_{ijkl}(\mathbf{r}) K_{klmn}^\sigma(\mathbf{r}) \langle \sigma_{mn}(\mathbf{r}) \rangle K_{ijpq}^\sigma(\mathbf{r}) \langle \sigma_{pq}(\mathbf{r}) \rangle \quad (4)$$

Для проведения корректного анализа локальной концентрации напряжений $K^\sigma(\mathbf{r})$ в композите, позволяющего учитывать взаимодействие элементов неоднородности, состав, структуру материала, форму и концентрацию включений необходимо решать уравнения равновесия упругой неоднородной среды. Однако в общем случае получить соотношение для численных расчетов оператора концентрации напряжений $K^\sigma(\mathbf{r})$ не удастся. Поэтому для его вычисления используются различные приближения. Одним из таких приближений, учитывающих перечисленные выше факторы, является обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей [6]. В его рамках используется только сингулярная составляющая тензора Грина уравнений равновесия, зависящая лишь от дельта-функции Дирака, а также вводится однородное тело сравнения, материальные константы которого входят в окончательное выражение для вычисления $K^\sigma(\mathbf{r})$. Физический смысл обобщенного сингулярного приближения заключается в предположении однородности полей напряжений и деформаций в пределах элемента неоднородности. В этом случае выражение для $K^\sigma(\mathbf{r})$ имеет следующий вид (индексы опущены) [2, 4, 5]:

$$K^\sigma(\mathbf{r}) = c(\mathbf{r}) (I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r}))^{-1} \left\langle c(\mathbf{r}) (I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r}))^{-1} \right\rangle^{-1}, \quad (5)$$

где $c(\mathbf{r})$ – тензор модулей упругости; двумя штрихами обозначена разность между соответствующими параметрами неоднородной среды и однородного тела сравнения, характеристики которого обозначаются далее верхним индексом «с»: $c''(\mathbf{r}) = c(\mathbf{r}) - c^c$; $g(\mathbf{r})$ – интеграл от сингулярной составляющей второй производной тензора Грина уравнений равновесия, являющийся тензором четвертого ранга. Для вычисления компонент g_{ijkl} тензора $g(\mathbf{r})$ необходимо вначале осуществить расчеты компонент a_{iklj} тензора четвертого ранга A , а затем в a_{iklj} по двум парам индексов (i, j и k, l) провести операцию симметризации [6]. Компоненты a_{iklj} тензора A вычисляются с помощью следующего соотношения:

$$a_{iklj} = -\frac{1}{4\pi} \int n_k n_j t_{il}^{-1} d\Omega, \quad (6)$$

где $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$ – элемент телесного угла в сферической системе координат, t_{il}^{-1} – элементы матрицы, обратной матрице T с элементами $t_{il} = c_{iklj}^c n_k n_j$, а n_k и n_j ($k, j = 1, 2, 3$) – компоненты вектора внешней нормали к поверхности включения. Для эллипсоидальных

включений с главными полуосями l_1 , l_2 и l_3 компоненты вектора нормали определяются соотношениями

$$n_1 = \frac{1}{l_1} \sin \theta \cos \varphi, \quad n_2 = \frac{1}{l_2} \sin \theta \sin \varphi, \quad n_3 = \frac{1}{l_3} \cos \theta$$

Анализ соотношения (5) показывает, что при оценке локального напряженно-деформированного состояния неоднородной среды при помощи оператора концентрации напряжений исключается информация о виде внешнего механического воздействия, т.к. $K^\sigma(\mathbf{r})$ зависит только от материальных параметров среды и структуры материала.

Далее в работе рассматривались композиты с включениями двух типов. К первому типу относились микрокапсулы с минеральным маслом в качестве смазочного материала (объемный модуль 1,75 ГПа, плотность 0,94 г/см³ [7]), равномерно распределенные в пространстве композита. Ко второму типу относились дисперсные включения бесщелочного стекла (БЩС), также равномерно распределенные в пространстве композита и выполняющие функцию его упрочнения. Для БЩС при моделировании полагалось, что модуль Юнга равен 76,2 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,22, плотность – 2,54 г/см³ [7, 8]. В качестве матрицы – компонент третьего типа – рассматривалось известное и широко применяемое на практике эпоксидное связующее УП-610 (модуль Юнга 5,2 ГПа, коэффициент Пуассона 0,41, плотность 1,25 г/см³ [7, 9]).

В случае выполнения условия эргодичности можно использовать усреднение по объему (для каждого компонента композита) [2, 6]. Тогда операция усреднения по всему объему материала для некоторой случайной величины $a(\mathbf{r})$ сводится к суммированию:

$$\langle a(\mathbf{r}) \rangle = \sum_s v_s \langle a_s(\mathbf{r}) \rangle \tag{7}$$

где v_s – объемная концентрация компонента s -го типа, а $a_s(\mathbf{r})$ – соответствующая

указанному компоненту случайная величина, $\sum_s v_s = 1$. При проведении численного моделирования полагалось, что:

- компоненты модельных композитов изотропны;
- сферическая оболочка микрокапсул не оказывает влияния на свойства трибоматериалов;
- дисперсные микрокапсулы и включения БЩС имеют форму сфер одинакового радиуса $r = 1$.

С учетом (7), соотношение (5) для оператора концентрации напряжений в компоненте композита s -го типа ($s = 1, 2, 3$) примет следующий вид:

$$K_s^\sigma = c_s \left[I - g_s (c_s - c^c) \right]^{-1} \left\{ \sum_{i=1}^3 v_i c_i \left[I - g_i (c_i - c^c) \right]^{-1} \right\}^{-1} \tag{8}$$

где c_s – тензор модулей упругости s -го компонента композита; g_s – тензор $g(\mathbf{r})$, соответствующий s -му компоненту композита, вычисляемый с помощью соотношения (6) и последующей процедуры симметризации при $l_1 = l_2 = l_3 = 1$.

При вычислении упругих характеристик однородного тела сравнения использовался метод самосогласования [2, 6]. С этой целью в работе была организована итерационная процедура, в которой в качестве параметров c^c тела сравнения брались значения тензора модулей упругости (в матричной форме записи), полученные на предыдущем шаге итерации. В качестве начальных значений параметров тела сравнения брались упругие характеристики,

полученные в приближении Фойгта $c_{\text{Voight}} = \sum_s v_s c_s$ [6]. Выход из итерационной процедуры осуществлялся, когда максимальная разница между модулями c^c составляла менее 0,01.

По соотношению (4), с учетом (8), были проведены модельные расчеты зависимости объемной плотности энергии деформации $E(\mathbf{r})$ от концентрации включений и вида приложенного внешнего воздействия для модельных трибокомполитов. При этом внешнее воздействие $\langle \sigma \rangle$ (МПа) описывалось матрицей

$$\langle \sigma \rangle = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix}$$

Были рассмотрены три частных случая напряжений $\langle \sigma \rangle$: одноосное ($\sigma_{11} = 1$, $\sigma_{22} = \sigma_{33} = 0$); двуосное ($\sigma_{11} = \sigma_{22} = 1/2$, $\sigma_{33} = 0$); трехосное ($\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33} = 1/3$).

В операциях над тензорами использовалась их матричная форма записи [6]. При этом в (4) для получения элементов s_{ij} ($i, j = 1, \dots, 6$) матрицы s тензора податливости компонентов 2-го и 3-го типов (БЩС и УП-610) пользовались тем, что $s = c^{-1}$. С учетом вырожденности матрицы c тензора модулей упругости компонента 1-го типа (смазочный материал) при проведении модельных расчетов для ненулевых элементов матрицы s полагалось, что $s_{11} = s_{22} = s_{33} = c_{11}^{-1}$, $s_{44} = s_{55} = s_{66} \rightarrow \infty$ [6].

Плотность энергии $E(\mathbf{r})$ имеет различные значения в отдельном элементе неоднородности каждого типа. Поэтому на рисунках 1 – 3 представлены расчетные кривые, описывающие зависимости $E(\mathbf{r})$ от концентрации изотропных компонентов в отдельном элементе неоднородности модельных композитов от изменений процентных содержаний (по массе) микрокапсул со смазочным материалом (m_1) и дисперсных включений БЩС (m_2). Номера кривых соответствуют типам компонентов модельных трибокомполитов (1 – смазочный материал, 2 – БЩС, 3 – связующее УП-610). Процентное содержание по массе m_s s -го компонента связано с объемными концентрациями v_s и плотностями ρ_s компонентов композита с помощью формулы

$$m_s = \frac{v_s \rho_s}{\sum_i v_i \rho_i} \cdot 100\%$$

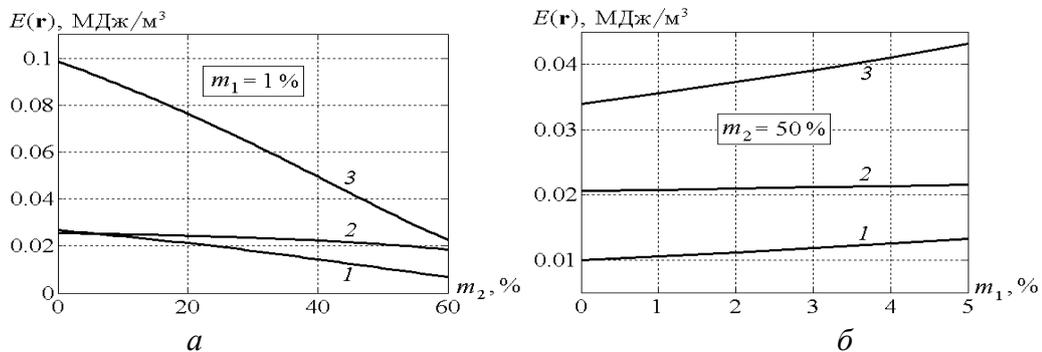


Рис. 1. Зависимости $E(\mathbf{r})$ от процентной концентрации компонентов при внешнем воздействии $\sigma_{11} = 1$, $\sigma_{22} = \sigma_{33} = 0$ (МПа)

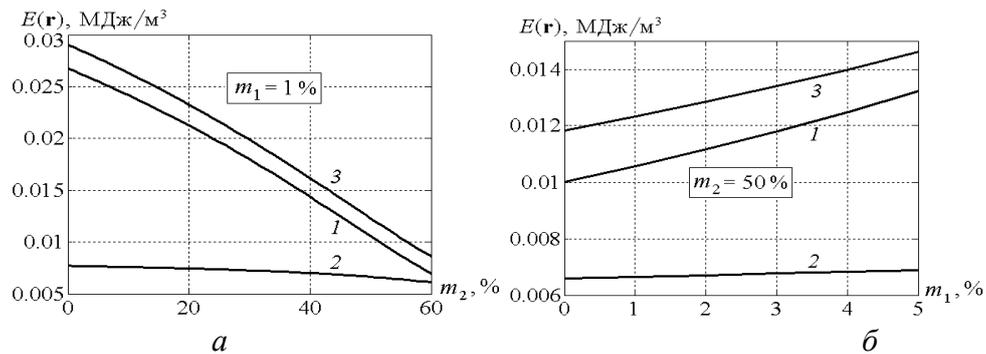


Рис. 2. Зависимости $E(\mathbf{r})$ от процентной концентрации компонентов при внешнем воздействии $\sigma_{11} = \sigma_{22} = 1/2$, $\sigma_{33} = 0$ (МПа)

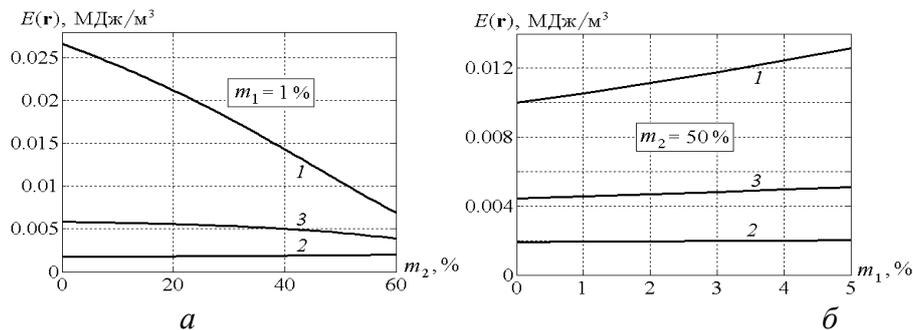


Рис. 3. Зависимости $E(\mathbf{r})$ от процентной концентрации компонентов при внешнем воздействии $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33} = 1/3$ (МПа)

На основании проведенных исследований зависимостей значений объемной плотности энергии деформации от изменений концентраций элементов неоднородности можно заключить следующее.

Увеличение концентрации включений БЩС (при фиксированном процентном содержании микрокапсул) приводит к уменьшению значений $E(\mathbf{r})$ во включениях из смазочного материала и в связующем УП-610 при незначительном изменении значений $E(\mathbf{r})$ во включениях БЩС. Кроме того, значения $E(\mathbf{r})$ во включениях и в связующем имеют тенденцию к сближению. Это показывает, что увеличение в допустимых пределах концентрации БЩС приводит к большей совместимости компонентов композита и, как следствие, к улучшению эксплуатационных характеристик изделий, использующих подобные антифрикционные покрытия в узлах трения.

Увеличение процентного содержания смазочного материала (при фиксированной концентрации включений БЩС) приводит к увеличению значений $E(\mathbf{r})$ во всех типах элементов неоднородности. Кроме того, значения $E(\mathbf{r})$ во включениях и в связующем имеют тенденцию к «расхождению». Это показывает, что увеличение концентрации микрокапсул смазочного вещества приводит к уменьшению совместимости компонентов композита и, как следствие, к ухудшению эксплуатационных характеристик изделий, использующих подобные антифрикционные покрытия в узлах трения.

Поэтому необходимы дополнительные экспериментальные исследования по оптимизации процентного содержания компонентов антифрикционного композитного покрытия с целью максимального улучшения трибохарактеристик рассматриваемых материалов без существенного снижения их упруго-прочностных показателей.

Библиографический список:

1. **Гульков, Г.И.** Методическое пособие к курсовому проектированию по СПТ. – Г.И. Гульков, Н.М. Улащик. – Минск 2007 – 90 с.
2. **Чебовский, О.Г.** Силовые полупроводниковые приборы: Справочник / О.Г. Чебовский, Л.Г. Моисеев, Р.П. Недошивин. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. **Руденко, В.С.** Основы преобразовательной техники: / В.С. Руденко, В.И. Сенько, И.М. Чиженко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: «Высшая школа», 1980.
4. **Розанов, Ю.К.** Основы силовой преобразовательной техники. – М.: Энергия, 1979. – 392 с.
5. **Акимов, Н.Н.** Резисторы. Конденсаторы. Трансформаторы. Дроссели. Коммутирующие устройства. РЭА: Справочник / Н.Н. Акимов, Е.П. Ващуков, В.А. Прохоренко, Ю.П. Ходоренок. – Мн. «Беларусь», 1994.
6. **Шапшал, С.М.** Методические указания к курсовому проекту по дисциплине «Теория локомотивной тяги» / С.М. Шапшал, А.С.Шапшал, А.В.Донченко, А.В.Илларионов. – Ростов н/Д: Рост.гос. ун-т путей сообщения, 2003. – 51 с
7. **Титце, У.** Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк / 12-е изд. Том 1: Пер.с нем. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 832с.:ил

Bibliography:

1. **Golikov, G. I.** Methodical manual for course design in SPT. / G. I. Golikov, N. M. Ulashchik. – Minsk 2007 – 90 C.
2. **Cebulski, O. G.** etc. of Power semiconductor devices: the manual / O. G. Cebulski, L. G. Moses, R. P., Nedoshivin. 2-e Izd., revised. and add., Moscow: Energoatomizdat, 1985.
3. **Rudenko, V. S** Basics of converters: / V. S. Rudenko, V. I. Senko, I. M. Chizhenko placed seconds. – 2nd ed. Rev. and extra – M.: "Highest school", 1980.
4. **Rozanov, J. K.** fundamentals of power converters. – M.: Energy, 1979. – 392 p.
5. Akimov, N.N. Resistors. Capacitors. Transformers. Inductors. Switching device. REA: Reference / N.N. Akimov, E. P. Mashukov, A. V. Prokhorenko, Yu. P. Khodarenok. – Mn. "Belarus", 1994.
6. **Shapshal, S. M.** Methodical instructions to the course project on discipline "the Theory of locomotive traction" / S. M. Shapshal, A. S. Shapshal, A. V., Donchenko, A. V. Illarionov. – Rostov n/D: Growth.state. Univ of Railways, 2003. – 51 with
7. **Tietze, U.** Semiconductor circuitry. / U. Tietze, K Schenk / 12th ed. Fact 1: Per.with it. – M.: DMK Press, 2008. – 832с.:Il

УДК 621.793

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПАР ТРЕНИЯ СОЧЕТАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ГИПЕРЗВУКОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ И ТРИБОМОДИФИЦИРОВАНИЯ

М.А. Белоцерковский, В.И. Жорник, А.П. Яловик
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

Одним из наиболее эффективных путей решения задачи повышения ресурса и улучшения работоспособности пар трения скольжения, эксплуатирующихся при повышенных удельных нагрузках, является использования композиционных пластичных смазок в сочетании с технологиями, обеспечивающими формирование металлических покрытий

толщиной 0,05 – 0,5 мм методами газотермического напыления порошковых или проволочных материалов [1, 2].

Покрyтия из цветных металлов и низколегированных сталей, которые, как правило, мягче стальных или чугунных деталей, позволяют сравнительно легко обеспечить правило положительного градиента, согласно которому, процесс деформирования отдельных, наиболее нагруженных участков поверхностей трения, должен проходить только в поверхностных слоях, не вовлекая в деформацию ниже расположенные слои. Однако данные покpытия невозможно использовать в тяжело нагруженных узлах трения, поскольку интенсивность изнашивания и коэффициент трения начинают резко возрастать при нагрузках свыше 32 - 35 МПа, а при нагрузках более 40 МПа детали выходят из строя в результате катастрофического изнашивания.

Наиболее рациональным в данном случае представляется использование методов, обеспечивающих комплексное улучшение физико-механических и эксплуатационных свойств покpытий в узлах трения скольжения за счет деформационных структурно-фазовых превращений и метастабильных состояний, образующихся в поверхностных слоях в процессе приработки и дальнейшей эксплуатации. Данный принцип реализуется в технологии [3], предусматривающей газотермическое напыление стального покpытия и приработку в узле трения в присутствии жидкой смазки, содержащей ультрадисперсные добавки твердых неорганических материалов. Кроме того, существует метод приработки, использующий пластичные консистентные смазки, содержащие ультрадисперсный порошок алмазграфитовой шихты [4]. Оба этих метода рекомендуются для обеспечения долгосрочной эксплуатации покpытий в трибосопряжениях, однако отсутствует информация о возможности их применения при удельных нагрузках свыше 60 МПа.

Целью проведенных исследований, результаты которых представлены в данной работе, явилось изучение особенностей процесса приработки в различных композиционных смазках покpытий, наносимых на тяжело нагруженные детали узлов трения скольжения методом гиперзвуковой металлизации [2]. Технология гиперзвуковой металлизации отличается от традиционной электрометаллизации использованием непрерывного источника энергии для нагрева газа, распыляющего расплавленные в дуге проволоки. В процессе ГМ распыление жидкого металла, образующегося в результате теплового воздействия электрической дуги на торцы двух проволочных электродов, производится струей продуктов сгорания пропано-воздушной смеси. При этом скорость струи на выходе из сопла достигает 1500 м/с при температуре 2200К.

Для формирования покpытий гиперзвуковой металлизацией (ГМ) использовалась установка АДМ-8. Распылялась проволока диаметром 2 мм из стали мартенситного класса (сталь 40X13). Используемые смазочные материалы: смазка ИТМОЛ-150Н с алмазосодержащим пакетом присадок ША-А, смазка И-20А, наполненная шихтой алмазосодержащей «ША-А» (ТУ РБ 100056180.003 – 2003) или алмазо-графитовой смесью УДА-ГО-СП. Исследование фазовых и структурных превращений в поверхностных слоях покpытий проводилось с помощью рентгеноструктурного анализа (ДРОН-3,0). Триботехнические испытания покpытий проводились в условиях граничного трения при давлениях 10 – 100 МПа по схеме возвратно-поступательного движения при средней скорости взаимного перемещения 0,1 м/с. Контртело – сталь У8 (HV = 7800 – 8000 МПа). Испытания при давлениях 10 – 30 МПа осуществлялись на трибометре АТВП, при давлениях 50 – 100 МПа использовался трибометр МТВП-9М. Интенсивность изнашивания оценивали методом искусственных баз.

Как было ранее нами отмечено [3], повышенная задиростойкость трибосопряжения, содержащего деталь с нанесенным распылением стальной легированной проволоки покpытием, обеспечивается, в первую очередь, пластичностью покpытия в начальный период трения для ускорения процесса приработки и, в ходе дальнейшей работы узла, высокой износостойкостью, твердостью, адгезией к жидким смазкам. Это возможно только в том случае, когда в сталях сформирована двухфазная структура, содержащая метастабильный

аустенит, имеющий твердость 200 – 300 HV, а также имеется определенное количество оксидов. В процессе приработки вследствие интенсивной пластической деформации метастабильный аустенит трансформируется в износостойкий и твердый мартенсит (HV=700...800) за счет протекания деформационного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения.

Гиперзвуковая металлизация при напылении стали 40X13 обеспечивает формирование плотных покрытий (пористость $\cong 2-4\%$) с относительно высоким уровнем твердости (HV=3500 МПа) и повышенным содержанием продуктов окисления. Содержание остаточного аустенита в модифицированном слое находится на уровне $V_{\gamma} \approx 20$ об. %.

Триботехнические испытания покрытий с присутствием жидкой смазки И-20А с алмазосодержащими присадками показали (таблица 1), что в процессе приработки при удельных нагрузках более 40 МПа смазка выдавливается из зоны трения.

Таблица 1 – Усредненная интенсивность изнашивания стальных покрытий в процессе приработки в среде смазки И-20А с алмазосодержащей шихтой

Удельная нагрузка приработки, МПа	Скорость скольжения при приработке, м/с	Интенсивность изнашивания в процессе приработки, I·10 ⁻⁹
35	0,4	4,2
35	0,8	4,4
35	1,0	4,5
37	0,4	4,3
38	0,4	4,8
39	0,4	5,4
40	0,4	6,0
41	0,4	6,8
42	0,4	7,7
43	0,4	Задиры, смазка выдавливается из зоны трения

Это приводит к резкому увеличению интенсивности изнашивания покрытия и задирам.

При использовании смазки ИТМОЛ-150Н с алмазосодержащим пакетом присадок ША-А наблюдался устойчивый процесс приработки, при этом в поверхностном слое покрытия формируется наноразмерная субструктура, характеризующаяся размером субзерен ≤ 100 нм. Образование в поверхностях трения наноразмерной субзеренной структуры вследствие присущих ей чрезвычайно высоких пластических свойств, приводит к эффективному поглощению энергии фрикционного взаимодействия при трении и облегчает приработку контактирующего сопряжения. Следовало ожидать, что процесс фрикционного модифицирования, сопровождающийся измельчением формирующейся в поверхностях трения субзеренной структуры, обеспечить повышенные триботехнические свойства покрытий.

Исследование взаимосвязи исходной шероховатости поверхности трения с продолжительностью этапа приработки выявило существенное влияние удельной нагрузки на протекание процесса приработки (таблица 2), в частности, при удельной нагрузке 10 МПа стабилизация коэффициента трения наступает после 450 – 500 м пути трения, при этом наблюдается слабая зависимость пути трения до стабилизации коэффициента трения от исходной шероховатости поверхности, и минимальные значения пути приработки в этом случае имеют место при исходных параметрах шероховатости в пределах $Ra = 2,5-5,0$ мкм. При повышении удельной нагрузки в зоне контакта до 30МПа и более длительность приработки сокращается, и роль исходной шероховатости поверхности в процессах приработки резко возрастает. При этом зависимости пути трения до завершения приработки от параметров исходной шероховатости имеют ярко выраженные минимумы, которые

находятся для давления 30 МПа в области $Ra = 0,63-1,25$ мкм, для давления 50 МПа – в области $Ra = 0,32-0,63$ мкм. Путь трения покрытий с $Ra = 0,32-0,63$ мкм при приработке с удельной нагрузкой 30 МПа составляет 260-270 м, а для удельной нагрузки 50 МПа – 240-250 м.

Увеличение пути приработки при большой исходной шероховатости поверхности и повышенных давлениях в зоне контакта обусловлено появлением разрывов в масляной пленке и возможностью металлического контакта, сопровождающихся явлениями схватывания, вырывов на поверхности покрытия, что затрудняет протекание процессов приработки пары трения.

Таблица 2 – Зависимость пути трения до завершения приработки от исходной шероховатости поверхности покрытий

Исходная шероховатость, мкм	Путь трения до завершения приработки (м) при различных удельных нагрузках		
	10 МПа	30 МПа	50 МПа
0,16	480	260	250
0,32	470	255	240
0,63	460	250	245
1,25	450	260	265
2,5	440	265	300
5,0	440	315	400
10,0	450	370	510

Проведенные испытания пары трения в среде смазки Литол-24 с различным содержанием алмазографитовой добавки ША-А показали (таблица 3), что при удельной нагрузке в зоне трибоконтакта 30-50 МПа наиболее высокие значения по износостойкости покрытий зафиксированы при концентрации ША-А 0,75-1,0 мас.% и составляют $I = (3,5-3,8) \cdot 10^{-9}$. При удельной нагрузке 10 МПа интенсивность изнашивания несколько больше и соответствует значениям $I = (4,2-4,4) \cdot 10^{-9}$, при этом зависимость износостойкости поверхности от концентрации модификатора в смазке менее заметна.

Таблица 3 - Усредненная интенсивность изнашивания покрытий в процессе приработки в присутствии модифицированной смазки Литол-24 с различным содержанием ША-А

Удельная нагрузка, МПа	Интенсивность изнашивания, $I \cdot 10^{-9}$					
	Концентрация УДАГ, мас.%,					
	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
10	4,9	4,6	4,4	4,2	4,3	5,8
30	5,7	4,5	3,7	3,5	5,7	6,1
50	5,6	4,1	3,8	4,0	6,9	7,2

Вероятной причиной подобных результатов может являться недостаточный уровень контактных напряжений при удельной нагрузке 10 МПа для модифицирующего воздействия на поверхностные слои. Повышенный износ в области концентраций модификатора менее 0,75 мас.% и более 1,0 мас.% при удельных нагрузках 30 и 50 МПа может объясняться, по всей видимости, недостаточными физико-механическими и реологическими свойствами

смазочного материала, приводящими к выдавливанию смазочного слоя из зоны контакта и возникновению металлического контакта и повышенного износа в этих случаях.

Из полученных результатов испытаний следует, что повышение концентрации наноразмерной алмазно-графитовой добавки ША-А в пределах $C_a = 0,25-2,0$ мас.% и увеличение удельной нагрузки в зоне трения в диапазоне $p = 10-50$ МПа при определенных их соотношениях снижают продолжительность приработки пары трения «ГМ-покрытие – сталь У8», исчисляемой в пути трения, с $l = 750-1070$ м до $l = 570-920$ м. При этом максимальная износостойкость приработанного ГМ-покрытия ($I_h = 3,5 \cdot 10^{-9}$) наблюдается в случае приработки пары трения «ГМ-покрытие – сталь У8» в смазочной композиции с концентрацией наноразмерной шихты ША-А, соответствующей $C_a = 1,00$ мас.%, при удельной нагрузке $p = 30$ МПа.

Библиографический список:

1. **Белоцерковский, М.А.** Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. – Мн.: Технопринт. – 2004. – 200 с.
2. **Витязь, П.А.** Повышение ресурса трибосопряжений активированными методами инженерии поверхности / П.А. Витязь, В.И. Жорник, М.А. Белоцерковский, М.А. Леванцевич. – Минск: Беларус. навука, 2012, – 452 с.
3. **Белоцерковский М.А.** Способ изготовления детали узла трения скольжения: пат 12982 Респ. Беларусь, МПК С 23 С 28/00 / М. А. Белоцерковский, В. И. Жорник, В. А. Кукареко, А. И. Камко, А.С. Прядко, М. М. Заболоцкий; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. – № а 20081384; заявл. 03.11.08; опубл. 30.04.10 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 2. – С.111.
4. **Камко, А.И.** Технология формирования антифрикционных слоев на рабочих поверхностях шарнирных сопряжений / А.И. Камко // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О.Сухого. – 2007. - №3. – С. 66-74.

Bibliography:

1. **Belocerkovskij, M.A.** Technologii aktivirovannogo gazoplamnennogo napyleniya antifrikcionnykh pokrytij / M.A. Belocerkovskij. – Mн.: Texnoprint. – 2004. – 200 s.
2. **Vityaz', P.A.** Povyshenie resursa tribosopryazhenij aktivirovannymi metodami inzhenerii poverxnosti / P.A. Vityaz', V.I. Zhornik, M.A. Belocerkovskij, M.A. Levance-vich. – Minsk: Belarus. navuka, 2012, – 452 s.
3. Sposob izgotovleniya detali uzla treniya skol'zheniya: pat 12982 Resp. Belarus', MPK S 23 S 28/00 / M. A. Belocerkovskij, V. I. Zhornik, V. A. Kukareko, A. I. Kamko, A.S. Pryadko, M. M. Zabolockij; zayavitel' Ob"edinennyj in-t mashinostroeniya NAN Belarusi. – № а 20081384; zayavl. 03.11.08; opubl. 30.04.10 // Aficyjny byul. / Nac. ce'ntr inte'lektual. ulasnasci. – 2010. – № 2. – S.111.
4. **Kamko, A.I.** Texnologiya formirovaniya antifrikcionnykh sloev na rabochix po-verxnostyax sharnirnyx sopryazhenij / A.I. Kamko // Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta im. P.O.Suxogo. – 2007. - №3. – S. 66-74.

УДК 620.178.169

ВЛИЯНИЕ ВОЛОКНА ОКСАЛОН НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРГАНОПЛАСТИКОВ

¹А. И. Буря, ¹А.-М. В. Томина, ²В. И. Колесников, ²Н.А. Мясникова, ¹Л.В.Доброва

¹Днепропетровский государственный технический университет, Украина

²Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия

Введение

В настоящее время значительно возросла потребность в полимерных материалах (ПМ), обладающих улучшенными свойствами: низким коэффициентом трения в сочетании с высокой прочностью и термостойкостью. Ценный комплекс технологических и эксплуатационных свойств ПМ и композитов на их основе обеспечивает их интенсивное использование в различных отраслях техники [1].

Важную роль в современной технике играют композиционные материалы на основе полимеров, упрочненных высокопрочными волокнами – органопластики (ОП). ОП преимущественно используются при создании деталей конструкционного назначения, где главным фактором является требование минимального веса. В этом отношении они намного превосходят металлы; замена ими металлов дает большую экономию веса. Волокнистый наполнитель несет основную нагрузку в таком материале. ОП на основе ароматических полиамидов относятся к числу наиболее перспективных, что определяется хорошими эксплуатационными характеристиками полимеров и простотой формирования деталей из них [2]. Особый интерес представляют ОП на основе фенилона С–1, армированные термостойкими органическими волокнами (ОВ), в частности полиоксадиазольными [3,4].

Цель работы – Исследование влияния волокна оксалон на физико – механические, теплофизические и трибологические свойства, полученных органопластиков на основе полиамида фенилона С – 1, армированного волокном оксалон.

Объекты и методы исследований

В качестве связующего использовали ароматический полиамид фенилон С – 1. Фенилон С - 1 (ТУ 6-05-221-101-71) — тонкодисперсный порошок розового цвета с насыпной плотностью 0,2—0,3 г/см³, который предназначается для изготовления изделий методом прямого прессования. Свойства фенилона приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Свойства ароматического полиамида фенилон С–1 [5,6]

Показатель	Значение
Плотность, г/см ³ , не более	1,35
Ударная вязкость, кДж/м ² , не менее	20
Предел текучести при сжатии, МПа, не менее	220
Твердость, МПа, не менее	180
Температура размягчения по Вика, К, не ниже	543
Усадка после прессования, %, не более	0,6

Полимерные композиты на основе фенилонов относятся к числу наиболее перспективных полимерных материалов, которые сочетают высокий уровень физико – механических и теплофизических свойств.

В качестве наполнителя использовалось полиоксадиазольное волокно оксалон. Выбор наполнителя определялся с одной стороны, его прочностными и антифрикционными свойствами табл.2, а с другой – химическим сродством к полимерной матрице. Для получения

полиоксадиазольных волокон в качестве мономеров используют фталевые кислоты и гидразинсульфат, а в качестве растворителя – серную кислоту и олеум, доступные и дешевые продукты массового производства.

Синтез полимера проводится в одну стадию (процесс поликонденсации) на обычном оборудовании для производства химических волокон и протекает практически без выбросов вредных веществ в атмосферу.

Главным преимуществом оксалона по сравнению с другими термостойкими волокнами, является доступность и дешевизна исходного сырья, а также простота способов синтеза полимера и формирования волокна, высокая стойкость к действию повышенных температур, огнестойкость, химстойкость, хорошие электроизоляционные свойства.

Таблица 2 - Основные физико–механические и термомеханические свойства полиоксадиазольного волокна оксалон [7]

Показатель	Значение
Плотность, г/см ³	1,43 – 1,44
Прочность при растяжении, сН/текс (МН/м ²)	50 – 70 (7,0 – 9,8)
Относительное удлинение, %	4 – 8
Модуль упругости при 1% удлинении, ГПа	30 – 50
Снижение прочности при повышенной температуре, %	
при 573 К	44 – 50
при 673 К	70 – 80
Диэлектрическая проницаемость	5,0
Коэффициент трения	0,25
Стойкость к истиранию, число циклов	30000 – 40000
Температура стеклования, К	593 – 563

Приготовление композиций на основе фенилона С–1 содержащих 5 – 20% дискретного (3 мм) волокна оксалон, осуществлялось методом сухого смешивания в аппарате с вращающимся электромагнитным полем (0,12 Тл) с помощью ферромагнитных частиц, впоследствии извлекаемых методом магнитной сепарации.

Перед формированием полиамид фенилон С–1 необходимо тщательно высушить. Переработка в изделия невысушенного фенилона ухудшает его прочностные показатели, приводит к образованию поверхностных дефектов (раковин, пузырей и др.). Сушка заготовок производилась в термошкафу SPT – 200 в течении 2 – 3 часов при 473 – 523 К. Таблетка из термошкафа сразу же загружалась в пресс – форму, нагретую до 523 К. После загрузки в пресс – форму материал нагревали до 598 К и выдерживали без давления 10 минут, после чего давали выдержку в 5 минут при давлении 50МПа и той же температуре. Далее изделие охлаждали при постоянном давлении до температуры 543 К и проводили распрессовку.

Исследование структуры разработанных композитов осуществляли на микроскопе «Биолам – М».

Плотность образцов определяли аддитивным и гидростатическим методом согласно ГОСТ 15139-69.

Определение разрушающего напряжения и относительных деформаций при сжатии определяли согласно ГОСТ 4651-78 на испытательной машине FP-100.

Твердость по Бриннелю определяли по методу вдавливания шарика при заданной нагрузке согласно ГОСТ 4670-77 на твердомере ТШСП.

Изучение термостойкости и кинетики термоллиза фенилона С–1 и органопластиков на его основе проводили методом ТГ с использованием дериватографа Q – 1500Д системы Паулик – Паулик – Эрдей венгерской фирмы МОМ в интервале температур 298 – 1273К со скоростью подъема температуры – 283 К/мин, масса образца составляла 200 мг.

Трибологические характеристики изучали в условиях трения без смазки на дисковой машине трения [8] при давлении 0,6 МПа, скорости скольжения 1 м/с. Путь трения составлял 1000 м. Образцы из ОП изготавливали цилиндрической формы $\varnothing=10$, $h=12$ мм; в качестве контртела использовали сталь 45 (45-48 HRC, $R_a=0,16-0,32$ мкм).

Шероховатость образцов измеряли при помощи профилометра 170621, посредством острой и твердой иглы (щупа), что перемещалась по исследуемой поверхности, копируя ее неровности.

Обсуждение результатов исследования

Один из наиболее широко используемых экспериментальных методов определения механических свойств – опыт на сжатие. При достаточно тщательной регистрации результатов исследований, можно получить важную информацию об упругих свойствах материала, характере и величине пластической деформации, прочности и пределе текучести при сжатии.

На рис. 1 приведена зависимость относительная деформация (ε) – прочность при сжатии ($\sigma_{сж}$). Кривые 1 – 3 (фенилон С-1 и органопластики на его основе, содержащие 5 – 10 масс. % волокна), согласно классификации Херцберга [9] относятся к V типу, который характеризует упругое гетерогенно – пластическое поведение. На участке кривых до 150 МПа, наблюдается полностью упругое поведение, материала. Далее форма кривых представляет собой результат конкурентного развития двух процессов. Первый процесс характеризуется пластическим течением, за счет разрушения исходной структуры полимера, результатом чего обычно является падение нагрузки. Второй процесс характеризуется перестройкой разрушенной структуры в новую, за счет накопленных деформационных напряжений. Такой структуре характерны высокие степень ориентированности и прочность. Именно за счет конкурентирования данных процессов и наблюдается изменение угла наклона кривых $\varepsilon - \sigma_{сж}$. Дальнейшее поднятие угла наклона свидетельствует о стадии деформационного упрочнения: большее количество участков полимера приобретает новую структуру, что ведет к возрастанию сопротивления материала.

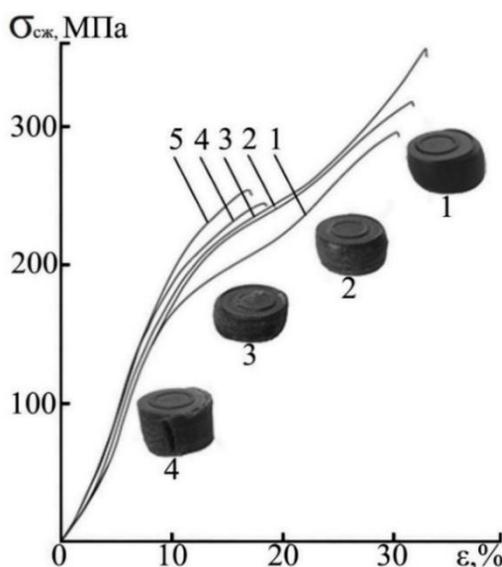


Рис. 1. - Кривые $\sigma_{сж}-\varepsilon$ фенилона С-1 (1), и органопластиков, армированных 5(2); 10(3); 15(4); 20(5) масс. % волокна

Кривые 4-5, ОП содержащие 15 и 20 масс. % волокна, согласно классификации Херцберга относятся к кривым II типа – характеризующие упругое гомогенно-пластическое поведение. Здесь, помимо прямолинейного участка, соответствующего упругой деформации образцов, наблюдается параболический участок кривой, описывающий гомогенную пластическую деформацию, которая приводит к необратимым изменениям формы. Пластическая деформация возникает в результате необратимого перемещения дислокаций, в

результате которых одна часть кристалла перемещается относительно другой, что приводит к деформационному упрочнению. В результате, кривая в своей параболической части поднимается до значения некоторого максимального напряжения, за счет возрастающего сопротивления со стороны материала наращиванию пластической деформации.

Резкий переход от упругого состояния к пластическому, при деформации ОП, ведет к локализации пластических деформаций в тонких полосах сдвига: на наиболее опасном микродефекте начинает зарождаться трещина, которая затем разрастается, разделяя образец на части, образуя основную (магистральную) трещину. В процессе роста трещины ранее запасенная энергия в образце, расходуется в двух направлениях. В первом, на образование новой поверхности, во втором – на всевозможные перемещения структурных элементов, встречающихся на пути движения трещины. Органопластик содержащий 20 масс. % волокна характеризуется меньшей способностью к пластической деформации: концентрация напряжений в области вершины трещины не релаксирует за счет локальной пластической деформации, которая необходима для притупления трещины. Объемное напряженное состояние в области трещины (раскола) обуславливает повышение локального напряжения до предельного уровня и подавляет ту незначительную способность к пластической деформации которой обладает данный ОП (20 масс. % волокна), в результате чего происходит хрупкое разрушение образца [4,10].

Исходя из приведенных на рис.2 данных видно, что, армирование исходного материала волокном, благоприятно влияет на прочностные свойства ОП.

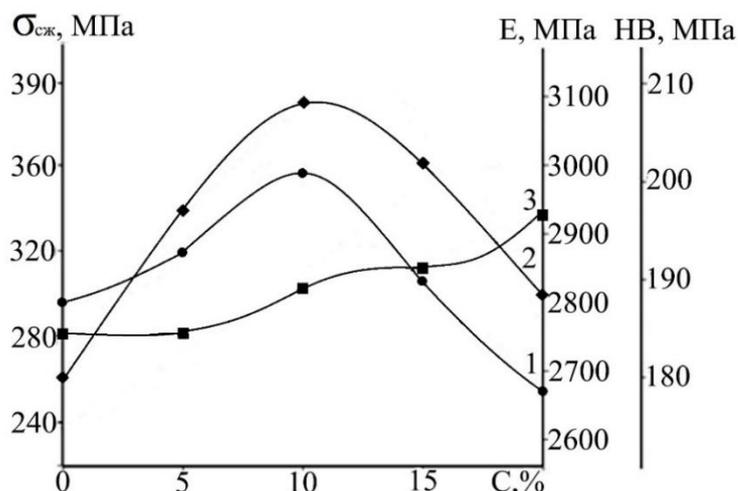


Рис. 2. - Влияние содержания ОВ на предел прочности (1), твердость по Бринеллю (2), модуль упругости (3)

Повышение прочностных свойств, разработанных ОП, обусловлено силами когезии действующими между макромолекулами связующего, и силами адгезии между ним и наполнителем. Во время смешения каждое волокно покрывается слоем полимера, в которой макромолекулы ориентированы таким образом, что их полярные группы обращены к полярным группам волокна. Усиливающее действие волокна обусловлено «рассасыванием» перенапряжения по краям микротрещины вследствие релаксации напряжений и перераспределения их на большое число центров прорастания трещин. Развивающаяся микротрещина, «упираясь» в волокно, прекращает рост, который возобновляется только при дополнительном повышении напряжения. В результате возрастает среднее напряжение, необходимое для разрушения полимерного тела [11].

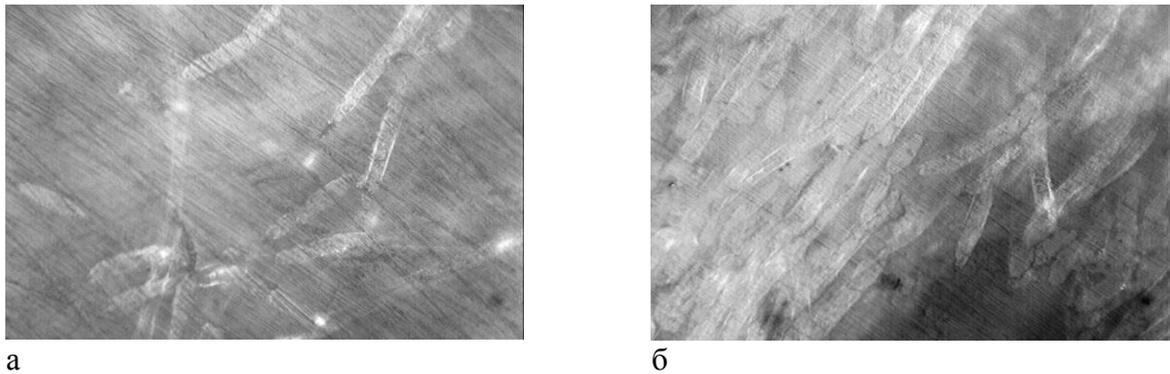


Рис. 3. - Микроструктура органопластиков, армированных: 10(а) и 20%(б) масс. % волокна (увеличение $\times 200$)

По мере увеличения количества содержания волокна все труднее становится осуществить равномерное распределение полимера по его поверхности рис.3. Поэтому практически прочность и твердость растет только до достижения оптимального (10 масс. %) наполнения, после чего они снижаются, что можно объяснить возрастанием дефективности материала за счет доминирующего разрыхления (рис.4) [3].

Подтверждением сказанного служит тот факт, что расчетная (аддитивная) плотность органопластиков, содержащих 5-10 масс. % волокна меньше, чем экспериментальная (гидростатическая), и только при содержании 15-20 масс. % оксалона она выше гидростатической (рис.4). Это объясняется тем, что при содержании волокна 5-10 масс. % процесс упорядоченности связующего превалирует над разрыхлением, а в случае 15-20 масс.% наоборот.

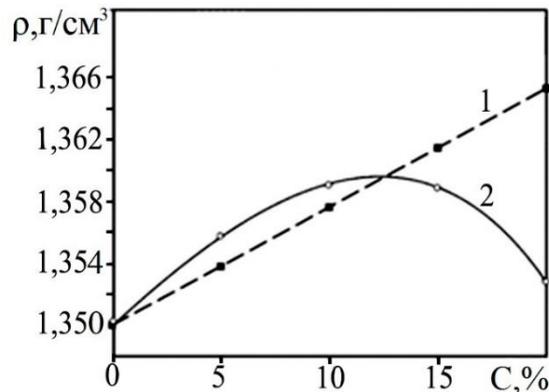


Рис. 4. – Аддитивная (1) и гидростатическая (2) плотность исходного полимера, и органопластиков на его основе

Одной из важных характеристик полимерных материалов, работающих в экстремальных условиях, является термостойкость, основным методом определения которой является термогравиметрический анализ [12].

Как видно из рис.5 контуры всех кривых «потеря массы – температура» аналогичны, то есть разложение наполненного фенилона протекает подобно чистому. На первом этапе для всех исследуемых материалов в температурном диапазоне 348 – 373 К наблюдается уменьшение массы на 2 – 4% за счет удаление влаги.

Интересно отметить, что исходный полимер теряет 10% массы (T_{10}) при 688 К, в то время как для ОП этот показатель сдвигается на 10 – 95 градусов в сторону более высоких температур рис.6. Это можно объяснить уменьшением подвижности молекулярных цепей полимера при его армировании, что приводит к повышению его термоокислительной устойчивости.

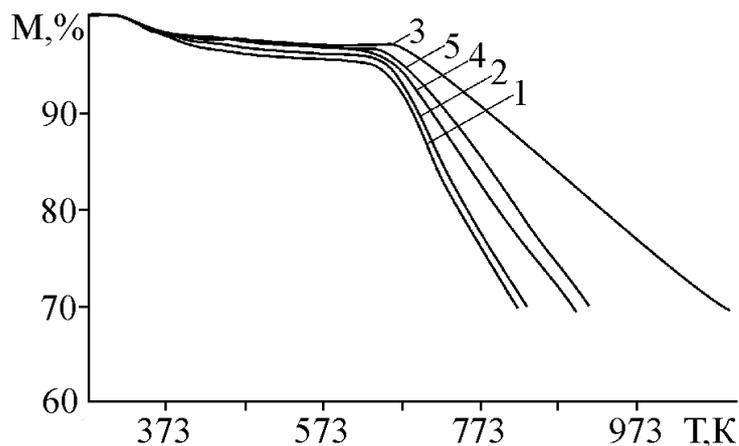


Рис.5. - Термографические кривые фенилона С-1 (1) и ОП на его основе с различным содержанием оксалона: 5 (2); 10 (3), 15 (4), 20 (5) масс. %

Интенсивная деструкция как исходного полимера, так и органопластиков на его основе, сопровождаемая значительной потерей массы, начинается после 643 К. Судя из данных термогравиметрического анализа, термостойкость ОП увеличивается, проходя через максимум при содержании волокна оксалон 10 масс. % (рис.6), после чего идет снижение, объясняемое тем, что разрыхление на границе волокно – полимер (рис.4) начинает превалировать над упорядочением макромолекул связующего.

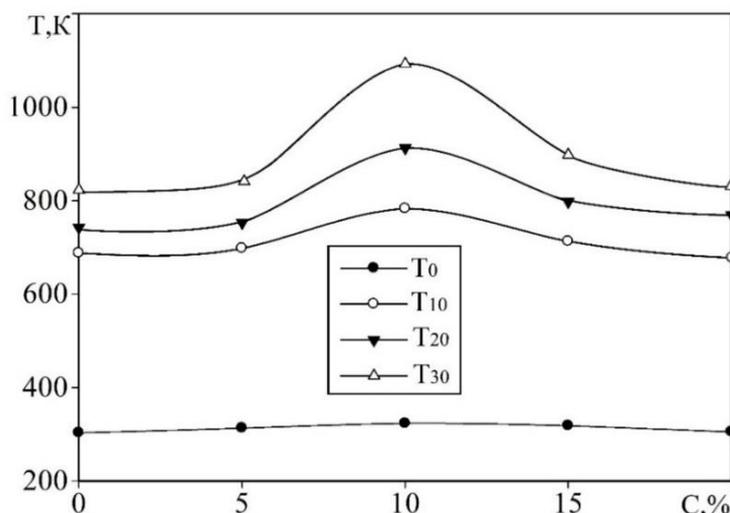


Рис. 6. - Термостойкость ОП, где T_0 – температура начала потери массы; T_{10} , T_{20} , T_{30} – температуры 10,20,30% потери массы, К

С целью выбора оптимальной кинетической модели для описания термической деструкции ароматического полиамида фенилон С-1 и композитов на его основе по экспериментальным данным, полученным с помощью термогравиметрического анализа, была рассмотрена возможность применения математических моделей различных гетерогенных процессов.

Расчет проводился методом Коатса-Редферна [13] по программе, работающей для IBM. Результаты расчета исходных параметров термодеструкции исследуемых пластиков: коэффициента корреляции (R), минимума функции (S), энергии активации (E) и предэкспоненциального множителя (Z) приведены в табл.3.

Таблица 3 - Расчетные кинетические параметры процесса термодеструкции исследуемых материалов

Математическая модель процесса	R	S, · 10 ⁻²	E _{акт} , кДж/моль	lgZ
1	2	3	4	5
Фенилон С -1				
$k \cdot \tau = \alpha$ (1)	0,904	0,23	37,98	-0,64
$k \cdot \tau = 2 \cdot \alpha^{1/2}$ (2)	0,843	0,042	14,08	-2,08
$k \cdot \tau = 2 \cdot [1 - (1 - \alpha)^{1/2}]$ (3)	0,879	0,68	52,79	0,61
$k \cdot \tau = 3 \cdot [1 - (1 - \alpha)^{1/3}]$ (4)	0,87	2,5	58,63	1,1
$k \cdot \tau = -\ln(1 - \alpha)$ (5)	0,854	4,2	71,81	2,21
$k \cdot \tau = 2 \cdot [-\ln(1 - \alpha)]^{1/2}$ (6)	0,817	2,7	30,99	-0,66
$k \cdot \tau = 3 \cdot [-\ln(1 - \alpha)]^{1/3}$ (7)	0,767	0,24	17,38	-1,54
$k \cdot \tau = 4 \cdot [-\ln(1 - \alpha)]^{1/4}$ (8)	0,696	0,07	10,59	-1,94
$k \cdot \tau = \frac{1}{2} \cdot \alpha^2$ (9)	0,922	0,71	85,79	2,54
$k \cdot \tau = (1 - \alpha) \cdot \ln(1 - \alpha) + \alpha$ (10)	0,907	0,34	103,26	4,03
$k \cdot \tau = \frac{3}{2} \cdot [1 - (1 - \alpha)^{1/3}]^2$ (11)	0,886	0,15	127,09	5,57
$k \cdot \tau = \frac{3}{2} \cdot \left[\left(1 - \frac{2}{3} \cdot \alpha \right) - (1 - \alpha) \right]$ (12)	0,899	0,53	111,04	4,21
Фенилон С -1 +5 масс. % волокна оксалон				
$k \cdot \tau = \alpha$ (1)	0,986	0,43	56,77	0,81
$k \cdot \tau = \frac{1}{2} \cdot \alpha^2$ (9)	0,98	0,35	123,38	5,44
Фенилон С -1 +10 масс. % волокна оксалон				
$k \cdot \tau = \alpha$ (1)	0,896	0,15	23,58	-1,7
$k \cdot \tau = \frac{1}{2} \cdot \alpha^2$ (9)	0,898	0,4	56,99	0,42
Фенилон С -1 +15 масс. % волокна оксалон				
$k \cdot \tau = \alpha$ (1)	0,97	0,37	31,38	-1,06
$k \cdot \tau = \frac{1}{2} \cdot \alpha^2$ (9)	0,977	0,42	72,6	1,69
Фенилон С -1 +20 масс. % волокна оксалон				
$k \cdot \tau = \alpha$ (1)	0,994	0,99	29,06	-1,24
$k \cdot \tau = \frac{1}{2} \cdot \alpha^2$ (9)	0,996	0,76	67,95	1,34

Высокие значения коэффициента корреляции (табл. 3) получены по кинетическим уравнениям (1, 9, 10). Поэтому в качестве основного критерия выбора оптимальной математической модели процесса использовали минимальное значение S. Таким образом, исходя из данных таблицы 3 установлено, что адекватно отображает термодеструкцию фенилона С-1 кинетическое уравнение (1), которое описывает процесс зародышеобразования.

Кроме того, высокий коэффициент корреляции при минимальном значении S наблюдается и для случая одномерной диффузии. Очевидно, это наиболее медленный процесс, потому что он требует сравнительно большой энергии активации (табл. 3).

Аналогичным образом был проведен расчет исходных параметров (r , S , E , $\lg Z$) и для органопластиков на основе фенилона. Как и ожидалось, адекватно (табл. 3) описывают термодеструкцию указанных пластиков те же математические модели, что и в случае исходного фенилона (1, 9).

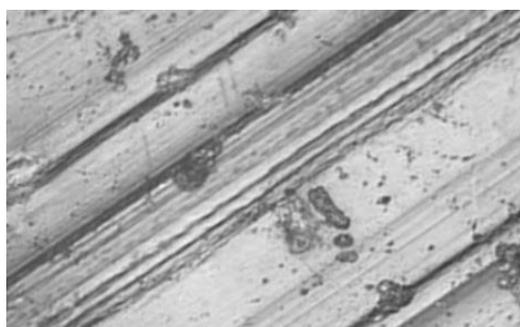
Улучшение триботехнических характеристик ПМ способствует повышению долговечности и надежности узлов трения машин и механизмов.

Рассматривая результаты полученных исследований, представленных в табл. 4, видно, что увеличение степени армирования фенилона $C-1$ позволяет улучшить трибологические свойства ОП на его основе. Увеличение количества оксалона с 5 до 20 масс. % снижает коэффициент трения и интенсивность линейного износа фенилона $C-1$ на 49 – 56% и в 3,8 – 12,1 раза соответственно, что можно объяснить, с одной стороны низким (0,25) коэффициентом трения волокна по стальному диску, а с другой структуризацией связующего. Наиболее интенсивное снижение коэффициента трения происходит при введении волокна до 10 - 15 масс. %, после чего он практически не меняется [14].

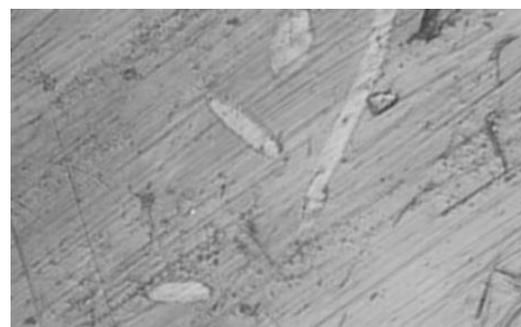
Таблица 4 - Влияние волокна на трибологические свойства органопластиков

Содержание органического волокна	Коэффициент трения, f	Интенсивность линейного износа, $I_n \cdot 10^{-8}$	Температура в зоне контакта, T , К
0	0,51	3,75	347
5	0,3	1,9	345
10	0,29	0,98	344
15	0,26	0,4	342
20	0,25	0,33	341

Из рис.7, а видно, что неровности более твердой поверхности (диска) пропахивают более мягкую (полимерную), образуя дорожку трения, при этом при трении ненаполненного полимера, на его поверхности образуются более глубокие борозды ($R_a=0,26-0,68$) чем в случае органопластиков ($R_a=0,15-0,5$). В соответствии с моделью трения скольжения Бодена-Тейбора [15], так называемая пропахивающая составляющая силы трения, всегда сопровождается адгезией. Следовательно, уменьшение адгезионной силы за счет введения органического волокна в полимерное связующее увеличивает фактическую площадь контакта рис. 3 б (поверхность становится более гладкой), и как следствие обеспечивает улучшение триботехнических характеристик [14,15].



а



б

Рис. 7. - Микроструктура поверхности трения при изнашивании исходного фенилона (а) и органопластика (б), армированного 10 масс. % волокна (увеличение $\times 200$)

Заключение

Анализ результатов исследований свидетельствует, что использование химического волокна – оксалон, в качестве армирующего наполнителя является перспективным путем повышения эксплуатационных характеристик ароматического полиамида фенилон С-1. Оптимальным комплексом физико – механических, теплофизических и трибологических свойств обладает органопластик, содержащий 10 масс. % волокна оксалон.

Библиографический список:

1. **Тадмор З.** Теоретические основы переработки полимеров / З. Тадмор, К. Гогос К., пер. с англ. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
2. **Волков Г.М.** Композиционные материалы в массовом машиностроении / Волков Г.М. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1990. - №8. С.2 – 7.
3. **Михайлин, Ю.А.** Конструкционные полимерные композиционные материалы / Ю.А. Михайлин. – издательство «НОТ» (Научные основы и технологии), 2008. – 822 с.
4. **Карпинос Д.М.** Полимеры и композиционные материалы на их основе в технике / Д.М. Карпинос, В.И. Олейник. – Киев: Наук. Думка, 1981. – 180 с.
5. **Раскатов В.М.** Машиностроительные материалы: краткий справочник / В.М. Раскатов. – 3-е изд., 1980, 512 с.
6. Справочник по пластическим массам. изд. 2-е. Т.2. под ред. В.М. Катаева, В.А. Попова, Б.И. Сажина. М. :Химия, 1975. 568 с.
7. **Черкасова Н.Г.** Реактопласти, хаотически армованные химическими волокнами / Н.Г. Черкасова, А.И. Буря – Днепропетровск : ІМА – прес, 2011. – 234 с.
8. Разработка рекомендаций по рациональному применению химических волокон для изготовления текстильных изделий бытового и технического назначения определенных направлений использования термостойких синтетических нитей. Отчет ВНИИПХВ, № гос. рег. 78031106.
9. **Буря А.И.** Трение и изнашивание органопластиков на основе полиамида-6 / А.И. Буря // Трение и износ. – 1998. - № 5(Т.19) – С. 671-676.
10. **Херцберг Р.В.** Деформация и механика разрушения конструкционных материалов. пер. с англ. / под. ред. М.Л. Бернштейна, С.П. Ефименко – М. : «Металлургия», 1989. – 576 с.
11. **Кулезнев В.Н.** Химия и физика полимеров : учеб. для хим. – технол. вузов. / В.Н. Кулезнев, В.А. Шершнева – М. : Высш. шк., 1988. – 312 с.
12. **Берлин А.А.** Основы адгезии полимеров / А.А. Берлин, В.Е. Басин. – М. : Химия, 1969. - 320 с.
13. Термостойкость пластиков конструкционного назначения / под ред. Е. Б. Тростянской. – М. : Химия, 1980. – 240 с.
14. **Буря А.И.** Влияние содержания волокна оксалон на термостойкость органопластиков на основе фенилона С-1 / А.И. Буря, А.-М.В. Томина, Ю.А. Турченко // Тези доповідей ІХ української наукової конференції студентів, аспірантів і молодих учених «Хімічні проблеми сьогодення». – Вінниця. – 2016. – С. 266.
15. **Zuru A.A., Whitehead R.T., Criffiths D.L.** A new technique for determination of the possible reaction mechanism from non – isothermal thermogravimetric data // Thermochim. Acta, 164, 1990, 285 – 305.
16. **Буря А.И.** Влияние содержания волокна оксалон на триботехнические характеристики органопластиков на основе фенилона С – 1/ А.И. Буря, А.-М.В. Томина, Ю.А. Турченко, Н.А. Веремейченко // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2016): матеріали тез доповідей VI міжнародної науково-практичної конференції. – Чернігів: ЧНТУ, 2016. – С. 112 – 113.
17. **Мышкин Н.К.** Трибология. Принципы и приложения / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. -310 с.

18. **Погосян А.К.** Трение и износ наполненных полимерных материалов / А.К. Погосян. – М. : Наука, 1977. – 139 с.

Bibliography:

1. **Z. Tadmor** Theoretical foundations of polymer processing / Z. Tadmor, K. Gogos K., ed. from English. - М. : Chemistry, 1984. - 632 p.
2. **Volkov G.M.** Composite materials in large engineering / Volkov G.M. // Physical metallurgy and heat treatment of metals. - 1990. - №8. P.2 - 7.
3. **Mihailin Y. A.** Structural polymer composite materials / Y.A. Mihailin. - Publishing "FAT" (Fundamentals and Technologies), 2008. - 822 p.
4. **Karpinos D.M.** Polymers and composites based thereon in the art / D.M. Karpinos, V.I. Oleynik. - Kiev Sciences. Dumka, 1981. - 180 p.
5. **Raskatov V.M.** Engineering materials: a brief guide / V.M. Raskatov. – 3-rd ed., 1980. – 512 p.
6. Handbook of plastics. 2-rd ed. V.2. V.M. Kataev, V.A. Popov, B.I. Sazhin, M: Chemistry, 1975. – 568 p.
7. **Cherkasova N.G.** Thermosets, randomly armovannye made fibers / N.G. Cherkasova, A.I. Burya - Dnepropetrovsk: IMA - Pres, 2011. - 234 p.
8. Development of recommendations on the rational use of chemical fibers for the manufacture of textiles for household and technical use of certain areas of the use of heat-resistant synthetic fibers. Report VNIIPHV, number of state. reg. 78031106.
9. **Burya A.I.** Friction and wear organic plastics based on polyamide-6 / A.I. Burya // Friction and Wear. - 1998. - № 5 (Т.19) - P. 671-676.
10. **Herzberg R.V.** Deformation and fracture mechanics structural materials. tr. from english. / under. ed. M.L. Bernstein, S.P. Efimenko - M.: "Metallurgy", 1989. - 576 p.
11. **Kuleznev V.N.** Chemistry and physics of polymers: studies. for the chemical. - primary process. universities. / V.N. Kuleznev, V.A. Shershnev – M.: high school, 1988. -. 312, p.
12. **A.A. Berlin** Fundamentals of adhesion of polymers / A.A. Berlin, V.E. Bassin. – M. : Ximia, 1969. - 320 p.
13. Temperature resistance of plastics, constructional assignment / ed. E.B. Trostyansky. – M. : Ximia, 1980. - 240 p.
14. **Burya A.I.** Influence of fiber content oksalon heat resistance based on organic plastics phenylone C-1 / A.I. Burya, A.-M.V. Tomina, Y.A. Turchenko // Abstracts of the IX Ukrainian Scientific Conference of students and young scientists "Chemical problems of today." - Vinnitsa. - 2016. - P. 266.
15. **Zuru A.A., Whitehead R.T, Criffiths D.L.** A new technique for determination of the possible reaction mechanism from non – isothermal thermogravimetric data // Thermochim. Acta, 164, 1990, 285 – 305.
16. **Burya A.I.** Influence of fiber content on the tribological characteristics oksalon organic plastics based phenylone C - 1 / A.I. Burya, A.-M.V. Tomina, Y.A. Turchenko, N.A. Veremeychenko // Comprehensive quality assurance processes and systems (CQAPS - 2016), abstracts VI International Scientific Conference. - Chernihiv: CHNTU, 2016. - P. 112 - 113.
17. **Myshkin N.K.** Tribology. Principles and Applications / N.K. Myshkin, M.I. Petrokovets. - Gomel: MPRI NASB, 2002. -310 p.
18. **Pogosyan A.A.** Friction and Wear of Filled Polymer Materials / A.K. Poghosyan. -: M. : Nauka, 1977. - 139 p.

УДК: 620.193.8:621.893

КОМПОЗИЦИОННЫЙ АНТИФРИКЦИОННЫЙ ПОЛИМЕРНЫЙ МАТЕРИАЛ

П.Д. Дерлугян, Г.А. Данюшина, В.Г. Шишка, Ю.М. Бережной, Н.В.Шишка
АО «ОКТБ «Орион»

Важным направлением в области создания новых композиционных материалов на основе полимерной матрицы является подбор функциональных наполнителей. Наполнители способны оказывать разнообразное воздействие на полимеры, расширяя сферы их применения. Они способны повышать механическую прочность, твердость, эластичность полимеров, придавать им специальные свойства в зависимости от используемых функциональных добавок.

Следует отметить особый интерес к таким наполнителям, как полимер-коллоидные комплексы металлов (кобальта, меди, никеля).

Полимер-коллоидные комплексы являются продуктами взаимодействия между макромолекулой полимера и частицей, имеющей на своей поверхности реакционноспособные группы. Такие комплексы обладают свойствами, отличающимися от свойств, характерных для индивидуальных компонентов.

Формы и размеры частиц наполнителя оказывают определенное воздействие на физико-механические характеристики композитов. Наиболее эффективно применение в качестве наполнителей волокнистых материалов. В данной работе в качестве наполнителя был выбран полититанат калия (ПТК), имеющий волокнистую и слоистую структуру. Он обладает высокой каталитической активностью, характеризуется высокими прочностными свойствами и сохраняет свою структуру и свойства до 850°C [1-4]. ПТК является аналогом дисульфида молибдена и может быть успешно применен для его замены, кроме того он в три раза дешевле дисульфида молибдена и является коррозионностойким материалом.

Предварительно был сделан анализ изменения элементного состава ПТК после термической обработки при 800°C. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 Элементный состав ПТК

Компонент	Концентрация	
	Исходный ПТК	Термообработанный ПТК
Si	0,18234	0,08532
S	0,09734	0,07310
K	20,57538	20,97977
Ti	78,22139	77,98845
Fe	0,40434	0,33698
Cu	0,38441	0,44082
Zn	0,13481	0,09555

Как видно из представленных данных, состав ПТК после нагрева меняется незначительно.

Также были получены фотографии изменения структуры ПТК до и после термообработки (рисунки 1 и 2). Следует отметить, что если элементный состав после термообработки остается практически без изменений, то структура изменяется. После термообработки ПТК имеет игольчатую (волокнистую) структуру.

Данная работа связана с разработкой композиционных материалов на основе полиэтилена 277, в качестве полимерной матрицы, а наполнителями служат полимерный комплекс меди и ПТК, как исходный, так и после термообработки.

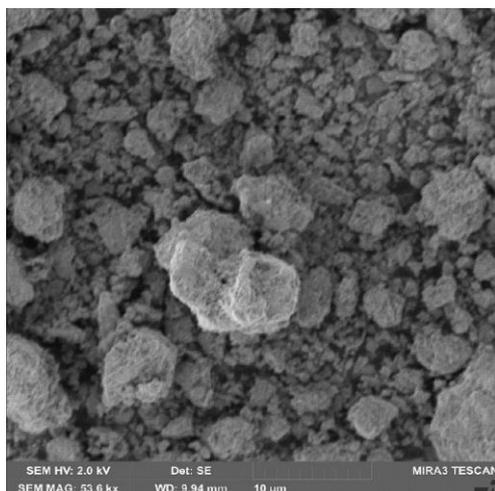


Рис.1 Структура исходного ПТК

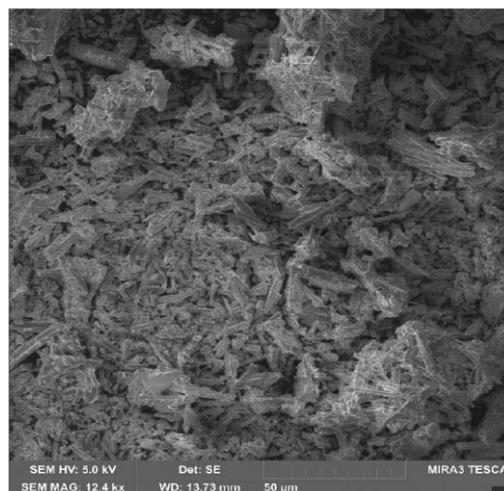


Рис.2 Структура ПТК после термообработки

Для получения медно-полимерного комплекса (МПК) использовали десятипроцентный водный раствор полиакриламида, водный раствор аммиака меди. Растворы тщательно перемешивали до получения однородной массы. Затем полученный комплекс осаждали ацетоном или этиловым спиртом. Полученный осадок подвергали сушке при 25-30°C, затем порошок измельчали в шаровой мельнице и использовали в качестве антифрикционного наполнителя [5].

В ходе исследований был разработан ряд составов, представленных в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 Состав композиций с исходным ПТК

Компоненты	Состав, вес %					
	1	2	3	4	5	6
Номер композиции						
Полиэтилен	50	48	48	45	45	100
МПК	45	45	47	50	45	-
ПТК исходный	3	5	5	5	10	-
Режим прессования						
Температура, °C	145	145	145	140	140	140
Давление, МПа	40	40	40	40	40	40

Таблица 3 Состав композиций с термообработанным ПТК

Компоненты	Состав, вес %			
	1	2	3	4
Номер композиции				
Полиэтилен	50	48	48	45
МПК	45	45	47	50
ПТК термообработанный	3	5	5	5
Режим прессования				
Температура, °C	145	145	145	140
Давление, МПа	40	40	40	40

В процессе приготовления шихты композиционного материала полиэтилен 277, медный поликомплекс полиакриламида и ПТК взвешивали, затем помещали в шаровую

мельницу с керамическими шариками и перемешивали до получения однородного по составу порошка. Из полученного порошка прессовали образцы при температуре 140-145 °С и давлении $P_{уд} = 40$ МПа. Время выдержки брали из расчета 3 минуты на 1 мм толщины изделия. Полученные образцы испытывали на твердость, коэффициент трения и износ.

Коэффициент трения определяли на торцевой машине трения при скорости скольжения 0,075 м/с, диапазон изменения нагрузки составлял от 0,5 до 6,0 МПа. Увеличение нагрузок проводили ступенчато после установления стационарного режима трения. Шаг изменения нагрузки составлял 0,5 МПа. Испытания образцов из разработанного материала осуществляли при трении по стали 45 в отсутствие в зоне трения смазки. Твердость определяли на приборе АС – III (КМ-2)

Результаты испытаний по определению коэффициента трения, твердости и линейного износа представлены в таблице 4.

Таблица 4 Свойства композиционных материалов

Номер композиции	ПТК исходный	ПТК термообработанный
Коэффициент трения		
1	0,09	0,085
2	0,09	0,085
3	0,10	0,90
4	0,10	0,14
5	0,16	-
6	0,11	-
Твердость, кг/мм ²		
1	11,9	12,1
2	11,7	12,1
3	11,9	11,9
4	11,7	10,2
5	10,8	-
6	9,6	-

Как видно из представленных данных, введение в полиэтилен медно-полимерного комплекса и ПТК способствует некоторому повышению твердости разработанного материала по сравнению с чистым полиэтиленом, снижению коэффициента трения и линейного износа.

Улучшение триботехнических свойств можно объяснить избирательным переносом, возникающим в процессе трения. В процессе трения как на поверхности контртела, так и испытываемого образца образуется тонкая медная пленка, и пара трения полимер-сталь становится парой медь-медь, что и способствует повышению долговечности узла трения.

Однако, введение в композицию ПТК более 7 вес. % способствует повышению как коэффициента трения, так и линейного износа. Отпрессованные образцы по составу композиции №5 (табл. 4) отличаются эластичностью, мягкостью и приобретают свойства эластомера, что делает невозможным их применение в качестве антифрикционных материалов при этой концентрации.

Линейный износ материала с термообработанным ПТК снижается незначительно.

Таким образом, по результатам проведенных исследований установлено, что концентрация полититаната калия в композиционных материалах с полимерной матрицей не должна превышать 3-5 вес. %, а медно-полимерного комплекса – 45-47 вес.%.

Библиографический список

1. Полититанаты калия с волокнистой и чешуйчатой структурой, синтез и применение / А.В. Гороховский, Л.Г. Панова, И.Н. Бурмистров и др. Режим доступа: <http://www.rusnor.org/upload/My/politkal2.pdf>, свободный.
2. Влияние модификации поверхности полититанатов калия на механические свойства полимерных композиционных материалов на их основе / И. Н. Бурмистров и др. // Журнал прикладной химии. - 2013. - Т. 86, вып. 5. - С. 818-824.
3. Производство субмикро-наноразмерных полититанатов калия и композиционных материалов на их основе / Гороховский А.В., Палагин А.И., Панова Л.Г., Устинова Т.П., Бурмистров И.Н., Аристов Д.В. // Нанотехника. 2009. № 3. С. 38-44.
4. Анализ влияния условий получения наноструктурных полититанатов калия на их морфологические характеристики / Бурмистров И.Н., Кузнецов Д.В., Юдин А.Г., Муратов Д.С., Миляева С.И., Костицын М.А., Горшенков М.В. // Новые огнеупоры. - 2011. - №11. - С.28-32
5. Патент 2504560 Российская Федерация, МПК C08J 5/16 Антифрикционный композиционный материал. Данюшина Г.А. и др.; заявитель и патентообладатель АО «ОКТБ «Орион» 2012125805/05; заявл. 20.06.12; опубл. 20.01.14 Бюл.№2.

Bibliography:

1. Polytitanate potassium with scaly and fibrous structure, synthesis and application / A.V. Gorokhovskiy, L.G. Panova, I.N. Burmistrov, etc. Access: <http://www.rusnor.org/upload/My/politkal2.pdf>, free.
2. Influence of surface modification polytitanate potassium on the mechanical properties of polymer composites on their base / I. Burmistrov et al. // Journal of Applied Chemistry. - 2013. - V. 86, no. 5. - S. 818-824.
3. Production submicro-nanoscale polytitanate potassium and composite materials on their basis / A.V. Gorokhovskiy, A.I. Palagin, L.G. Panova, T.P. Ustinova I.N. Burmistrov, D.V. Aristov// Nanotechnics. 2009. № 3. S. 38-44.
4. Analysis of the impact of the conditions for obtaining nanostructured polytitanate potassium on their morphological characteristics / I.N. Burmistrov, D.V. Kuznetsov, A.G. Yudin, D.S. Muratov, S.I. Milyaeva, M.A. Kostitsyn, M.V. Gorshenkov// New refractories. - 2011. - №11. - С.28-32
5. Patent 2504560 Russian Federation, IPC C08J 5/16 Anti-friction composite material. Danyushina GA and etc.; applicant and patent holder of "Special Design and Technology Bureau "Orion" 2012125805/05; appl. 20.06.12; publ. 01.20.14 Byul.№2.

УДК 621.77.04

ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВА АМГ5 ПОСЛЕ ИНТЕНСИВНОГО ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ФРИКЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ*А.А.Елисеев¹, А.В. Филиппов^{1,2}, В.Е. Рубцов^{1,2}, А.В. Чумаевский¹, А.В. Колубаев¹,
Е.А.Колубаев^{1,2}¹ *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, пр.
Академический, 2/4, Россия*² *Национальный исследовательский Томский Политехнический Университет, Томск,
пр. Ленина, 30, Россия***Введение**

За последние годы наметился значительный прогресс в получении ультрамелкозернистых и нанокристаллических материалов. Это обусловлено существенным развитием, как методов получения изделий на их основе, так и новыми возможностями исследования физико-механических свойств, микроструктуры и механизмов формирования [1-11]. На сегодняшний день основным способом получения ультрамелкозернистых и нанокристаллических металлов по-прежнему остается воздействие методами интенсивной пластической деформацией [5], которое достигается различными приемами: равноканальным угловым прессованием [6], кручением под высоким давлением [7], последовательной роликовой прокаткой [8], гидростатической экструзией [9], винтовой экструзией [10], низкотемпературной прокаткой [11] и другими средствами. Среди указанных методов наиболее популярными и изученными являются равноканальное угловое прессование, кручение под высоким давлением и последовательная роликовая прокатка.

Таким образом, все отмеченные способы получения ультрамелкозернистых и нанокристаллических металлов не лишены своих недостатков, среди которых основными являются небольшой размер получаемых образцов и высокая стоимость их изготовления [2]. Существенным недостатком многих материалов с ультрамелкозернистой и нанокристаллической структурой является также их низкая пластичность [12]. С целью повышения пластичности применяют термическую обработку, что в свою очередь может привести к росту размеров зерна и значительному изменению физико-механических свойств [13]. Исследования износостойкости ультрамелкозернистых и нанокристаллических материалов показали противоречивые результаты. С одной стороны авторы работы [14] показали высокую износостойкость алюминиевых и медных сплавов, полученных в результате интенсивной пластической деформации. С другой стороны в работах [15, 16] показана низкая износостойкость, которую связывают с расслоением материала, потерей способности к деформационному упрочнению и высокой степенью окисления.

На этом фоне методика получения ультрамелкозернистых и нанокристаллических материалов трением с перемешиванием является сравнительно новой и малоизученной. Однако перспективы данного подхода для получения объемных изделий представляются широкими, например, путем однопроходной обработки сплава 7075 трением с перемешиванием при охлаждении смесью воды, метанола и сухого льда авторам [17] удалось получить нанокристаллическую микроструктуру с размерами зерен 30-180 нм. Наблюдения за эволюцией микроструктуры выявили высокую плотность формирования наноразмерных зерен с большеугловыми границами на одной из стадий, что приводит к улучшению пластических свойств генерируемых ультрамелкозернистых и нанокристаллических материалов.

* Работа выполнена в рамках инициативного проекта РФФИ 16-48-700652 p_a.

К основным преимуществам получения ультрамелкозернистых и нанокристаллических материалов методом трения с перемешиванием следует отнести: 1) возможность получения ультрамелкозернистой структуры с большеугловыми границами за один проход; 2) возможность контроля состояния микроструктуры путем изменения режимов трения в широком диапазоне, что, несомненно, полезно при обработке разнообразных металлов и сплавов с применением охлаждения; 3) возможность получения объемных материалов с большими габаритными размерами путем многопроходной обработки; 4) простота, широкая универсальность и низкое энергопотребление технологического оборудования для осуществления процесса трения с перемешиванием.

Целью настоящей работы является исследование прочностных характеристик образцов из алюминиевого сплава АМг5 после интенсивного фрикционного воздействия путем трения с перемешиванием.

Материалы и методы

Для достижения поставленной в работе цели были получены образцы из сплава АМг5 подвергнутые интенсивному термомеханическому воздействию методом трения с перемешиванием. Образцы были получены на машине, используемой для сварки трением с перемешиванием. Формирование деформированной структуры осуществлялось в цельных плитах из сплава АМг5. Для исследований были подготовлены три типа образцов (№ 1, 2 и 3), с различной интенсивностью фрикционного воздействия.

Для проведения механических испытаний из полученных при фрикционном воздействии плит вырезались тестовые образцы. На первом этапе подготовки удалялся материал по высоте образца, чтобы убрать возможные микродефекты с поверхностей образца (см. Рис. 1). Материал удалялся таким образом, чтобы ядро деформированной трением с перемешиванием структуры располагалось равномерно по длине образца и было сосредоточено в центральной части образца. На втором этапе подготовки из утоненной на первом этапе пластины вырезался тестовый образец.

Испытания на растяжение проводились на универсальной испытательной машине INSTRON-558. Фрактограммы поверхностей разрушения получены на растровом электронном микроскопе SEMTRAC mini SM3000.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На Рис. 1 приведена диаграмма растяжения образца исходного материала (АМг5).

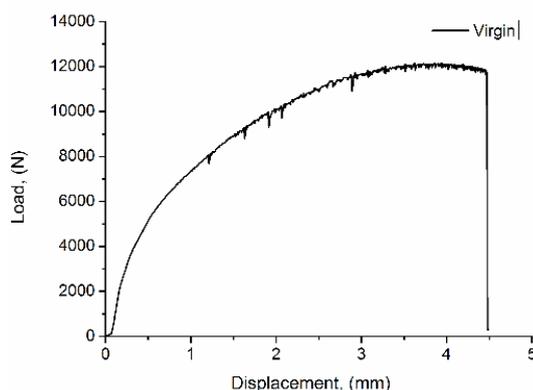


Рис 1. Диаграмма растяжения образца исходного материала

Сечение образца исходного материала 5.5x7.4 мм, предел прочности при растяжении составил 300 МПа. Сечение образца 1 – 2.5x3.9 мм, предел прочности при растяжении 263 МПа (87.7 % прочности исходного образца). Сечение образца 2 – 2.1x4.4 мм, предел прочности при растяжении 326 МПа (109 % прочности исходного образца). Сечение образца 3 – 2.5x4.0 мм, предел прочности при растяжении 246 МПа (82 % прочности исходного образца). Как видно на графиках (см. Рис. 2 и 3) у образцов, подвергнутых фрикционному воздействию, изменяется характер проявления прерывистой текучести. Перед разрушением (на этапе

обратного загиба кривой нагружения) образцов 1-3 изменение нагрузки происходит монотонно в отличие от образца исходного материала. Удлинение образцов со структурой, полученной в результате фрикционного воздействия, существенно меньше, чем удлинение исходного образца. На Рис. 4 приведены фрактограммы поверхностей разрушенных образцов.

На Рис. 2 приведены диаграммы растяжения образцов полученных после интенсивного термомеханического воздействия методом трения с перемешиванием.

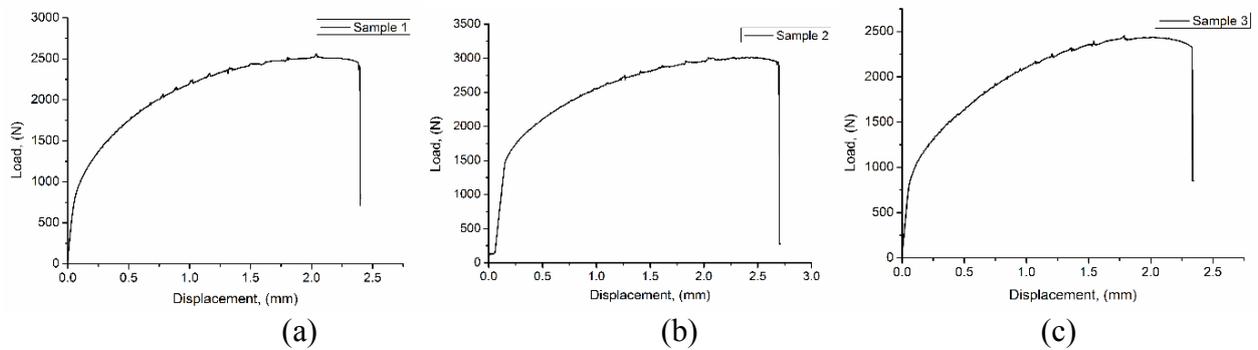


Рис.2. Диаграмма растяжения образцов материала после фрикционного воздействия: а) образец 1, б) образец 2, в) образец 3

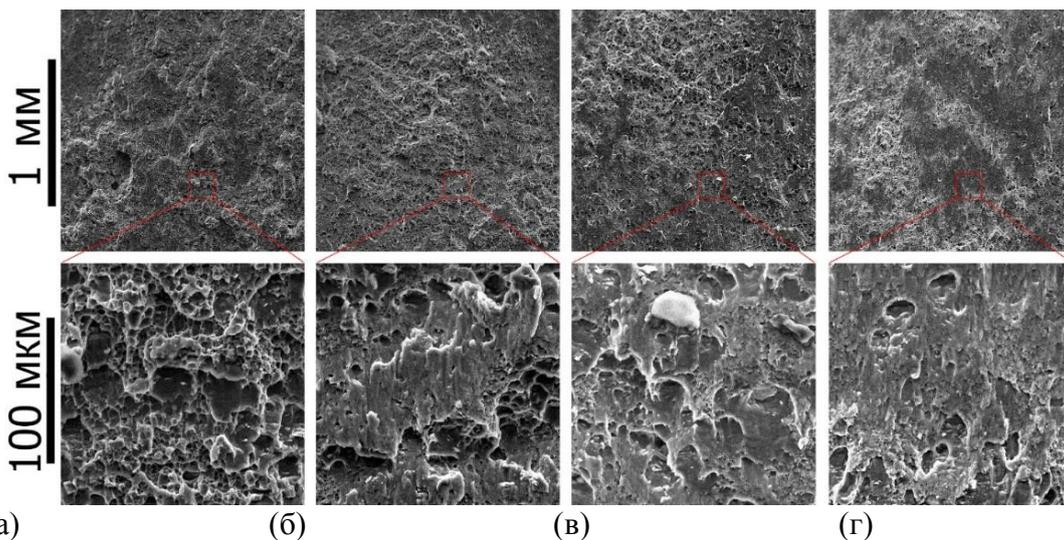


Рис 3. Фрактография поверхностей разрушения: а) образец исходного материала, б) образец 1, в) образец 2, г) образец 3

Разрушение образцов исходного материала (рисунок 3) происходит вязко с характерно выраженным ямочным строением излома. В структуре излома образцов материала после фрикционной обработки присутствуют следы хрупкого скола вдоль плоскости разрушения (образцы № 1,2). Наименьшее присутствие следов пластического течения металла в зоне разрушения и наибольшее число следов хрупкого скола характерно для образца №3, обратная картина характерна для образца №1, промежуточная - для образца №2, для которого характерна наибольшая прочности в испытаниях на растяжение.

ВЫВОДЫ

В результате интенсивного термомеханического воздействия методом трения с перемешиванием удалость достичь повышения прочности сплава АМг5 на 9% по сравнению с исходным состоянием.

Среди отличительных особенностей следует отметить изменение характера прерывистой текучести у образцов со структурой, полученной в результате фрикционного

воздействия. Изменение характера прерывистой текучести может свидетельствовать о существенной перестройке структуры материала.

Библиографический список/Bibliography:

1. M.Yu. Murashkin, I. Sabirov, X. Sauvage, and R.Z. Valiev *J. Mat. Sc.* **51**, 33–49 (2016)
2. Sabirov, M.Yu. Murashkin, and R.Z. Valiev *Mat. Sc. Eng. A* **560**, 1–24 (2013)
3. Y. Estrin and A. Vinogradov *Acta Mater.* **61**, 782–817 (2013)
4. T.G. Langdon *Acta Mater.* **61**, 7035–7059 (2013).
5. R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev and I.V. Alexandrov *Prog. Mater. Sci.* **45**, 103–189 (2000)
6. R.Z. Valiev and T.G. Langdon *Prog. Mater. Sci.* **51**, 881–981 (2006)
7. A.P. Zhilyaev and T.G. Langdon *Prog. Mater. Sci.* **53**, 893–979 (2008)
8. Y. Saito, H. Utsunomiya, T. Sakai and R.G. Hong *Scr. Mater.* **39**, 1221–1227 (1998)
9. M. Lewandowska and K.J. Kurzydowski *J. Mater. Sci.* **43**, 7299–7306 (2008)
10. Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, S. Synkov and D. Orlov *Mater. Sci. Eng. A* **503**, 14–17 (2009)
11. Y.H. Zhao, X.Z. Liao, S. Cheng, E. Ma and Y.T. Zhu *Adv. Mater.* **18**, 2280–2285 (2006)
12. Y.M. Wang and E. Ma *Acta Mater.* **52**, 1699–1709 (2004)
13. B. Schuh, F. Mendez-Martin, B. Völker, E.P. George, H. Clemens, R. Pippan and A. Hohenwarter *Acta Mater.* **96**, 258–268 (2015)
14. E. Ortiz-Cuellar, M.A.L. Hernandez-Rodriguez and E. Garcí'a-Sanchez *Wear* **271**, 1828–1832 (2011)
15. C.T. Wang, N. Gao, R.J.K. Wood and T.G. Langdon *J. Mater. Sci.* **46**, 123–130 (2011)
16. Kazemi Talachi, M. Eizadjou, H. Danesh Manesh and K. Janghorban *Mater. Charact.* **62**, 12–21 (2011)
17. Jian-Qing Su, T.W. Nelson, and J. Colin Sterling. *J. Mat. Res.* **18**, 1757–1760 (2003)

УДК. 539.4: 669-175.2: 621.791.05: 66.669

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ УДАРНАЯ ОБРАБОТКА КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Смирнова А.С.^{1,2}, Почивалов Ю.И.¹, Панин В.Е.^{1,2}

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Важным направлением развития современного материаловедения является разработка методов контролируемого управления прочностью и пластичностью материалов за счет применения комплексных методов воздействий. Они включают традиционные методы упрочнения в сочетании с разными вибрационными и высокоэнергетическими способами обработки. Их применение позволяет достигать в структуре обрабатываемого материала состояний не достижимых при других видах обработки. Особенно эффективными эти методы оказываются применительно к сварным соединениям [1] и позволяют существенно повысить служебные характеристики сварных конструкций. Это достигается за счет формирования в поверхностных слоях сварных соединений высоконервновесных, наноструктурных состояний и снижением остаточных, сварочных напряжений. Если рассматривать деформируемое твердое тело как многоуровневую, иерархически самоорганизующуюся систему, то в ней поверхностные слои и внутренние границы раздела являются важнейшими мезоструктурными уровнями деформации. Наноструктурирование поверхностного слоя и

отсутствие резкого градиента напряжений на границе раздела «поверхностный слой – кристаллическая подложка» повышают его релаксационные способности, что способствует самосогласованию поворотных мод деформации в многоуровневой системе и задерживает развитие трещины при циклическом нагружении. [2] В ИФПМ СО РАН разработаны методы наноструктурирования поверхностных слоёв, включающие ультразвуковую механическую ковку в сочетании с термомеханической обработкой, и которые показали высокую эффективность в повышении прочностных свойств, износостойкости и усталостной долговечности конструкционных материалов и их сварных соединений.

Целью настоящей работы является исследование структуры и механических свойств сварных соединений высокопрочных сталей, алюминий-литиевых и титановых сплавов после ультразвуковой механической обработки и возможностей ее применения для кратного повышения усталостной долговечности конструкционных материалов различного назначения.

Материалы и методы исследования. В качестве объектов исследования выбраны сварные соединения высокопрочных титановых сплавов ВТ23, ВТ18У, ВТ8-1, алюминий-литиевых сплавов В-1461, В-1963, 1424 и высокопрочной стали ВКС12. Сварные соединения сплавов В-1461, В-1963, ВТ18У и стали ВКС12 получены методом автоматической аргоно-дуговой сварки, сплав ВТ23 сваривали электронно-лучевой и лазерной сваркой, сплав 1424 – лазерной сваркой. Для обработки поверхности сварных соединений применяется комплекс оборудования для ультразвуковой механическойковки (УЗМК), который включает: генератор ИЛ4, предназначенный для выработки тока частотой 25 кГц мощностью 630Вт и рабочий инструмент, преобразующий электрические колебания в механические. Генератор ИЛ4 имеет ступенчатую регулировку мощности и позволяет получать 50, 75 и 100 % мощности от максимальной.

Металлографические исследования выполнены на оптических микроскопе Axiovert 25 SA. Исследование на микротвердость проведено на микротвердомере "ПМТ-3". Механические испытания выполнены путем растяжения на универсальной испытательной машине "Instron-5582". Усталостные испытания плоских образцов проведены на универсальной гидравлической испытательной машине "Schенck Sinus.100.40". Фрактография разрушенных образцов исследована методом растровой электронной микроскопии на "Tesla BS-300". Электронно-микроскопические исследования тонкого поверхностного слоя выполнены на электронном микроскопе JEM 100 CX II (JEOL, Япония).

Результаты исследования. Сварного соединения всегда отличается от основного металла как по фазовому составу (особенно если сварка осуществляется электродом или присадочным материалом по составу отличным от состава основного металла), так и по кристаллической структуре. Прежде всего, в около шовной зоне и в зоне термического влияния происходит интенсивный рост зерна вследствие рекристаллизации. Очень часто по границам кристаллов наблюдаются грубые скопления эвтектических выделений. В центре сварного шва могут наблюдаться крупные дендриты. Дисперсность выделяемых вторичных фаз в зоне термического влияния также значительно ниже, чем в основном металле.

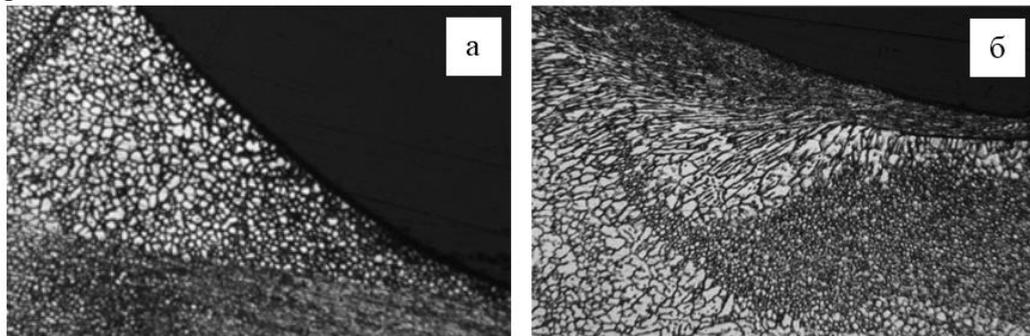


Рис. 1 - Структура сварных соединений сплава В-1963: а) - в состоянии поставки; б), - с наноструктурированным поверхностным слоем; а), б) - оптическая микроскопия, $\times 120$

В алюминиевом сплаве В-1963 структура сварного шва характеризуется низкой дисперсностью вторичных фаз (рис. 1а), неоднородностью их распределения, ростом зерна и образованием дендритов и эвтектических выделений.

Сварные соединения титановых сплавов, в частности ВТ23, полученного методом электронно-лучевой сварки, характеризуется крупными до 500 мкм в центре сварного шва и более мелкими зернами в зонах сплавления и термического влияния (рис.2).

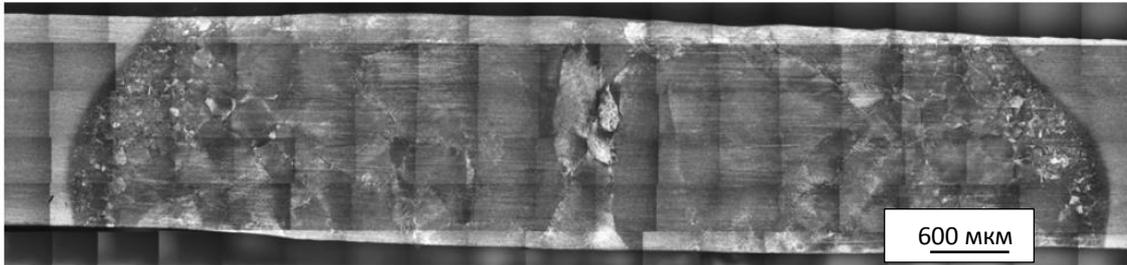


Рис. 2 - Структура сварного соединения титанового сплава ВТ23У

В результате ультразвуковой ударной обработки структура поверхностного слоя претерпевает существенные изменения. Методами оптической металлографии и просвечивающей микроскопии было установлено, что в поверхностном слое формируется нанокристаллическая структура с размером зерна менее 200 нм (рис. 3). Металлографически нанокристаллический слой выявляется как сильно травящаяся область на поверхности зон термического влияния (рис. 1б). Толщина наноструктурированного слоя зависит от механических свойств сплава, его химического состава и режимов ультразвуковой ковки и достигает 5-10 мкм для титановых сплавов и 10-20 мкм для алюминиевых сплавов. Микротвердость поверхностного слоя после наноструктурирования существенно возрастает и превышает исходную на 40-50 %. Полная толщина модифицированного ультразвуковой ковкой поверхностного слоя может достигать 300-500 мкм в зависимости от типа сплава и его структурного состояния.

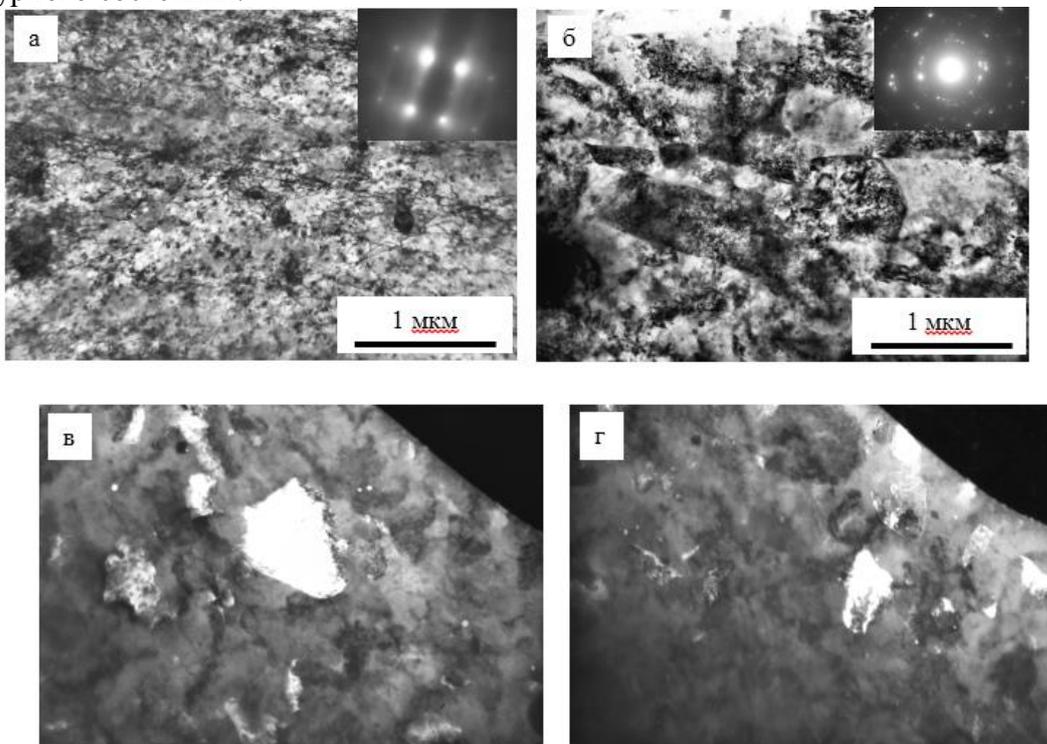


Рис. 3 - Формирование дефектной структуры в тонком поверхностном слое сварного соединения сплава 1424, выполненного методом лазерной сварки: а) - исходное сварное соединение; б), г) – наноструктурированный поверхностный слой; а),б) - светлое поле, в),г) темное поле, в) - угол наклона гониометра 4 градуса, г) -14 градусов

Исследования тонкого поверхностного слоя зоны термического влияния сплава 1424 методом просвечивающей микроскопии показали наличие высоких локальных напряжений в сплаве, обработанном ультразвуковой механической ковкой. Темнопольный анализ показывает, что их значения могут достигать величины G/100. Причем наноструктурирование поверхностных слоев сварных соединений, как показывают рентгеноструктурные исследования, приводит к формированию в сварном шве и зоне термического влияния остаточных напряжений сжатия вместо остаточных напряжений растяжения в необработанном материале. В процессе знакопеременного нагружения остаточные напряжений сжатия будут препятствовать зарождению и распространению усталостных трещин. Однако определяющее влияние на возрастание напряжений зарождения и роста трещины в наноструктурированных поверхностных слоях сварных соединений будет влиять повышение прочности поверхностного слоя в результате уменьшения зерна в процессе УЗМК [3].

Уровень прочности сварных соединений определяется условиями сварки, присадочными проволоками и добавками. Выполненное исследование показало, что соотношение прочности сварного соединения составляет 0,7-0,8 от прочности основного металла при автоматической аргонно-дуговой сварке (алюминиевые-литиевые сплавы В-1461 и В-1963, сталь ВКС12, титановый сплав ВТ18У). При электронно-лучевой сварке прочность сварных соединений титанового сплава ВТ23 близка к прочности основного металла, а при лазерной сварке данного сплава прочность сварных соединений выше прочности основного металла и разрушение всегда проходит по основному металлу.

Испытания образцов сварных соединений на растяжение показывают сильную зависимость значений механических характеристик от режимов УЗМК. Для сплавов В-1461 и -1963 наблюдается снижение прочности и пластичности с увеличением мощности обработки. Ультразвуковая механическая ковка сварных соединений высокопрочных титановых сплавов незначительно снижает прочность соединений, но существенно снижает его пластичность (рис. 4, кривая 2). УЗМК в сочетании с термической обработкой (комбинированная обработка) повышает пластичность (с 2,7 до 7,2% по средним значениям) и прочность сварных соединений сплава ВТ23 (рис. 4, кривая 2). Применение комплексной обработки к сварным соединениям сплава 1424, полученных лазерной сваркой, позволило поднять прочность сварных соединений с 328 до 405 МПа, что соответствует прочности сварного соединения на уровне 0,87 от прочности основного металла (466 МПа).

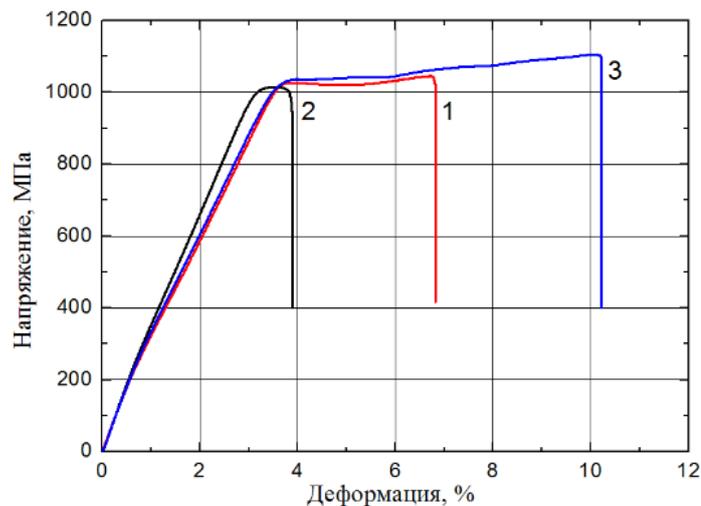


Рис. 4 - Диаграммы растяжения сварных соединений сплава ВТ23 (электронно-лучевая сварка): 1 – состояние поставки; 2 – ультразвуковая механическая ковка; 3 – комбинированная обработка

Исследование фрактур разрушения сварных соединений с наноструктурированным поверхностным слоем, который был сформирован методом УЗМК сварных соединений, показало наличие особенностей развития разрушения в сварных соединениях. На фрактурах сварных соединений четко выявляется поверхностный слой с наноструктурой, сформированной методом ультразвуковой механическойковки. Его толщина составляет 40-50 мкм. Для сварных соединений алюминиевого сплава В-1963 фасетки разрушения в этой области более мелкие, чем в объеме зоны термического влияния. Это свидетельствует о высокой пластичности и высокой релаксационной способности наноструктуры сварных соединений этого сплава.

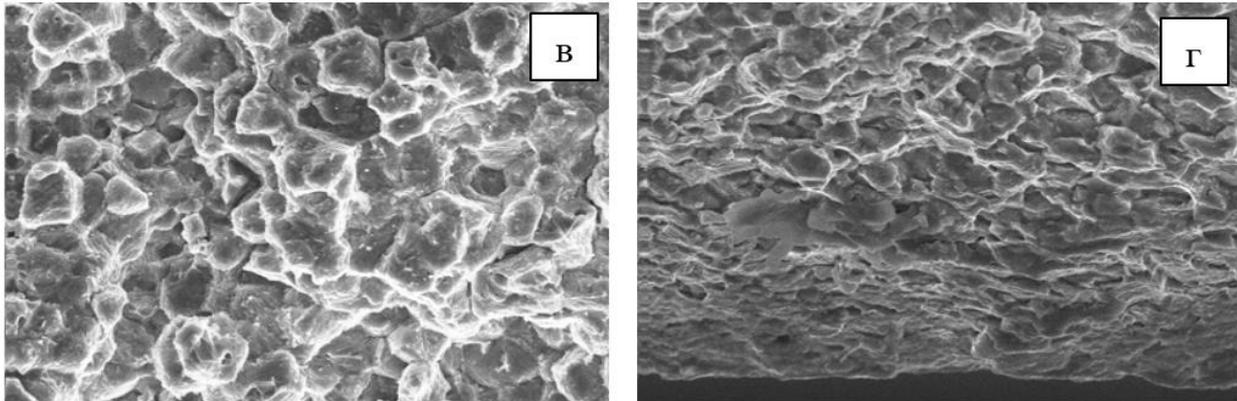


Рисунок 5 – Фрактуры разрушения сварных соединений сплава 1963:
а - в состоянии поставки; б - с наноструктурированным поверхностным слоем;
растровая микроскопия, $\times 350$

Усталостные испытания в условиях малоциклового усталости показывают высокую эффективность наноструктурирования поверхностных слоев сварных соединений высокопрочных алюминий-литиевых, титановых сплавов и сталей методом УЗМК в отдельности и в сочетании с термической обработкой для повышения их усталостной долговечности (таблица 1). Применение этих способов обработки позволилократно повысить усталостную долговечность сварных соединений исследуемых сплавов более чем 1,5 раза для высокопрочной стали и до 12,5 раза для алюминий-литиевых сплавов. Необходимо отметить, что УЗМК является не только высокоэффективным способом повышения усталостной долговечности сварных соединений конструкционных материалов, но и может использоваться для продления ресурса работы сварных конструкций, находящихся в эксплуатации. Такая возможность применения УЗМК показана в работе [4].

Таблица 1 - Число циклов до разрушения образцов сплавов и сварных соединений

Материал, Напряжение	Число циклов до разрушения		
	До обработки	После применения УЗМК	Коэффициент увеличения ресурса
Сталь ВКС12, 700 МПа	33000 – 38000	48500 – 68000	1,5-1,8
Сплав ВЖ172, 700 МПа	до 12800	72000 – 84600	5,8-6,6
Сплав В1461, 170 МПа	20500 – 23500	> 300000	>12,5
Сплав В1963, 160 МПа	20000 – 30000	> 300000	> 10
Сварное соединение ВТ18У, 400 МПа	16600 – 32350	> 150000	> 4,6

Сварное соединение ВТ23, 600 МПа	43200 – 64900	54600 – 92300	1,4
Сварное соединение ВТ8-1, 600 МПа	1700-2200	5220-17000	2,5-7,5

Заключение

С использованием методов оптической металлографии и просвечивающей электронной микроскопии исследована структура сварных соединений высокопрочных сплавов в состоянии поставки и после УЗМК. Установлено, что после УЗМК в поверхностном слое формируется высокодефектная структура с высокой плотностью дислокаций, а непосредственно у поверхности сварного соединения - нанокристаллическая структура с размером зерен менее 200 нм. Толщина нанокристаллического слоя в алюминий-литиевых сплавах может достигать 20 мкм в зависимости от условий обработки.

Показано, что повышение прочности поверхностного слоя в результате его наноструктурирования оказывает определяющее влияние на возрастание напряжений зарождения и роста трещины в наноструктурированных поверхностных слоях сварных соединений. Кроме того, применение УЗМК приводит к формированию в сварном шве и зоне термического влияния остаточных напряжений сжатия вместо остаточных напряжений растяжения в необработанном материале. В процессе знакопеременного нагружения остаточные напряжения сжатия будут препятствовать зарождению и распространению усталостных трещин.

Исследовано влияние наноструктурирования поверхностных слоев сварных соединений высокопрочных сплавов методом ультразвуковой механическойковки на их механические свойства при активном растяжении и циклическом нагружении. Показано, что наноструктурирование поверхностных слоев сварных соединений обеспечивает кратное повышение усталостной долговечности.

Библиографический список:

1. **Панин В.Е., Кибиткин В.В., Плешанов В.С., Почивалов Ю.И., Лебедева Н.А., Кобзева С.А., Лукин В.И., Старова Л.Л.** Мезомасштабные закономерности усталостного разрушения сварных соединений высокопрочной стали // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т.7. Спец. выпуск. – Ч.1, с. 385 – 388.
2. **Панин В.Е.,** Поверхностные слои нагруженных твердых тел как мезоскопический структурный уровень деформации // Физическая мезомеханика. – 2001. – Т.4. – № 3. – С.5-22.
3. **Панин В.Е., Каблов Е.Н., Почивалов Ю.И., Панин С.В., Колобнев Н.И.** Влияние наноструктурирования поверхностного слоя алюминий-литиевого сплава 1424 на механизмы деформации, технологические характеристики и усталостную долговечность. Повышение пластичности и технологических характеристик // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т.15. – № 6. – С. 107-111
4. **Dekhtyar A.I., Mordyuk B.N., Savvakin D.G., Bondarchuk V.I., Moiseeva I.V., Khripta N.I.** Enhanced fatigue behavior of powder metallurgy Ti-6Al-4V alloy by applying ultrasonic impact treatment // Materials science and engineering: A. Lett. 641, 348-359(2015)

Bibliography:

1. **Panin V.E., Kibitkin V.V., Pleshanov V.S., Pochivalov Yu.I., Lebedeva N.A., Kobzeva S.A., Lukin V.I., Starova L.L.** Mesoscale regularities of fatigue fracture of high-strength steel welded joints // Physical Mesomechanics: Lett. 7, No. S1-1, 385-388(2004)
2. Panin V.E. Surface layers of solids as a mesoscopic structural level of deformation // Physical Mesomechanics: Lett. 4, No. 3, 5-22(2001)
3. **Panin V.E., Kablov E.N., Pochivalov Yu.I., Panin S.V., Kolobnev N.I.** Effect of surface nanostructuring on deformation mechanisms and fatigue life of Al-Li alloy 1424. Enhancement of plasticity and technological characteristics // Physical Mesomechanics: Lett. 15, No. 6, 107-111(2012)

4. **Dekhtyar A.I., Mordyuk B.N., Savvakina D.G., Bondarchuk V.I., Moiseeva I.V., Khripta N.I.** Enhanced fatigue behavior of powder metallurgy Ti-6Al-4V alloy by applying ultrasonic impact treatment // Materials science and engineering: Lett. 641, 348-359(2015)

УДК 621.893 - 022.532:621.983

ТОПОКОМПОЗИТЫ ДЛЯ МНОГОПЕРЕХОДНОЙ ВЫТЯЖКИ КУЗОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Г.И. Шульга¹, Т.Г. Шульга²

¹ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет
(Новочеркасский политехнический институт)
имени М.И. Платова, г.Новочеркасск, Россия

²ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»
г.Ростов-на-Дону, Россия

В связи с массовым выпуском легковых и грузовых автомобилей, постоянным совершенствованием их дизайна конструкторы, стремясь уменьшить количество штампуемых деталей, создают конструкции частей кузовов, позволяющие изготавливать их, используя глубокую многопереходную вытяжку.

Кузовные детали автомобилей с равномерной толщиной стенки из листовых сталей могут быть получены прямой и обратной глубокой вытяжкой, реверсивной штамповкой-вытяжкой, фрикционно-реверсивной вытяжкой и другими способами. Глубокая вытяжка частей кузовов автомобилей из листовых сталей представляет сложную задачу, так как листовые стали обладают повышенной склонностью к адгезионному взаимодействию со штамповым инструментом [1, 2], а также должны обладать пластическими свойствами, обеспечивая значительное относительное линейное удлинение и заданную точность получаемого изделия.

Вследствие появления налипания частиц металла, задигов, рисок, царапин и других дефектов снижается качество изготавливаемых изделий, а также стойкость штампового инструмента. Кроме того, при выполнении формообразующих операций не должно происходить разрушения заготовки, потери устойчивости, приводящей к искажению заданной формы детали, изменения толщины стенки заготовки.

Специальным требованиям к пластичности при производстве кузовов легковых автомобилей отвечают тонкие листы стали толщиной 0,55 – 1,5 мм с содержанием углерода менее 1% и с суммарным содержанием фосфора и серы 0,07 %. Для снижения подверженности стальных листов коррозии применяются листы с оцинкованным слоем около 10-30 мкм. С целью снижения массы автомобилей стальные кузова заменяют сплавами из алюминия и магния.

На ОАО «АВТОВАЗ» разработана сортовая микрелегированная сталь АЦ40ХГАФБ взамен хрома, никель-молибденовых сталей 30ХМ, 35ХМ, 38ХГМ, 40ХМ, 40ХГНМ, требующих дорогостоящей, энергозатратной термообработки. Разработан проект кузова с применением новых марок сталей

повышенной прочности, в том числе двухфазных сталей с пределом прочности до 500-700 МПа.

Среди различных современных материалов широко используются в кузовах автомобилей высокопрочные, сверхнизкоуглеродистые стали с пределом текучести равным 340 МПа, а также двухфазные стали с пределом текучести 780-980 МПа.

Для устранения адгезионного взаимодействия, вызывающего появление канавок пропахивания на штамповом инструменте и деформируемом изделии, уменьшения

коэффициента трения между заготовкой и штамповым инструментом используются технологические жидкие, пластичные, пастообразные смазочные материалы и покрытия, наносимые на деформируемое изделие.

В России в автомобильной промышленности при штамповке и глубокой вытяжке кузовных деталей легковых автомобилей применяют технологические смазочные материалы технопарка «Хозрасчетного творческого центра Уфимского авиационного института»: «Росойл-222» – композицию синтетических, растительных и минеральных масел с присадками, загустителями и наполнителями; «Росойл-223» – пластичную композицию минерального масла, не содержащую наполнителей, с функциональными присадками; «Росойл-555» – пластичную композицию на водной и масляной основах с добавлением поверхностно-активных веществ (ПАВ) и функциональных присадок.

Концерн «Carl Bechem GmbH» (Германия) производит: пасту Veruform STP 50 SA для глубокой вытяжки сложных деталей кузова автомобиля из углеродистых и легированных сталей толщиной до 8 мм; масла Veruform STO 2557, Veruform STO 3446 для штамповки и глубокой вытяжки оцинкованной и коррозионностойкой стали, алюминия соответственно толщиной не более 5мм и 6... 8 мм.

Компания IRMCO (США) производит экологически чистые смазочные материалы IRMCO FLUIDS, IRMCO GEL на безмасляной полимерной основе, образующих защитный слой на поверхностях деталей при обработке сталей повышенной прочности. Данные смазочные материалы содержат «теплоактивирующий компонент» – «сверхтемпературные высокопрочные полимеры», которые повышают вязкость жидкости с увеличением нагрева и давления. Компания IRMCO производит смазочные материалы KM 30 323 для холодной штамповки, глубокой вытяжки углеродистых и коррозионностойких сталей; KM 30 146, KM 30 156 для обработки крупногабаритных деталей из оцинкованных и высокопрочных сталей.

Недостатком технологических смазочных материалов, отмеченных выше, является удаление остатков смазочных материалов с полученных изделий с использованием очистительных составов или отжига, невозможность регулирования в трибосопряжении толщины пленок, в зависимости от природы обрабатываемого листового материала триботехнические и адгезионные свойства пленок в зоне контакта.

Актуальной проблемой современной триботехники являются вопросы разработки, применения новых функциональных водорастворимых экологически безопасных технологических двухслойных покрытий, (топокомполитов), позволяющих регулировать антифрикционные свойства поверхностей заготовок подвергаемых деформации, утилизации таких покрытий без нарушения экологических систем окружающей Разработке многослойных покрытий основывается на фрактальном материаловедении, базирующемся на принципах синергетики и теории фрактальной геометрии. Фрактальные кластеры, содержащиеся в топокомполитах, позволяют решать проблему интенсификации производственных технологических процессов, повышения долговечности штампового инструмента, повысить стойкость водных дисперсий топокомполитов к воздействию аэробных и плесневых грибов.

В ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова разработан состав топокомполита ТК-2, содержащий фрактальные нанокластеры, который включает водорастворимые полимерное подсмазочное покрытие ПВ-4 и смазочное покрытие ПСМ-2М, наносимое на подсмазочное покрытие ПВ-4, [3, 4].

Дисперсии покрытий ПВ-4 и ПСМ-2М представляют композиции твердых порошковых материалов, которые могут формировать покрытия на поверхности заготовок путем растворения компонентов покрытий в воде и последующим нанесением их окунанием, распылением. Возможно также прямое нанесением порошковых материалов с использованием аддитивной технологии послойного синтеза.

Современные аддитивные технологии в машиностроении представляют собой «выращивание» изделия (AF-Additive Fabrication или AM-Additive Manufacturing) и означают изготовление его путем «добавления» и предполагают формирование деталей путем последовательного «наращивания» материала слой за слоем [5]. Цифровое описание

многослойных технологических покрытий–CAD (Computer Aided Design), прямое нанесение порошковых материалов для получения таких покрытий с использованием аддитивной технологии послойного синтеза позволят радикально изменить существующие технологии в высокотехнологичных отраслях.

Разработан комплексный метод испытаний на приборе МТЛ-10Г-1 [6], позволяющий моделировать процесс вытяжки изделий из листовых сталей с нанесением технологических смазочных средств (ТСС): жидких, пластичных смазочных материалов и однослойных и топокомполитов.

В прижимное кольцо модернизированного прибора МТЛ-10Г-1, имеющего выточку, помещают испытуемый образец из листовой стали диаметром $48_{-0,02}$ мм, толщиной $0,8 \dots 3$ мм. Выточка в прижимном кольце глубиной на $0,05$ мм большая максимальной толщины образца исключает прижим образца к матрице и образованию гофр на фланце образца при выдавливании пуансоном.

При испытании топокомполитов использовали пуансон сферический диаметром 20 мм, радиус матрицы $R = 2,5$ мм, образцы толщиной $S = 1,5$ мм из листовой коррозионностойкой хромоникелевой аустенитной стали 12X18H10T ГОСТ 5582-75, имеющей временное сопротивление $\sigma_s = 520$ Н/мм², предел текучести $\sigma_{0,2} = 200$ Н/мм², относительное удлинение после разрыва $\sigma_5 = 40\%$. Испытания проводили на следующих режимах: изменение нагрузки при вытяжке $-0,3 \dots 100$ тс; ход пуансона $0 \dots 20,0$ мм со скоростью перемещения $4,0 \dots 24,0$ мм/мин. Испытывали образцы с нанесением и без нанесения топокомполита.

Прибор МТЛ-10Г-1 позволяет получить на диаграммной ленте электронного потенциометра непрерывную запись изменения во времени высоты вытягиваемого колпачка H из заготовки в виде круга в зависимости от усилия деформирования заготовки P , а также определять высоту колпачка H_T , мм, при усилнии, соответствующем пределу текучести материала заготовки P_T , кН; предельную высоту колпачка H_{np} , мм, при максимальном усилнии, соответствующем пределу прочности материала образца P_{Pmax} , кН. Критерии оценки эффективности при испытании технологических смазочных средств и покрытий при вытяжке листовых сталей приведены в табл.1.

Таблица 1 Критерии оценки эффективности топокомполитов при вытяжке листовых сталей

Критерии	Размерность	Формулы, метод определения
1. Усилие, соответствующее пределу текучести материала образца, P_T	кН	Измерение
2. Максимальное усилие, соответствующее пределу прочности материала образца при растяжении P_{Pmax}	кН	Измерение
3. Средний диаметр фланца после деформации образца в трех направлениях под углом 120° после вытяжки $D_{\phi_{cp}}$	мм	$D_{\phi_{cp}} = \frac{D_{\phi_1} + D_{\phi_2} + D_{\phi_3}}{3}$
4 Коэффициент предельной деформации $K_{нд}$	–	$K_{нд} = \frac{D_3}{D_{\phi_{cp}}}$
5. Разность диаметров заготовки и фланца ΔD	мм	$\Delta D = D_3 - D_{\phi_{cp}}$
6. Коэффициент относительной предельной деформации $K_{онд}$	–	$K_{онд} = \frac{D_3 - D_{\phi_{cpp}}}{D_3}$

7. Глубина вытяжки образцов без покрытия H	мм	Измерение
8. Глубина вытяжки образцов с покрытиями H_n	мм	Измерение
9. Относительная глубина вытяжки $H_{ов}$	–	$H_{ов} = \frac{H_n - H}{H_n}$

Результаты сравнительных испытаний образцов с нанесенными цапон-лаком НЦ-62 на основе нитроцеллюлозы и водорастворимым топокомпозитом ТК-2 приведены в табл.2,3.

Таблица 2 Результаты сравнительных испытаний технологических покрытий

Покрытие, топокомпозит	Номер образца	Толщина образца S , мм	Отношение r/S	Разность диаметров ΔD , мм	Глубина вытяжки H_n , мм
Цапон-лак НЦ-60	1	1,44	1,736	7,03	20,07
–«–	2	1,46	1,712	6,98	19,97
–«–	3	1,43	1,748	6,95	20,03
–«–	4	<u>1,44</u>	<u>1,736</u>	<u>6,85</u>	<u>20,04</u>
		1,44	1,733	6,95	20,03
ТК-2	5	1,43	1,748	7,45	20,27
–«–	6	1,45	1,724	7,60	20,32
–«–	7	1,45	1,724	7,70	20,17
–«–	8	<u>1,45</u>	<u>1,724</u>	<u>7,45</u>	<u>20,19</u>
		1,45	1,730	7,55	20,24

Таблица 3 Результаты сравнительных испытаний технологических покрытий

Покрытие топокомпозит	Номер образца	Относительная глубина вытяжки $H_{ов}$	Усилие пределах текучести P_T , кН	Максимальное усилие разрыва P_{Pmax} , кН	Коэффициент предельной деформации K_{nd}	Коэффициент относительной предельной деформации K_{ond}
Цапон -лак НЦ-62-	1	1,54	39,8	60,5	1,186	0,1528
–«–	2	1,60	39,6	61,5	1,188	0,1523
–«–	3	1,58	39,8	61,2	1,195	0,1516
–«–	4	<u>1,57</u>	<u>39,6</u>	<u>61,2</u>	<u>1,186</u>	<u>0,1525</u>
		1,58	39,77	61,11	1,189	0,1523
ТК-2	5	1,73	39,7	60,5	1,184	0,1554
–«–	6	1,67	39,7	61,7	1,188	0,1583
–«–	7	1,59	39,6	61,2	1,191	0,1606
–«–	8	<u>1,63</u>	<u>39,6</u>	<u>61,1</u>	<u>1,184</u>	<u>0,1552</u>
		1,66	39,65	61,13	1,187	0,1574

Отличительной особенностью разработанный топокомпозит ТК-2 является возможность изменять его толщину и адгезионные свойства в трибосопряжении, а также антифрикционные и противоизносные свойства его поверхностного слоя, что позволит

повысить долговечность штампового инструмента, технологической оснастки, качество и точность получаемых изделий.

Топокомпозит ТК-2 может применяться при штамповке, многопереходной вытяжке, гибке, вырубке листовых сталей. После проведения технологических операций топокомпозит ТК-2 легко смывается водой или слабощелочным раствором, который может быть использован в качестве добавки в строительные растворы [7]. ТК-2 не токсичен, экологически безопасен, не оказывает вредное воздействие на работающих и окружающую среду.

Библиографический список:

1. **Грудев А.П.** Трение и смазки при обработке металлов давлением: справочник / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик – М.: Metallurgy –1982. – 312 с.
2. **Уиксов Е.П.** Теория пластических деформаций металлов / Е.П.Уиксов, У.Джонсон, В.Л. Колмагоров и др. Под ред. Е.П. Уиксова, А.Г.Овчинникова – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.
3. **Шульга Г.И.** Улучшение качества поверхности применением функциональных водорастворимых покрытий, содержащих фрактальные нанокластеры // Качество и жизнь 2014. –№1.–С.56-61.
4. **Шульга Г.И., Астахов А.В., Скринников Е.В., Васильев М.А., Васильев Б.Н.** Исследование состава технологического твердого порошкового смазочного материала ПСМ-2 // Новые материалы и технологии их получения: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. г.Новочеркасск, 15 октября 2014 г./Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск:ЮРГПУ (НПИ), 2014 – С.13-18.
5. **Локотков Е.** Безотходное производство, на котором можно выполнять прежде невероятные задачи,–скорое будущее российских аддитивных технологий: <http://www.kommtrasant.ru/doc/2678720>.
6. **Шульга Г.И.** Непрерывные триботехнологии для холодной листовой штамповки изделий из нержавеющей сталей // Изв. вузов Сев.-Кавк. регион. Технические науки. 1994. – №3-4. – С.120-134.
7. **Шульга Т.Г.** Особенности влияния водорастворимых технологических смазочных материалов на почву и воду //Изв. вузов.Сев.-Кавк. регион. Техн.науки, 2001. – № 2. – С.100-102.

Bibliography:

1. **Grudev AP** Friction and lubrication in metal forming: guide / A.P.Grudev, Y.V. Zilberg, VT Tilik – M.: Metallurgy – 1982. – 312 p.
2. **Uiksov E.P.** The theory of plastic deformation of metals / E.P.Uiksov, U.Dzhonson, V.L. Kolmagorov et al., Ed. E.P. Uiksova, A.G.Ovchinnikova - M.: Engineering, 1983. – 598 p.
3. **Shulga G.I.** Improving the quality of the surface using functional water-soluble coatings containing fractal nanoclusters // Quality of life and 2014. –№1. – P.56-61.
4. **Shulga G.I., Astakhov A.V. Skrinnikov E.V, Vasiliev M.A. Vasilyev B.N.** The study of the process of the solid lubricant powder PSM-2 // New materials and production technologies: materials VIII Intern. scientific-practical. Conf. Novochoerkassk, October 15, 2014 / Yuzh. Ros. state. tehn. University (NPI). – Novochoerkassk: YURGPU (NPI) 2014 – P.13-18.
5. **Lokotkov E.** Waste-free production, which can be carried out before an incredible task, -skoroe future Russian additive technologies: <http://www.kommtrasant.ru/doc/2678720>.
6. **Shulga G.I** Continuous tribotechnology for cold stamping stainless steel products // Math. Universities North.-Kavko. region. Technical science. 1994. – №3-4. – P.120-134.
7. **Shulga T.G.** Osobennosti effect of water-soluble lubricants technology to the soil and water // Math. vuzov.Sev.-Kavko. region. Technical Sciences, 2001. – № 2. – P.100-102.

УДК 51-72:[538.951+538.956]

ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД: ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ И МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ

В.Б. Яковлев

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия*

Проблема прогнозирования свойств композиционных материалов, несмотря на более чем полувековую историю развития, является объектом пристального внимания как с экспериментальной, так и с теоретической точек зрения, благодаря разнообразному и широкому спектру своих свойств [1]. При этом трудоемкость, сложность и большая дороговизна разработки и внедрения в производство таких материалов требует постоянного совершенствования методов моделирования свойств композитов для оптимизации характеристик устройств на их основе. Особую актуальность это направление приобретает в связи с началом широкого использования наноконпозиционных материалов. Наиболее широко такие материалы применяются в электро- и радиотехнике, машиностроении. Отсюда актуальным является анализ механических, диэлектрических и пьезоэлектрических свойств композитов [2,3].

В основе анализа характеристик неоднородных сред (поликристаллов и композитов) лежат ряд фундаментальных положений [2-5]: гипотеза эргодичности (из которой следует возможность усреднения по объему), модель формы включений (интегрируемость поверхности включений), случайный кусочно-однородный характер пространственного распределения свойств компонентов композита, наконец, модель межкристаллитной фазы для анализа наноконпозитивов. Для многих практически важных задач современного материаловедения важными оказываются два вида свойств материалов: свойства материала как однородного тела (эффективные характеристики) и распределение локальных полей внутри отдельного элемента неоднородности (включения или кристаллита) при приложении внешних воздействий. Последняя характеристика наиболее удобно описывается при помощи операторов концентрации полей, связывающих внешнее воздействие с локальным значением поля.

Наиболее продуктивным подходом к моделированию свойств композиционных материалов [4,5] является использование исходных полевых дифференциальных уравнений – уравнений равновесия для механики и Пуассона для электростатики. Следует отметить, что предлагаемый подход используется для прогнозирования статических характеристик, однако, при низких частотах, когда длина волны много больше размеров элемента неоднородности, при известных частотных характеристиках каждого компонента, возможно получение и низкочастотных динамических характеристик композита. Основным математическим методом решения этих дифференциальных уравнений с кусочно-однородными материальными характеристиками является метод тензорных функций Грина. Особенностью использования метода функций Грина является введение в рассмотрение однородного тела сравнения, относительно характеристик которого ищется решение исходного уравнения [4]. В таблице представлены уравнения и группы свойств, моделируемых в данной работе. Далее будет изложен подход для моделирования и вычисления свойств диэлектрических материалов [2,3,6-8].

Решение задач для неоднородных (поликристаллических и композиционных) сред основывается на уравнении Пуассона с неоднородными коэффициентами

$$\nabla_i \kappa_{ij}(\mathbf{r}) \nabla_j \varphi(\mathbf{r}) = -4\pi\rho(\mathbf{r}), \quad \varphi(\mathbf{r})|_S = \varphi_0 \quad (1)$$

где $\kappa_{ij}(\mathbf{r})$ – диэлектрическая проницаемость, представляющая собой случайную кусочно-однородную функцию координат, $\varphi(\mathbf{r})$ – потенциал электрического поля, $\rho(\mathbf{r})$ – плотность заряда, S – поверхность, ограничивающая среду, φ_0 – значение потенциала на границе. Решение данной задачи ищется с помощью решения задачи относительно некоторого однородного тела сравнения с характеристиками κ_{ij}^c

$$\nabla_i \kappa_{ij}^c \nabla_i \varphi^c(\mathbf{r}) = -4\pi\rho(\mathbf{r}), \quad \varphi^c(\mathbf{r})|_S = \varphi_0 \quad (2)$$

где индекс «с» обозначены параметры тела сравнения.

Таблица

Диэлектрические среды	Упругие среды	Пьезоэлектрические среды
Определяющие уравнения		
$\nabla_i \kappa_{ij}(\mathbf{r}) \nabla_j \varphi(\mathbf{r}) = -4\pi\rho(\mathbf{r})$	$\nabla_i c_{ijkl}(\mathbf{r}) \nabla_l u_k(\mathbf{r}) = -f_j(\mathbf{r})$	Система из I и II уравнения
Уравнения связи		
$D_i(\mathbf{r}) = \kappa_{ij}(\mathbf{r}) E_j(\mathbf{r})$ $E_i(\mathbf{r}) = -\nabla_i \varphi(\mathbf{r})$	$\sigma_{ij}(\mathbf{r}) = c_{ijkl}(\mathbf{r}) \varepsilon_{kl}(\mathbf{r})$ $\varepsilon_{ij}(\mathbf{r}) = \nabla_{(i} u_{j)}$	$\sigma_{ij}(\mathbf{r}) = c_{ijkl}(\mathbf{r}) \varepsilon_{kl}(\mathbf{r}) + e_{ijk}(\mathbf{r}) E_k(\mathbf{r})$ $D_i(\mathbf{r}) = e_{ijk}(\mathbf{r}) \varepsilon_{jk}(\mathbf{r}) - \kappa_{ij}(\mathbf{r}) E_j(\mathbf{r})$ $E_i(\mathbf{r}) = \nabla_i \varphi(\mathbf{r}), \quad \varepsilon_{ij}(\mathbf{r}) = \nabla_{(i} u_{j)}$
Эффективные характеристики		
$\langle D_i(\mathbf{r}) \rangle = \kappa_{ij}^* \langle E_j(\mathbf{r}) \rangle$	$\langle \sigma_{ij}(\mathbf{r}) \rangle = c_{ijkl}^* \langle \varepsilon_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$	$\begin{bmatrix} \langle \sigma_{ij}(\mathbf{r}) \rangle \\ \langle D_i(\mathbf{r}) \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{ijkl}^* & e_{ijk}^* \\ e_{ijk}^* & -\kappa_{ij}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \langle \varepsilon_{kl}(\mathbf{r}) \rangle \\ \langle E_j(\mathbf{r}) \rangle \end{bmatrix}$
Локальные характеристики		
$E_i(\mathbf{r}) = K_{ij}^E(\mathbf{r}) \langle E_j(\mathbf{r}) \rangle$ $D_i(\mathbf{r}) = K_{ij}^D(\mathbf{r}) \langle D_j(\mathbf{r}) \rangle$	$\varepsilon_{ij}(\mathbf{r}) = K_{ijkl}^\varepsilon(\mathbf{r}) \langle \varepsilon_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$ $\sigma_{ij}(\mathbf{r}) = K_{ijkl}^\sigma(\mathbf{r}) \langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$	$\begin{bmatrix} \varepsilon_{ij}(\mathbf{r}) \\ E_i(\mathbf{r}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ijkl}^\varepsilon & K_{ijk}^{\varepsilon E} \\ K_{ijk}^{E\varepsilon} & K_{ij}^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \langle \varepsilon_{kl}(\mathbf{r}) \rangle \\ \langle E_j(\mathbf{r}) \rangle \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} \sigma_{ij}(\mathbf{r}) \\ D_i(\mathbf{r}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ijkl}^\sigma & K_{ijk}^{\sigma D} \\ K_{ijk}^{D\sigma} & K_{ij}^D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle \\ \langle D_j(\mathbf{r}) \rangle \end{bmatrix}$

Введем обозначения

$$L(\mathbf{r}) = \nabla_i \kappa_{ij}(\mathbf{r}) \nabla_j, \quad L^c(\mathbf{r}) = \nabla_i \kappa_{ij}^c \nabla_j,$$

$$\varphi''(\mathbf{r}) = \varphi(\mathbf{r}) - \varphi^c(\mathbf{r}), \quad L''(\mathbf{r}) = L(\mathbf{r}) - L^c(\mathbf{r}), \quad \kappa''(\mathbf{r}) = \kappa(\mathbf{r}) - \kappa^c.$$

Тогда, вычитая из выражения (1) выражение (2), получим

$$\nabla_i \kappa_{ij}(\mathbf{r}) \nabla_j \varphi(\mathbf{r}) - \nabla_i \kappa_{ij}^c \nabla_j \varphi^c(\mathbf{r}) = 0$$

или, после преобразований,

$$L^c \varphi''(\mathbf{r}) = -L'' \varphi(\mathbf{r}), \quad \varphi''(\mathbf{r})|_S = 0 \quad (3)$$

Будем решать уравнение (3) с помощью метода функции Грина, которую определим уравнением

$$L^c G(\mathbf{r}) = -4\pi\delta(\mathbf{r}), \quad G(\mathbf{r})|_S = 0 \quad (4)$$

Это позволяет представить решение (3) в виде интегральной свертки

$$\varphi''(\mathbf{r}) = -G(\mathbf{r}) * L''(\mathbf{r}) \varphi(\mathbf{r}) \quad (5)$$

Перейдем от потенциала к напряженности электрического поля, откуда

$$E_n''(\mathbf{r}) = -\nabla_n \varphi''(\mathbf{r}) = \nabla_n G(\mathbf{r}) * L''(\mathbf{r}) \varphi(\mathbf{r}) \quad (6)$$

или

$$E_n''(\mathbf{r}) = \int_{S^1} G_{,n}(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1) \kappa_{ij}''(\mathbf{r}_1) E_j(\mathbf{r}_1) dS_i^1 + \int_{V^1} G_{,ni}(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1) \kappa_{ij}''(\mathbf{r}_1) E_j(\mathbf{r}_1) dr_1 \quad (7)$$

Здесь учтено, что $\nabla_n^1 G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1) = -\nabla_n G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1)$. В общем случае тензор Грина необходимо представлять в виде $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1)$, однако в силу статистической однородности рассматриваемого материала, $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1)$.

Выражение (7) можно представить в операторном виде

$$E_n''(\mathbf{r}) = (Q_{ni}(\mathbf{r}) + Q_{ni}^0(\mathbf{r})) \kappa_{ij}''(\mathbf{r}) E_j(\mathbf{r}) \quad (8)$$

Проведем операцию центрирования этого выражения, получим

$$E_n''(\mathbf{r}) - \langle E_n''(\mathbf{r}) \rangle = (Q_{ni}(\mathbf{r}) + Q_{ni}^0(\mathbf{r})) (\kappa_{ij}''(\mathbf{r}) E_j(\mathbf{r}) - \langle \kappa_{ij}''(\mathbf{r}) E_j(\mathbf{r}) \rangle) \quad (9)$$

Фактически в левой части уравнения стоит флуктуация напряженности электрического поля $E_n'(\mathbf{r}) = E_n''(\mathbf{r}) - \langle E_n''(\mathbf{r}) \rangle$.

Проведем анализ правой части (9). Покажем, что

$$Q_{ni}^0(\mathbf{r}) \kappa_{ij}''(\mathbf{r}) E_j(\mathbf{r}) = Q_{ni}^0(\mathbf{r}) \langle \kappa_{ij}''(\mathbf{r}) E_j(\mathbf{r}) \rangle \quad (10)$$

Для начала учтем свойство коммутативности интегральной свертки, согласно которому

$$\int_{S^1} G_{,n}(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1) \kappa_{ij}''(\mathbf{r}_1) E_j(\mathbf{r}_1) dS_i^1 = \int_{S^1} G_{,n}(\mathbf{r}_1) \kappa_{ij}''(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1) E_j(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1) dS_i^1$$

Подынтегральное выражение зависит только от угловых переменных и не зависит от \mathbf{r}_1 , откуда

$$G_{,n}(\mathbf{r}_1) \kappa_{ij}''(\mathbf{r}_1) E_j(\mathbf{r}_1) dS_i^1 = G_{,n}(\mathbf{r}_1) \kappa_{ij}''(\mathbf{r}_1) E_j(\mathbf{r}_1) r_1^2 n_i d\Omega$$

При этом зависимость от $d\Omega = \sin \vartheta d\vartheta d\varphi$ является слабой и определяется произведением направляющих косинусов проекций единичного вектора \mathbf{n} . Для тел достаточно больших размеров поверхность, по которой проводится интегрирование, даже для малых телесных углов, в пределах которых изменением функции $G_{,n}(\mathbf{r}_1) \kappa_{ij}''(\mathbf{r}_1) E_j(\mathbf{r}_1) r_1^2 n_i$ можно пренебречь, будет достаточно большой по сравнению с пространственным масштабом корреляций. Поэтому для таких тел операцию пространственного интегрирования можно рассматривать как усреднение [4], то есть выполняется равенство (10), и выражение (9) примет вид

$$E_n(\mathbf{r}) - \langle E_n(\mathbf{r}) \rangle = Q_{ni}(\mathbf{r}) (\kappa_{ij}''(\mathbf{r}) E_j(\mathbf{r}) - \langle \kappa_{ij}''(\mathbf{r}) E_j(\mathbf{r}) \rangle) \quad (11)$$

Проведем ряд преобразований, в результате которых имеем

$$E_n(\mathbf{r}) = (\delta_{ni} - Q_{nk}(\mathbf{r}) \kappa_{ki}''(\mathbf{r}))^{-1} \langle (\delta_{il} - Q_{lm}(\mathbf{r}) \kappa_{mj}''(\mathbf{r}))^{-1} \rangle^{-1} \langle E_j(\mathbf{r}) \rangle \quad (14)$$

Умножая данное выражение на тензор $\kappa(\mathbf{r})$ и усредняя, получаем выражение для вычисления эффективной диэлектрической проницаемости

$$\kappa_{ij}^* = \langle \kappa_{il}(\mathbf{r}) (\delta_{lm} - Q_{lk}(\mathbf{r}) \kappa_{km}''(\mathbf{r}))^{-1} \rangle \langle (\delta_{mj} - Q_{mn}(\mathbf{r}) \kappa_{nj}''(\mathbf{r}))^{-1} \rangle^{-1} \quad (15)$$

Здесь δ_{ij} – символ Кронекера.

Ядро интегрального оператора $Q(\mathbf{r})$, вторая производная функции Грина, является обобщенной функцией [3-5] и, следовательно, может быть представлена в виде суммы двух составляющих – формальной, зависящей от \mathbf{r} , и сингулярной, зависящей только от $\delta(\mathbf{r})$. Отбрасывание формальной части ядра интегрального оператора $Q(\mathbf{r})$ приводит к тому, что

$$Q_{ni}(\mathbf{r})\kappa_{ij}''(\mathbf{r}_1)E_j(\mathbf{r}_1) = \int_{V^1} G_{,ni}(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1)\kappa_{ij}''(\mathbf{r}_1)E_j(\mathbf{r}_1)dr_1 = g_{ni}\kappa_{ij}''(\mathbf{r})E_j(\mathbf{r}) \quad (16)$$

С физической точки зрения это означает, что мы принимаем гипотезу однородности электрических полей в пределах включения. Окончательно имеем расчетную формулу в виде [7]

$$\kappa_{ij}^* = \langle \kappa_{il}(\delta_{lk} - g_{lm}\kappa_{mk}'')^{-1} \rangle \langle (\delta_{kj} - g_{kn}\kappa_{nj}'')^{-1} \rangle^{-1}, \quad (17)$$

а тензор g_{ij} можно вычислить, используя процедуру, предложенную в [4]. Окончательно имеем

$$g_{ij} = -\frac{1}{4\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \frac{n_i n_j}{n_k \kappa_{kl}^c n_l} \sin \vartheta d\vartheta d\varphi, \quad (18)$$

где $n_1 = \frac{1}{l_1} \cos \varphi \sin \vartheta$, $n_2 = \frac{1}{l_2} \sin \varphi \sin \vartheta$, $n_3 = \frac{1}{l_3} \cos \vartheta$ – компоненты нормали к поверхности эллипсоидального включения.

Выражение (14) вместе с (18) фактически определяют процедуру вычисления операторов концентрации напряженности, а с учетом (17) и операторов концентрации индукции электрического поля [8]

$$\begin{aligned} K_{ij}^E(\mathbf{r}) &= (\delta_{il} - g_{il}\kappa_{lk}'')^{-1} \langle (\delta_{kj} - g_{kn}\kappa_{nj}'')^{-1} \rangle^{-1} \\ K_{ij}^D(\mathbf{r}) &= \kappa_{il}(\mathbf{r})(\delta_{lk} - g_{lm}\kappa_{mk}'')^{-1} \langle \kappa_{kn}(\mathbf{r})(\delta_{nj} - g_{np}\kappa_{pj}'')^{-1} \rangle^{-1} \end{aligned} \quad (19)$$

В представленных соотношениях угловые скобки обозначают операцию усреднения по объему. Для многокомпонентных материалов это усреднение выливается в усреднение по концентрациям компонент, для поликристаллических материалов с изометричными включениями его следует понимать, как усреднение по всем возможным ориентациям кристаллографических осей кристаллитов. Так как тензор g зависит от формы включения (от диска через шар к волокну), то возможно усреднение по форме включений. В случае неизометричной формы элементов неоднородностей возможно усреднение по ориентациям осей волокон или вытянутых эллипсоидальных включений. Последнее важно для моделирования нетканых композитов.

Совершенно очевидно, что представленный подход к моделированию и вычислению диэлектрических свойств, в силу идентичности постановки задачи, может быть использован для анализа упругих и пьезоэлектрических свойств. Следует отметить, что использование выражений (17) и (19) дает возможность учитывать множество факторов, присущих реальным композиционным и поликристаллическим материалам. При этом варьирование параметров тела сравнения дает возможность получать известные в механике и электродинамике композиционных материалов приближения. На основе данного представления были построены модели распространения волн в горных породах, как основы теории прогноза землетрясений, образования механических текстур (прессования, прокатки, вытяжки), модели анализа свойств нанокompозитов, модели низкочастотных свойств диэлектрических композитов, как теоретической основы диэлектрической спектроскопии, вычисление свойств пьезоэлектрических композитов, модели поляризации сегнетокерамики, предельных прочностных характеристик композиционных и керамических материалов.

Библиографический список:

1. Composite Materials. A Vision for the Future. – Springer-Verlag, London, 2011, 220p.
2. Бардушкин В.В., Яковлев В.Б. Механика микроструктур (эффективные и локальные свойства текстурированных поликристаллов и композитов). Саарбрюккен: LAP (Lambert Academic Publishing), 2011, 164 с.

3. **Колесников В.И., Бардушкин В.В., Сычев А.П., Колесников И.В., Яковлев В.Б.** Микромеханика поликристаллов и композитов (напряженно-деформированное состояние и разрушение). – Ростов-на-Дону: изд-во РГУПС, 2012. – 288 с
4. **Шермергор Т.Д.** Теория упругости микронеоднородных сред. – М.: Наука, 1977, 399 с.
5. **Buryachenko V.A.** Micromechanics of Heterogeneous Materials. – New York: Springer, 2007, 686p.
6. **Yakovlev V.B.** Local Stress-Strain Conditions of Textured Polycrystals under High Pressure.// High Pressure Research, 2000, Vol 17, p. 375-383.
7. **Колесников В.И., Яковлев В.Б., Бардушкин В.В., Лавров И.В., Сычев А.П., Яковлева Е.Н.** Об объединении методов оценки эффективных диэлектрических характеристик гетерогенных сред на основе обобщенного сингулярного приближения.// Доклады Академии наук, 2013, т. 452, № 1, с. 27-31.
8. **Колесников В.И., Яковлев В.Б., Бардушкин В.В., Лавров И.В., Сычев А.П., Яковлева Е.Н.** О методе анализа распределений локальных электрических полей в композиционном материале.// Доклады Академии наук. 2016. Т. 467. № 3. С. 275–279.

Bibliography:

1. Composite Materials. A Vision for the Future. – Springer-Verlag, London, 2011, 220p.
2. **Bardushkin V.V., Yakovlev V.B.** Mechanics of structures (effective and local properties of textured polycrystals and composites). Saarbrücken: LAP (Lambert Academic Publishing), 2011, 164p.
3. **Kolesnikov V.I., Bardushkin V.V., Sychev A.P., Kolesnikov I.V., Yakovlev V.B.** Micromechanics of polycrystals and composites (stress-strain state and destruction). – Rostov-on-Don: RSTU, 2012, 288p.
4. **Shermergor T.D.** Theory of elasticity of microinhomogeneous medium. – М.: Наука, 1977, 399p.
5. **Buryachenko V.A.** Micromechanics of Heterogeneous Materials. – New York: Springer, 2007, 686p.
6. **Yakovlev V.B.** Local Stress-Strain Conditions of Textured Polycrystals under High Pressure.// High Pressure Research, 2000, Vol 17, p. 375-383.
7. **Kolesnikov V.I., Yakovlev V.B., Bardushkin V.V., Lavrov I.V., Sychev A.P., Yakovleva E.N.** Association of evaluation methods of the effective permittivity of heterogeneous media on the basis of a generalized singular approximation.// Doklady Physics, 2013, vol. 58, No. 9, p. 379-383.
8. **Kolesnikov V.I., Yakovlev V.B., Bardushkin V.V., Lavrov I.V., Sychev A.P., Yakovleva E.N.** A Method of Analysis of Distributions of Local Electric Fields in Composites.// Doklady Physics. 2016. Vol. 61. No. 3. P. 124–128.

УДК 621.7.043

**АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ДЕТАЛИ**

В.В. Коробейников

*ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»,
г. Ростов-на-Дону, Россия*

Важнейшей задачей в механической обработке наплавленного металла деталей является повышение надёжности и долговечности машин, и связанное с этим повышение

производительности процессов и коэффициента полезного действия. Решение данного вопроса напрямую зависит от создания и освоения прогрессивных малооперационных ресурсосберегающих технологических методов наплавки, обработки и упрочнения нанесённого слоя металла.

Такая зависимость обусловлена возрастающими требованиями к качеству ремонта машин и определяется параметрами качества поверхности и практически всеми важнейшими эксплуатационными свойствами деталей, такими как безотказность, долговечность, сохраняемость и ремонтпригодность.

Проблема обеспечения изделий заданными свойствами возникла с появлением первых методов высокотемпературной обработки различных металлов и не утратила своей актуальности до сих пор. За это время накоплен большой объём знаний и большое количество экспериментальных данных, облегчающих подход к решению поставленной задачи. Возможность технологического управления качеством поверхности деталей машин имеет прогрессивный метод упрочняющей обработки, в основе которого заложено поверхностное пластическое деформирование (ППД).

Поверхностное пластическое деформирование – один из видов упрочняющей обработки, при котором отсутствует образование стружки, и происходит пластическое деформирование тонкого слоя поверхности детали, эффективный и достаточно распространённый способ повышения несущей способности металлических деталей машин. Применение ППД позволяет эффективно влиять на повышение долговечности деталей, работающих в условиях циклического нагружения, трения и воздействия коррозионных сред и имеющих концентраторы напряжений.

Одним из важнейших результатов ППД является возникновение в поверхностном слое металла остаточных напряжений сжатия. Причина их возникновения заключается в увеличении объёма поверхностных слоёв металла при пластической деформации и сопутствующей противодействующей силе нижележащих слоёв, объём которых стремится к постоянству. В результате первые оказываются под воздействием остаточных напряжений сжатия, а вторые - под воздействием остаточных растягивающих напряжений. ППД также изменяет микрорельеф поверхности и улучшает физико-механические свойства поверхностного слоя за счет повышения твердости, предела текучести и сопротивления отрыву.

Эксплуатационные свойства деталей зависят от физико-механических свойств и геометрических характеристик наплавленного слоя, а также условий их работы. По своим свойствам, наплавленный металл имеет существенные различия с основным металлом деталей. И так как значительный разброс механических свойств и нестабильность структуры наплавленного металла ведёт к снижению износостойкости детали, то происходило и происходит постоянное изучение и разработка упрочняющей наплавки деталей, исследование качества, механических свойств и износостойкости наплавленного металла. Продолжается исследование эффекта воздействия введения тепла в зону механической обработки на физико-механические свойства стали, износостойкость и усталостную прочность. Решаются задачи, связанные с трудностью подведения тепла в зону обработки при использовании нагрева детали при термомеханической обработке (ТМО).

При ремонте деталей машин в основном применяют следующие прогрессивные способы наращивания изношенных поверхностей: автоматическую и электродуговую наплавку под слоем флюса, вибродуговую в жидкости, в среде защитных газов и водяного пара. Сам процесс наплавки заключается в нанесении на поверхность детали слоя металла, обеспечивающего увеличение её размеров или повышение износостойкости. Каждый вид наплавки имеет свои отличительные черты, область применения, обеспечивающие эффективность процесса восстановления деталей. Перспективным является способ автоматической наплавки под слоем флюса, разработанный в институте электросварки им. Е.О. Патона. На ремонтных предприятиях его применимость составляет 47 % от общего объёма наплавочных работ по восстановлению изношенных деталей. В последние годы также

распространены вибродуговая наплавка и наплавка в среде защитных газов с применимостью 10 % и 1 % соответственно. После наплавки изношенных поверхностей применяется механическая обработка как окончательный процесс.

Один из способов механической обработки лезвийным инструментом деталей машин – фрезерование горячего наплавленного металла. Для повышения производительности и стойкости режущего инструмента при обработке высокопрочных и высоколегированных сталей и сплавов необходимо уменьшить величину пластической деформации и степень упрочнения, что достигается предварительным подогревом этих материалов до высоких температур при их механической обработке. В свою очередь, наплавленная без фрезерования поверхность, имеет глубокие впадины и выступы. Поэтому применяют наплавку с термофрезерованием, что объясняется повышением износостойкости детали: улучшением структуры наплавленного металла, повышением поверхностной твёрдости и микротвёрдости по глубине металлопокрытий.

Все существующие и перспективные методы технологического упрочнения поверхностным пластическим деформированием подразделяются на статические и динамические. При статических методах упрочнения инструмент, рабочие тела или среда воздействуют на обрабатываемую поверхность с определённой постоянной силой, происходит плавное перемещение очагов воздействия, которые последовательно проходят всю поверхность, подлежащую обработке. При динамических методах инструмент, рабочие тела или среда многократно воздействуют на всю поверхность или на её часть. При этом сила воздействия в каждом цикле изменяется от нуля до возможного максимума.

Накатка роликами – это один из самых распространённых способов обработки деталей ППД. В тяжёлом машиностроении она стала одним из основных методов чистовой обработки крупных деталей. Накатка цилиндрических поверхностей роликами производится с целью отделки или упрочнения без снятия стружки и применения закалки. В процессе накатки один или несколько роликов, перемещаясь по обрабатываемой поверхности, сминают выступы от предшествующей обработки и заполняют впадины, что повышает чистоту поверхности на 2-3 класса и уменьшает диаметр заготовки на величину смятых выступов. Накатке подвергаются детали, изготовленные из материалов, деформируемых без разрушения в холодном состоянии. Существенное влияние на качество обрабатываемой поверхности оказывают форма и размеры роликов. В настоящее время насчитывается около 40 типов конструкций накатных роликов и около 120 их типоразмеров.

Достоинства данного способа: высокая производительность при обработке поверхностей 7-10 класса шероховатости; универсальность приспособлений процесса; высокая стойкость и надёжность роликов; возможность широкого изменения параметров ролика и режимов упрочнения; высокий технико-экономический эффект повышения усталостной прочности, износостойкости, контактной выносливости и долговечности деталей; не требуется последующая доводка и полировка; возможность автоматизации и программирования. Вместе с тем способу присущи и некоторые недостатки: проскальзывание ролика по поверхности деталей, что вызывает дополнительный расход энергии, перенаклёп и нарушение поверхностного слоя; низкий класс получаемой шероховатости.

В различных отраслях машиностроения широко применяется отделочно-упрочняющая обработка деталей машин. Используется при обработке маложёстких и неравножёстких деталей, специальных или сложно-профильных поверхностей. Сущность процесса накатки шариками аналогичен процессу накатки роликами. Особенность процесса составляет: наличие стандартных шаров, диаметром от 10 мм до 35 мм, с высокой точностью обработки и качеством поверхности; отсутствие материальной оси вращения шаров и самоустанавливаемость их относительно обрабатываемой поверхности под действием сил трения и обкатывания; отсутствие или незначительность проскальзывания шаров; возможность работы с меньшими давлениями и получения более низкой шероховатости. Главным и существенным недостатком по сравнению с накаткой роликами является низкая производительность процесса.

Следующий рассматриваемый способ обработки – алмазное выглаживание. Заключается в пластическом деформировании поверхностных слоёв обрабатываемой детали, скользящим по ней кристаллом алмаза, рабочая часть которого выполнена в виде сферы или боковой поверхности цилиндра. Вследствие такой обработки высота неровностей значительно уменьшается и упрочняется поверхностный слой детали. Уступая по производительности накатке роликами и шариками, алмазное выглаживание обладает целым рядом преимуществ: благодаря высокой твёрдости и износостойкости алмаза даёт возможность обрабатывать практически все металлы; весьма малая высота неровностей вследствие низкой шероховатости и адгезионной способности кристалла; небольшие давления на инструмент, следовательно, и возможность упрочнения маложёстких деталей; возможность обрабатывать наружные, внутренние цилиндрические, плоские и фасонные поверхности.

Для упрочнения сложно-фасонных поверхностей существует дробеструйный метод. К таким поверхностям могут быть отнесены: рессоры, валы, пружины, зубчатые колёса, шаровые опоры и т. д. Сущность процесса обработки дробью состоит в том, что поверхность окончательно изготовленной детали подвергается холодной пластической деформации посредством ударного воздействия потока чугуновой или стальной дроби, диаметром 0,4-2 мм, направляемой на поверхность со скоростью 50-100 м/с. При дробеударном упрочнении сухой дробью наблюдаются следующие преимущества: простота конструкции установок, обработка труднодоступных участков детали; простота обращения с дробью; возможность сепарации дроби потоком воздуха. Однако существует такой недостаток как высокие локальные температуры (600-650 °С), относительно высокая шероховатость поверхности, активный перенос материала дроби на поверхность и нестабильность режима упрочнения. Перечисленные недостатки отсутствуют в случае применения гидродробеструйного упрочнения, то есть с применением смазывающе-охлаждающей жидкости. Но в этом случае требуются более высокие затраты при эксплуатации.

Чеканка – метод обработки, заключающийся в том, что специальным инструментом при помощи механического, пневматического или электромеханического вибратора наносят частые сильные удары по обрабатываемой поверхности. В качестве инструмента применяют сферические, эллипсные или специальной формы бойки, ролики, шары из высокопрочной стали. Преимущества: возможность обработки деталей сложной формы; возможность широко варьировать типы и форму бойка, добиваясь разных прочностных характеристик поверхности. Недостатки: невозможность совмещения с наплавкой; сложность установки; необходимость специального приспособления; высокая шероховатость поверхности детали после чеканки; низкая производительность.

Подводя итоги изучения данного вопроса, при проведении анализа выбора способа восстановления изношенных поверхностей деталей, делаем вывод о наибольшей целесообразности в применении автоматической электродуговой наплавки под слоем флюса. Данный способ восстановления обеспечивает: высокую производительность процесса за счёт применения больших плотностей тока; экономичность процесса в отношении расхода электроэнергии и расходных материалов; возможность получения слоя металла большой толщины; равномерность слоя и небольшие припуски на последующую механическую обработку; возможность введения около 30 % легирующих элементов и получения слоя металла почти любого химического состава; независимость качества наплавленного металла от квалификации исполнителя; высокий коэффициент наплавки.

Аналогичным образом, анализ современных методов технологического упрочнения ПИД позволил выявить ряд преимуществ по сравнению с обработкой точением, шлифованием, полированием, доводкой: сохраняется целостность волокон металла и образуется мелкозернистая структура в поверхностном слое; отсутствует шаржирование поверхности; отсутствуют термические дефекты; стабильны процессы обработки, обеспечивающие стабильное качество поверхности; низкая шероховатость поверхности; создание благоприятных сжимающих напряжений; плавно и стабильно повышаются микротвёрдость, износостойкость, усталостная прочность, контактная выносливость;

позволяет механизировать ручной труд и повысить производительность. Но есть и недостатки: подавляющее большинство методов не повышают геометрической точности поверхности; при обработке тонкостенных и неравно-жестких деталей может происходить деформация поверхности на 5-10 мкм и более; в связи с пластическим течением металла при использовании некоторых методов на кромках поверхностей образуются наплывы металла толщиной 0,03-0,3 мм.

Проанализировав все методы ППД поверхностного слоя деталей и принимая во внимание требования, предъявляемые к установке: дешевизна инструмента и расходных материалов; возможность изготовления и ремонта установки на предприятии; простота обслуживания; высокая производительность; возможность работы на стандартном оборудовании; возможность передачи восстановленной детали после токарной обработки на сборку (минуя закалку), а также принимая во внимание сложившуюся сложную обстановку на ремонтных предприятиях, выбираем упрочняющую технологию, использующую накатку наплавленного металла накатным роликом.

В данной статье преимущественно рассмотрена обработка методом поверхностного пластического деформирования, в том числе ознакомление с основными видами ППД.

Методы обработки основаны на использовании пластических свойств металлов, т.е. способности металлических изделий принимать остаточные деформации без нарушения целостности металла. Отделочная обработка методами поверхностного пластического деформирования сопровождается упрочнением поверхностного слоя, что очень важно для повышения надежности работы деталей. Детали становятся менее чувствительными к усталостному разрушению, повышаются их коррозионная стойкость и износостойкость, удаляются риски и микротрещины. В ходе обработки шаровидная форма кристаллитов поверхности металла может измениться, кристаллиты сплющиваются в направлении деформации, образуется упорядоченная структура волокнистого характера. Поверхность заготовки принимает требуемые формы и размеры в результате перераспределения элементарных объемов под воздействием инструмента.

Обработку без снятия стружки выполняют на многих металлорежущих станках и установках, используя специальные инструменты. Созданы также особые станки, на которых наряду с резанием заготовки обрабатывают пластическим деформированием с подачей тепла в зону обработки.

Ожидается, что эти методы все больше будут применяться для высокоточной обработки и использоваться для деталей, размеры которых будут иметь точность в долях микрометра.

Несмотря на несомненные успехи в ряде направлений, проблема улучшения эксплуатационных свойств металлопродукции далеко не решена. Наряду с совершенствованием существующих методов следует искать новые, желательны легко реализуемые в промышленности, пути защиты и модификации поверхности.

Библиографический список:

1. **Бойко, Н.И.** Малооперационная ресурсосберегающая технология повышения качества наплавленного металла / Н.И. Бойко, Г.В. Санамян // Ростов-на-Дону. – 2007, – 226 с.
2. **Бойко, Н.И.** Исследование температуры наплавленного металла в зоне механической обработки / Н.И. Бойко, К.С. Фисенко, Г.В. Санамян // Ростов-на-Дону. – 2015, – 139 с.

Bibliography:

1. **Boyko, N.I.** Maloperation resource-saving technology for improving quality of the deposited metal / N.I. Boyko, G.V. Sanamyan // Rostov-on-don. – 2007, p. 226.
2. **Boyko, N.I.** Study of the temperature of the deposited metal in the zone of machining / N.I. Boyko, S.K. Fisenko, G.V. Sanamyan // Rostov-on-don. – 2015, – p. 139.

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ УЗЛОВ ТРЕНИЯ, РАБОТАЮЩИХ В ТРИБОСИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ МЕХАНИЧЕСКОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ

В.И. Колесников, П.Г. Иваночкин, А.И. Воропаев
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»,
г. Ростов-на-Дону, Россия

Задача исследования распределения температурного поля в цилиндрическом подшипнике скольжения сухого трения была объектом внимания многих ученых в силу своей огромной практической важности [1-5]. Однако вопрос определения теплового поля подшипника при вибрационном нагружении, несмотря на предпринятые попытки его анализа [6-7], остается актуальным.

Следует отметить, что соответствующая задача поставлена перед нами со стороны ЦАГИ в связи с созданием демпфера вертолетных конструкций, в котором одним из важнейших условий практического применения является износостойкость трибосопряжений.

Для обеспечения высокой износостойкости трибосопряжений, работающих в условиях динамического нагружения необходимо знать влияние параметров вибрации (частоты и амплитуды) на коэффициент трения и интенсивность изнашивания. Кроме того, известно, что в процессе трения под воздействием возникающих температур происходят существенные изменения свойств материалов поверхностных слоёв, влияющих на их физические, механические и трибологические характеристики. Поэтому необходимо знать температурное поле в узле трения при нестационарном нагружении в контактирующих образцах, а также изучить влияние амплитудно-частотных параметров на интенсивность изнашивания.

Рассмотрим задачу о распределении температурного поля для сопряжения «вал-втулка». Подшипниковый узел включает следующие детали: стальной вал I радиусом r_1 с нанесённым антифрикционным слоем $r_2 - r_1$ из полимерного композита, втулка подшипника II , моделируемая цилиндром толщиной $r_3 - r_2$ и длиной h , стальную обойму (корпус подшипника) III . Вал вдавливается во внутреннюю поверхность втулки распределенной вдоль оси подшипника силой $P = P_0 \cdot \sin(\omega t)$ и вращается с постоянной угловой скоростью Ω . Предполагается, что область контакта вала с втулкой – цилиндрический прямоугольник

$$r = r_2, \quad |z| \leq h/2, \quad |\theta| \leq \theta_0$$

В рассматриваемом узле (рис. 1) действуют два независимых источника тепла: внешний и внутренний.

Внутренний источник тепла. Принципиальное отличие циклического нагружения от статического состоит в наличии разогрева, возникающего в результате перехода некоторой части работы внешней силы, деформирующей тело, в тепловую энергию. Этот переход обусловлен несовершенной упругостью реальных тел. Так, кривые нагрузка-деформация и разгрузка-деформация не совпадают (рис. 2). Здесь ветвь OA представляет собой зависимость напряжения от деформации при растяжении, а ветвь AC – то же самое при разгрузке. Площадь, ограниченная такой петлеобразной кривой, характеризует величину энергии деформирования, которая необратимо рассеивается в материале, превращаясь в тепло. Учёт разогрева при циклическом нагружении для композиционных материалов в случае теплового расчёта имеет особое значение в связи с их малой теплопроводностью и большой чувствительностью их прочностных свойств к температуре. Широкое экспериментальное изучение разогрева полимерных материалов при динамическом нагружении проведено в работе [8], где предложена формула, позволяющая определять величину тепловых гистерезисных потерь в зависимости от частоты и величины динамического нагружения.

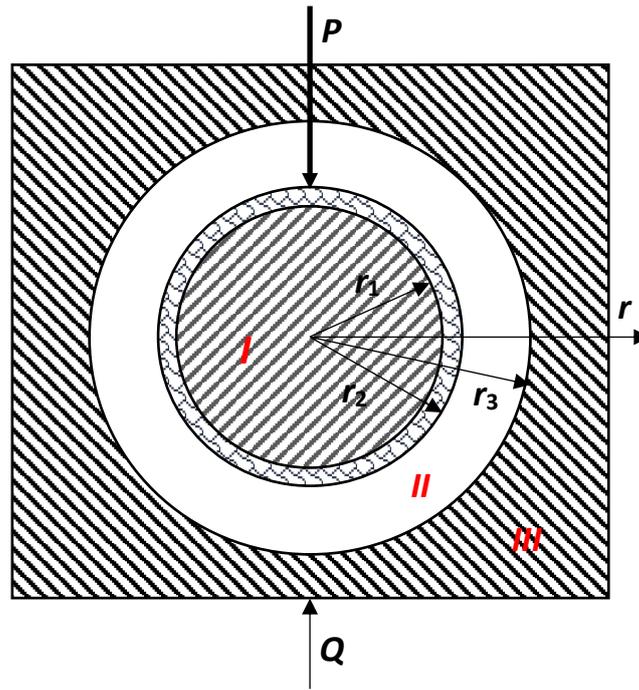


Рис. 1 – Схема теплового расчёта: I – вал; II – подшипник; III – корпус подшипника

Примем, что интенсивность тепловых гистерезисных потерь в глубине полимерного слоя убывает экспоненциально [9]:

$$W = m_0 W_0 e^{-\gamma r}, \quad W_0 = 0,2 \omega p_0^2 J, \quad (1)$$

где $J = \frac{\sin \varphi}{E}$, $\gamma = \frac{0,4}{b}$ – коэффициент, характеризующий затухание возмущений в слое полимера; W_0 – величина тепловых гистерезисных потерь в месте динамического возмущения; b – полуширина площадки контакта, м; p_0 – максимальное давление на площади контакта, Н/м; φ – угол сдвига между амплитудами напряжения и деформации, рад.; ω – частота динамического нагружения; m_0 – коэффициент, равный доле энергии деформирования, перешедшей в тепло.

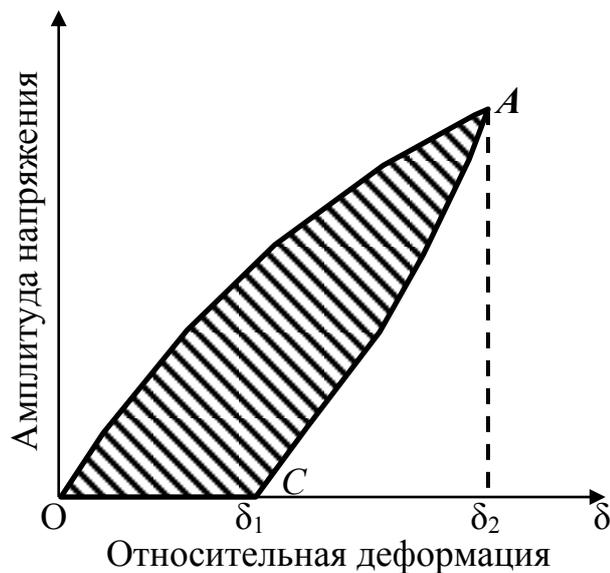


Рис. 2 – Гистерезисная кривая растяжение – сокращение

Очевидно, что m_0 всегда меньше единицы, так как не вся работа переходит в тепло, а часть её затрачивается на разрыв химических связей, электризацию и т.д. С целью установления максимального нагрева Л.А. Галин [10] полагает, что $m_0 = 1$.

Из соотношения (1) видно, что тепловыделение зависит от температуры: так же, как от

неё зависит величина $J_{\text{теп}} = \frac{\sin \varphi}{E}$ называемая податливостью потерь.

Поверхностный источник тепла. Будем считать, что работа сил трения полностью превращается в тепло в зоне контакта вала с втулкой. Тогда граничное условие в области контакта (количество тепла, поглощаемое валом) имеет вид:

$$k_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha \omega r_2 f q(\theta, z) \quad r = r_2, |z| \leq h/2, |\theta| \leq \theta_0 \quad (2)$$

где T_2 - температура покрытия, k_2 - коэффициент теплопроводности покрытия, α - коэффициент разделения тепла между валом и втулкой, f - коэффициент трения, $q(\theta, z)$ - контактное давление.

Следуя [1] будем считать, что в области $r = r_2, |z| \leq h/2, |\theta| \geq \theta_0$ тепловой поток отсутствует

$$\frac{\partial T_2}{\partial r} = 0 \quad r = r_2, |z| \leq h/2, |\theta| \geq \theta_0 \quad (3)$$

Вне подшипника происходит теплообмен вала с окружающей средой

$$k_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} + H(T_2 - T_0) = 0 \quad r = r_2, |z| \geq h/2 \quad (4)$$

где H - коэффициент теплоотдачи вала, T_0 - температура окружающей среды.

Для определения температуры воспользуемся уравнением теплопроводности

$$\frac{1}{\chi} \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial T_2}{\partial z^2} \quad (5)$$

где χ - коэффициент температуропроводности.

На границе вала и покрытия будем считать выполненными условия идеального теплового контакта

$$T_1 = T_2, \quad k_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = k_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \quad r = r_1, \quad (6)$$

где k_1 - коэффициент теплопроводности вала.

Тепловая задача для втулки подшипника формулируется следующим образом

$$k_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} = (1 - \alpha) \omega r_2 f q(\theta, z) \quad r = r_2, |z| \leq h/2, |\theta| \leq \theta_0 \quad (7)$$

где T_3 - температура втулки, k_3 - коэффициент теплопроводности втулки.

По физическому смыслу задачи градиент температуры в направлении от ободки к втулке мал, поэтому можно считать заданным закон распределения температуры по углу θ [3]:

$$T_3(\theta) = D_0 + D_1 \cos \theta \quad r = r_3 \quad (8)$$

где D_0 и D_1 - константы.

Тепловой режим подшипника будем считать установившимся и усредним задачу (2)-(5) по углу θ .

$$T^* = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} T_2 d\theta$$

Постановка и решение задачи. Определим температурное поле в подшипнике (см. рис.

1) при следующих допущениях:

- процесс стационарный, т.е. интенсивность источников тепла, а также теплофизические свойства материалов и окружающей среды не зависят от времени;
- материал подшипника однороден и изотропен;
- распределение температур осесимметрично;
- толщина покрытия из полимерного материала относительно мала, $r_2 - r_1 = 2-5$ мм, поэтому теплоотдачей с торцевой поверхности покрытия пренебрегаем.

Распределение температур в поверхностном слое вала при сделанных предположениях опишется следующим образом:

$$\chi \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T^*}{\partial r} + \frac{\partial T^*}{\partial z^2} \right) = -w_0 e^{-\gamma(r-r_2)} \tag{9}$$

Для решения сформулированной задачи воспользуемся методом, предложенным нами в работе [4]. Проведя соответствующие преобразования и принимая числовые значения параметров: $r_1 = 0,04$ м; $r_3 = 0,05$ м; $P_0 = 80$ МПа, $\omega = 50$ Гц; $v = 1$ м/с; теплопроводность композиционного покрытия $k_2 = 2,03$ Дж/(м·ч·град); коэффициент трения $f = 0.15$; коэффициент теплоотдачи $H = 3,5 \cdot 10^5$ Дж/(м·ч·град); модуль упругости $E = 2,8 \cdot 10^{11}$ Па получим, что максимум температуры находится не на поверхности скольжения $r = r_2$, а в подповерхностном слое – внутри композиционного покрытия. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании и создании демпфирующих трибосистем.

Следующим этапом наших исследований была оценка влияния амплитуды и частоты динамического воздействия на коэффициент трения и интенсивность изнашивания, рассматриваемого трибосопряжения. С этой целью мы разработали методику и установку, предусматривающую возможность варьирования следующих параметров: частоты и амплитуды колебаний в трёх направлениях X, Y, Z и толщины облицовочного слоя (рис. 3).

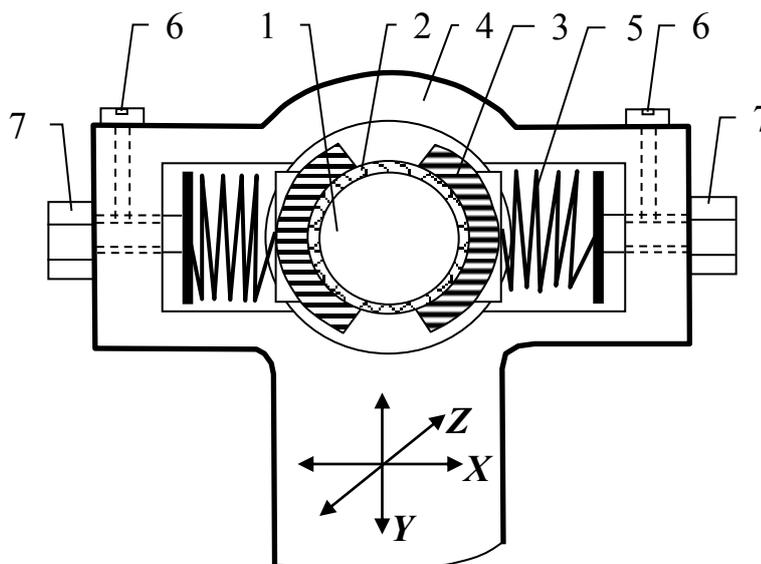


Рис. 3 – Устройство для исследования влияния динамического нагружения на коэффициент трения и интенсивность изнашивания

Испытываемые ролики 1 с нанесённым антифрикционным слоем 2 и контробразцы 3, представляющие собой сегменты с площадью касания $1,5 \cdot 10^{-4}$ м² устанавливались с противоположных сторон вала. Рама 4, в которой располагались образцы, снабжена нагрузочным устройством 5 и крепилась к столу трёхкомпонентного вибростенда. Частота (от 1 до 400 Гц) и амплитуда (до 3 мм) колебаний могли устанавливаться и регулироваться как по одной координате, так и в трёх взаимно перпендикулярных направлениях. Нагружали образцы сжатием пружин 5 посредством винтов 7. Стопоры 6 предохраняли от самооткручивания винтов при вибрации. С помощью приборов можно было постоянно следить за частотой, амплитудой колебаний и фиксировать момент трения и износ.

Получено, что наибольшая интенсивность изнашивания вала с нанесённым антифрикционным слоем наблюдается при колебаниях вдоль оси вала, а минимальная – при колебаниях, перпендикулярных к плоскости трения. При этом установлено, с ростом частоты вдоль оси X интенсивность изнашивания возрастает во всём частотном диапазоне от 0 до 400 Гц, а коэффициент трения до 100 Гц практически не меняется, а с последующим её повышением увеличивается в 1,6 раза. С ростом амплитуды колебаний вдоль оси X от 0,2 до 0,8 мм интенсивность изнашивания возрастает в 1,6 раза, а коэффициент трения – в 1,4 раза.

Дальнейшими исследованиями предусматривается изменение не только амплитуды и частоты, но и толщины нанесённого антифрикционного слоя.

Библиографический список:

1. Бабешко В.А. К расчету контактных температур, возникающих при вращении вала в подшипнике / В.А. Бабешко, И.И. Ворович // ПМТФ, 1968. №2. С. 135-137.
2. Александров В.М. О расчете контактных температур возникающих при вращении вала в подшипнике / В.М. Александров, Е.А. Губарева // Трение и износ. 2007. Т.28, №1 С. 39-43.
3. Добычин М.Н. Подшипники скольжения без смазки / В кн. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. Кн. 2. М.: Машиностроение. 1979. 358 с.
4. Колесников В.И. К расчету температурного поля двухслойного вкладыша радиального подшипника скольжения / В.И. Колесников, П.Г. Иваночкин, А.В. Шумидуб // Трение, износ и смазка в узлах машин: межвуз. тематич. сб. Ростов н/Д: РИИЖТ, 1989. С 46-49.
5. Расчет термоупругих контактных давлений в подшипниках с полимерным покрытием / В.М. Александров и др. // Сб. Контактные задачи и их инженерные приложения. М.: НИИМАШ. 1969. С.214-220.
6. Колесников В.И. Влияние вибрации вала на температурный режим короткого двухслойного подшипника скольжения / В.И. Колесников, С.А. Подрезов, В.А. Кучеров // Известия СКНЦ ВШ, серия Технические науки. 1984. №2. С. 119-125.
7. Колесников В.И. Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах М.: Наука. 2003. 279 с.
8. Бартенев Г.М., Зеленев Ю.В. Физика и механика полимеров. М.: Высшая школа, 1983 - 391 с
9. Куцер Э.В. Исследование разогрева деталей металлополимерных узлов трения с локальным силовым контактом. Автореф. дис.... канд. техн. наук. Тбилиси. ИММ и ПМ. 1969.
10. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости. М.: Гостехиздат. 1953. 275 с.

Bibliography:

1. Babeshko VA The calculation of contact temperatures arising at rotation of the shaft in the bearing / VA Babeshko, II Vorovich // AMTP, 1968. №2. Pp 135-137.
2. VM Alexandrov On calculation of contact temperatures arising at rotation of the shaft in the bearing / V.M. Aleksandrov, EA Gubarev // Friction and Wear. T.28 2007, №1 pp 39-43.
3. Dobychin MN Bearings without lubrication / In. Friction, wear and lubrication: Manual. In 2 kn. Bk. 2. M.: Mechanical engineering. 1979. 358 p.

-
4. Kolesnikov VI The calculation of the temperature field of the two-layer insert radial plain bearing / VI Kolesnikov, PG Ivanochkin, AV Shumidub // Friction, wear and lubrication in machines units: Hi. Themate. Sat. Rostov-on-Don: RIRTE, 1989. Pp. 46-49.
 5. Calculation thermoelastic contact pressures in the bearings coated / VM Alexandrov et al. // Proc. Contact problems and their engineering applications. M.: NIIMash. 1969. S.214-220.
 6. Kolesnikov VI Influence of shaft vibration on the temperature regime of short double-layer plain bearing / VI Kolesnikov, SA Podrezov, VA Kucherov // News SKNTS VSH series Engineering. 1984. №2. Pp 119-125.
 7. Kolesnikov VI Thermal processes in metal tribosystems M.: Nauka. 2003. 279 p.
 8. GM Bartenev, UV Zelenev Physics and mechanics of polymers. M.: Higher School, 1983 – 391 p.
 9. Kucera EV Warm-up study of metal-parts of friction units with the local power contact. Author. Dis cand. tehn. Sciences. Tbilisi. IMM and PM. 1969.
 10. LA Galin Contact problems of the theory of elasticity. M.: Gostekhizdat. 1953. 275 p.

СЕКЦИЯ 6
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИСПЫТАНИЙ НА ТРЕНИЕ И ИЗНОС

УДК 620.179.16

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТАДИЙ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
МАТЕРИАЛОВ ПО ДАННЫМ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ**

С.И.Буйло¹, П.Г.Иваночкин², Н.А.Мясникова²

¹*Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И.Воровича ЮФУ*

²*Ростовский государственный университет путей сообщения*

На многих железных дорогах расходы в рельсовом хозяйстве стоят на третьем месте после затрат на оплату труда и топливно-энергетических ресурсов. Обеспечение соответствующих коэффициентов трения на рабочей грани и поверхности катания головки рельса в заданных пределах может способствовать существенному снижению затрат за счет уменьшения износа рельсов, колес и сокращения расхода топлива.

В настоящее время испытывается система, основанная на создании на боковой поверхности рельса многослойного антифрикционного наномодифицированного покрытия, обладающего блокировкой вредных сегрегационных явлений [1]. Новое покрытие состоит из подложки (силового каркаса), представляющей собой слой с высокой шероховатостью и антифрикционного слоя из наноструктурированного полимерного композиционного материала. Нанесение антифрикционной компоненты на силовой каркас обеспечивает низкие значения коэффициента трения при относительно высокой износостойкости пары трения. Силовой каркас представляет собой нанесенный на поверхность рельса методом электроискрового легирования слой металла толщиной 100...200 мкм. В качестве антифрикционного слоя многослойного покрытия использованы композиции на основе политетрафторэтилена, наполненного наноразмерными наполнителями на основе магния, хрома, марганца.

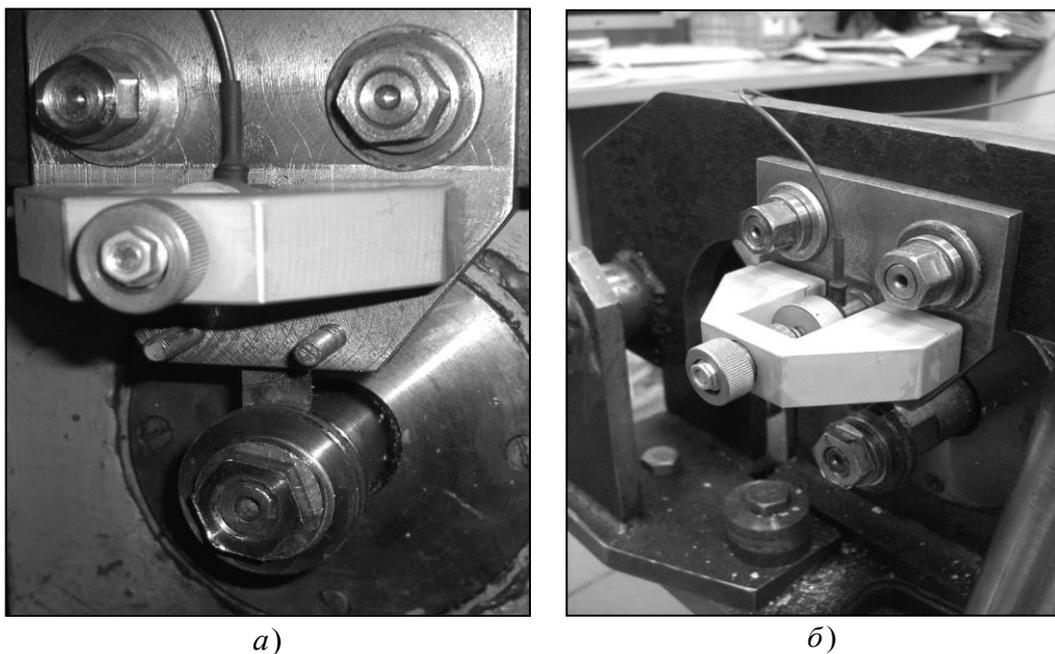


Рис. 1. Фрикционная пара «ролик-колодка» (а)
и датчик АЭ с магнитным креплением (б).

Для исследования фрикционных свойств этого нового многослойного покрытия нами был использован метод акустико-эмиссионной (АЭ) диагностики.

Суть метода АЭ состоит в анализе параметров чрезвычайно слабого ультразвукового излучения, сопровождающего изменения структуры диагностируемого твердого тела или физико-химические процессы в жидкой среде [2-7]. Метод АЭ в последнее время находит все большее применение в решении задач диагностики изделий железнодорожного транспорта, однако, пока в основном, для контроля трещин в литых конструкциях и определения координат растущих дефектов [5].

Связь параметров АЭ с особенностями фрикционного взаимодействия пары ролик-колодка с многослойным наноструктурированным антифрикционным покрытием исследовалась нами на машине трения СМТ-1. Упрощенная схема экспериментов показана на рис. 1.

Испытываемое покрытие наносилось на вращающийся с постоянной скоростью металлический ролик диаметром 40 мм, к которому с постоянным калиброванным усилием сверху прижималась металлическая колодка (рис. 1а). Приемный датчик АЭ через слой контактной жидкости с помощью «магнитной присоски» прижимался к хвостовой части колодки (рис. 1б). Принятые датчиком сигналы АЭ усиливались предварительным усилителем и далее по кабелю подавались на вход цифрового измерительного комплекса A-Line32D фирмы Interunis.

В ходе экспериментов установлена существенная разница амплитудных и энергетических параметров сопутствующего акустического излучения различных материалов при незначительном различии спектрального состава АЭ на установившихся стадиях трения [6,7]. Так, на начальной стадии разрушения материала или покрытия у всех исследованных образцов зарегистрировано значительное (до 100 раз) увеличение амплитуды излучения). На стадии начала разрушения покрытий в спектрах регистрируемой АЭ у всех образцов появляется большое количество дискретных частот излучения во всей рабочей полосе от 30 до 500 кГц (рис. 2).

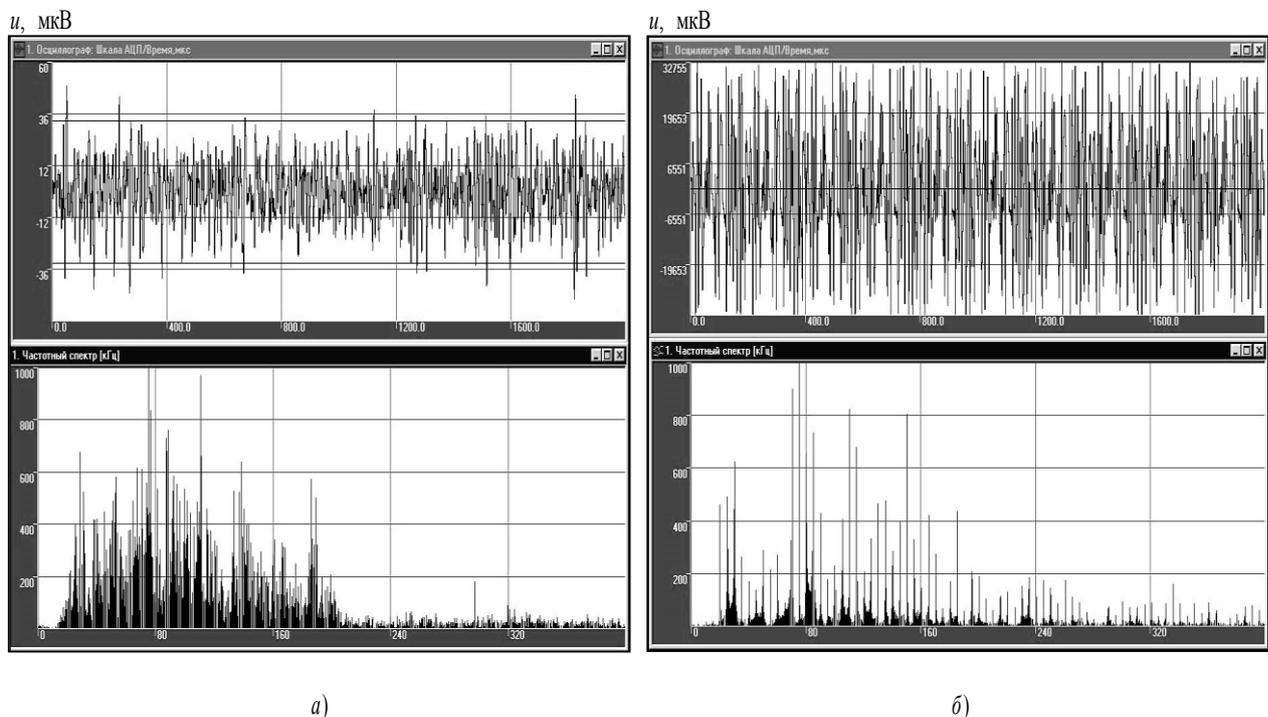


Рис. 2. Форма и спектральный состав сигналов АЭ на начальных (а) и конечных (б) стадиях фрикционного взаимодействия пары ролик-колодка с многослойным наномодифицированным покрытием.

Из анализа принимаемых сигналов следует, что процессы фрикционного взаимодействия сопровождаются настолько большим количеством излучаемых актов АЭ, что это приводит к почти полному перекрытию регистрируемых сигналов АЭ. Исследования показывают, что практически все отечественные и зарубежные АЭ диагностические комплексы, включая и такие известные системы, как Spartan и A-Line32D теряют из-за перекрытия более 90% событий АЭ при высокой интенсивности источников АЭ внутри тела [2,3].

Для устранения этого недостатка, нами предложен и развивается принципиально новый междисциплинарный подход, позволяющий восстановление истинного (излученного внутри тела) потока актов АЭ по регистрируемым сигналам АЭ [2,3]. Суть подхода состоит в определении требуемых характеристик исследуемого процесса по плотностям (или функциям распределения) параметров, общий вид которых устанавливается исходя из физической природы эффекта акустической эмиссии. При этом параметры конкретного распределения оцениваются по еще не перекрывшимся импульсам, а затем распределение экстраполируется и в область сильного искажения и перекрытия принимаемых сигналов эмиссии. Нами установлено, что в большинстве случаев плотность функции распределения временных интервалов между актами АЭ соответствует плотности распределения интервалов между событиями пуассоновского потока (рис. 3). Задача восстановления истинного (излученного внутри тела) потока актов АЭ по регистрируемым сигналам АЭ для этого случая была рассмотрена нами ранее и полученные алгоритмы восстановления доведены до простых инженерных соотношений [2,3].

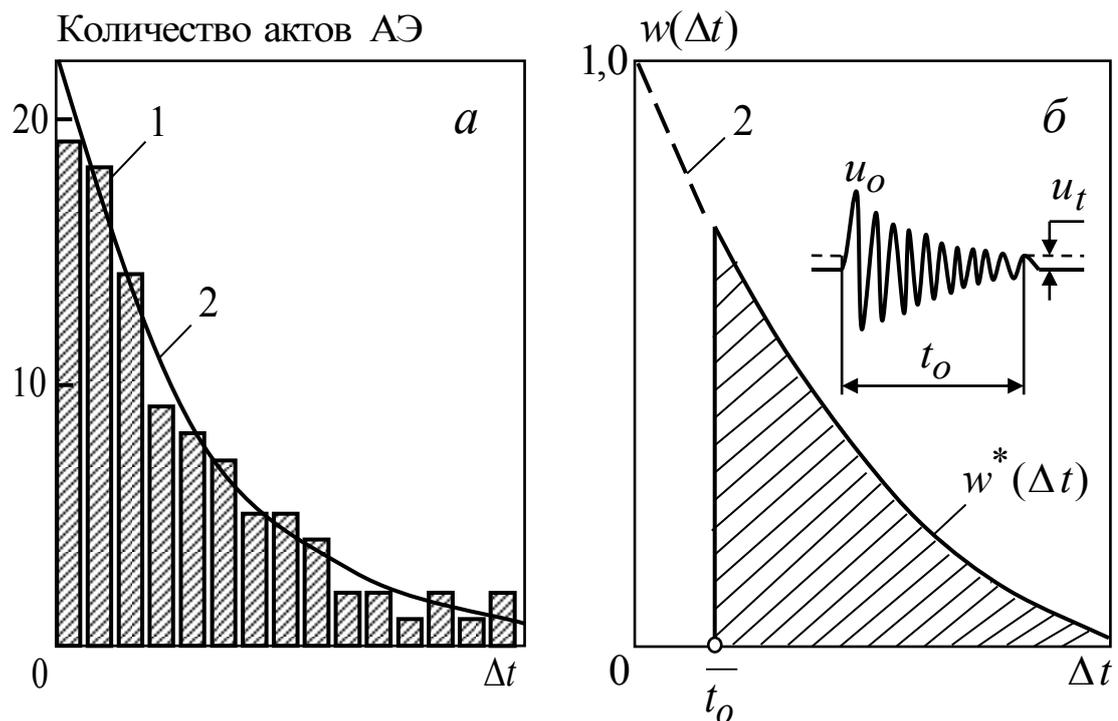


Рис. 3. Экспериментальные гистограммы распределения временных интервалов между актами АЭ (а) и идеализированный вид плотности распределения интервалов между событиями пуассоновского потока при наличии «мертвого времени» (б). 1 – экспериментальные значения; 2 – аппроксимирующий пуассоновский поток.

К сожалению, в процессе исследования пар трения обнаружилось настолько сильное искажение и перекрытие сигналов АЭ, что непосредственное применение такого подхода не обеспечило необходимую точность и достоверность процедуры восстановления. Вследствие этого метод пришлось модифицировать, и процедуру восстановления проводить не по интенсивности импульсов, а по интенсивности потока осцилляций регистрируемых сигналов

на поверхности исследуемой пары трения (рис. 3б). Получены следующие соотношения [2,3]:

$$\dot{N}_a = \dot{N} / (f - \dot{N}) \tau L(m, D), \tag{1}$$

$$L(m, D) = (m-1)^{-1} - (D^{m-1} - 1)^{-1} \ln D.$$

где \dot{N}_a – интенсивность (количество в единицу времени) излученного (восстановленного) внутри материала потока актов АЭ; \dot{N} – скорость счета (количество в единицу времени) осцилляций регистрируемых сигналов АЭ; f – частота заполнения сигналов АЭ (близка к резонансу датчика); τ – постоянная времени послезвучания сигнала АЭ в образце и приемном датчике (определяется экспериментально по прохождению калибровочного импульса); $L(m, D)$ – некоторый параметр; m – показатель степени плотности амплитудного распределения; $D = u_{0\max} / u_t$ – динамический диапазон сигналов АЭ; $u_{0\max}$ – максимальная амплитуда сигналов АЭ; u_t – уровень порога дискриминации.

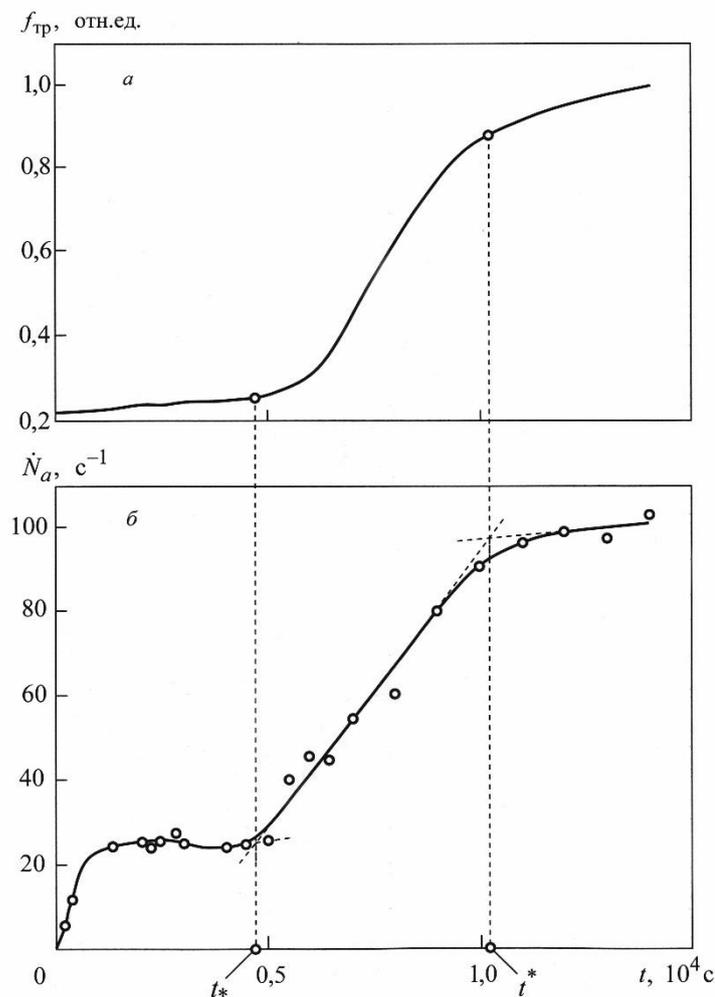


Рис. 4. График зависимости коэффициента трения (а) и восстановленной интенсивности потока сопутствующей АЭ (б) от времени испытания пары ролик-колотка с многослойным наномодифицированным покрытием.

Если сигналы АЭ имеют большой динамический диапазон и $m \approx 2$ (что в большинстве случаев выполняется для реальной АЭ), то $L(m, D) \approx 1$ и соотношение (1) принимает чрезвычайно простую форму:

$$\dot{N}_a = \dot{N}/(f - \dot{N})\tau. \quad (2)$$

На рис. 4. приведены совместные графики изменения коэффициента трения $f_{\text{тр}}(t)$ и восстановленной с использованием (2) интенсивности потока актов АЭ $\dot{N}_a(t)$ в процессе испытания многослойного антифрикционного покрытия. Видно, что эти зависимости подобны и имеют особые точки.

При этом на установившейся стадии трения интенсивность потока актов АЭ сохраняет приблизительно постоянное значение, а появление нижнего перелома коэффициента трения сопровождается соответствующим нижним переломом восстановленной интенсивности потока актов АЭ. Появление же верхнего перелома интенсивности потока актов АЭ практически совпадает с появлением аналогичного перелома и коэффициента трения.

Исследование структуры поверхности образцов показало, что нижний перелом потока актов АЭ соответствует точке перехода от стационарной стадии к начальной стадии разрушения покрытия, а верхний перелом соответствует точке перехода от катастрофического разрушения покрытия к началу стадии трения без защитного покрытия. В этой точке также наблюдается и большое количество дискретных частот в спектре АЭ.

Таким образом, обнаруженная связь точек перехода от стационарной стадии к стадиям разрушения и трения без покрытия с амплитудой, спектром и интенсивностью восстановленного потока актов АЭ позволяет предложить метод диагностики многослойного наноструктурированного антифрикционного покрытия по спектральному составу, амплитуде и интенсивности потока сопутствующего акустического излучения в ультразвуковом диапазоне частот. Сильная корреляция и подобный вид зависимости коэффициента трения с потоком актов АЭ в принципе должна позволить в будущем проводить экспресс оценку коэффициента трения по данным АЭ испытаний без прямого измерения этого коэффициента.

Библиографический список

1. Колесников В.И., Мясникова Н.А., Мигаль Ю.Ф. и др. Влияние адгезионного сцепления на границе раздела компонент на фрикционные характеристики полимерных композитов // Вестник РГУПС, 2011. № 4. С. 9-13.
2. Буйло С.И. Физико-механические и статистические аспекты повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного контроля и диагностики. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2008. 192 с.
3. Builo S.I. Chapter 15 (pp. 171–184). Physical, Mechanical and Statistical Aspects of Acoustic Emission Diagnostics. In: Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. New York: Nova Science Publishers, 2013, 444 p.
4. Builo S.I., Kuznetsov D.M., Gaponov V.L. Chapter 13 (pp. 193–208). Acoustic Emission Diagnostics of the Kinetics of Physicochemical Processes in Liquid and Solid Media. In: Advanced Materials. Studies and Applications. New York: Nova Science Publishers, 2015, 527 p.
5. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Ивлиев В.В. и др. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций. Новосибирск: Наука, 2011. 272 с.
6. Builo S. I., Ivanochkin P. G., and Myasnikova N. A. Diagnostics of Critical Points of the Friction Coefficient of a Multilayer Nanomodified Antifriction Coating by an Acoustic Emission Technique. - *Russ. J. Nondestructive Testing*, 2013, Vol. 49, No. 6, pp. 318-322.

7. **Ivanochkin P.G., Builo S.I., Kolesnikov I.V. and Myasnikova N.A.** Chapter 44 (pp. 323–330). The Development of Methods for Determination of Thermal and Tribological Characteristics of Friction Surfaces. In: Proceedings of the International Conference on Physics, Mechanics of New Materials and Their Application. New York: Nova Science Publishers, 2016, 582 p.

Bibliography:

1. **Kolesnikov V.I., Myasnikova N.A., Migal Y.F. et al.** Effect of adhesive bond at the interface component friction properties of polymer composites // Herald RGUPS'a, 2011. no 4. pp. 9-13.

2. **Builo S.I.** Physical-Mechanical and Statistical Aspects of Improving the Reliability of the Results of Acoustic Emission Monitoring and Diagnostics. - Rostov-on-Don: Southern Federal University Press, 2008. 192 p.

3. **Builo S.I.** Chapter 15 (pp. 171-184). Physical, Mechanical and Statistical Aspects of Acoustic Emission Diagnostics. In: Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. New York: Nova Science Publishers, 2013, 444 p.

4. **Builo S.I., Kuznetsov D.M., Gaponov V.L.** Chapter 13 (pp. 193-208). Acoustic Emission Diagnostics of the Kinetics of Physicochemical Processes in Liquid and Solid Media. In: Advanced Materials. Studies and Applications. New York: Nova Science Publishers, 2015, 527 p.

5. **Seriousnov A.N., Stepanova L.N., Ivliev V.V. et al.** Acoustic emission monitoring of railway constructions. Novosibirsk: Nauka, 2011. 272 p.

6. **Builo S. I., Ivanochkin P. G., and Myasnikova N. A.** Diagnostics of Critical Points of the Friction Coefficient of a Multilayer Nanomodified Antifriction Coating by an Acoustic Emission Technique. - Russ. J. Nondestructive Testing, 2013, Vol. 49, No. 6, pp. 318-322.

7. **Ivanochkin P.G., Builo S.I., Kolesnikov I.V. and Myasnikova N.A.** Chapter 44 (pp. 323-330). The Development of Methods for Determination of Thermal and Tribological Characteristics of Friction Surfaces. In: Proceedings of the International Conference on Physics, Mechanics of New Materials and Their Application. New York: Nova Science Publishers, 2016, 582 p.

УДК 621.891 + 06

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ МОДЕЛИ ПАРЫ ТРЕНИЯ «ВАЛ–КОЛОДКА»

М.А. Буракова, Г.В. Даровской, В.Н. Поляков

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»

При исследовании процессов трения в механических системах широко применяются принципы физического моделирования. В настоящее время более половины трибологических испытаний проводится на роликовых машинах трения. Анализ проведенных испытаний показал, что не всегда использование основных положений теории моделирования позволяет получить режим гидродинамической смазки (ГСМ) в сопряжении, моделирующем подшипник скольжения – «вал–колодка» [1...3]. Поэтому предложена модель пары трения, выполненная по схеме самоустанавливающаяся колодка–вал (рис. 1).

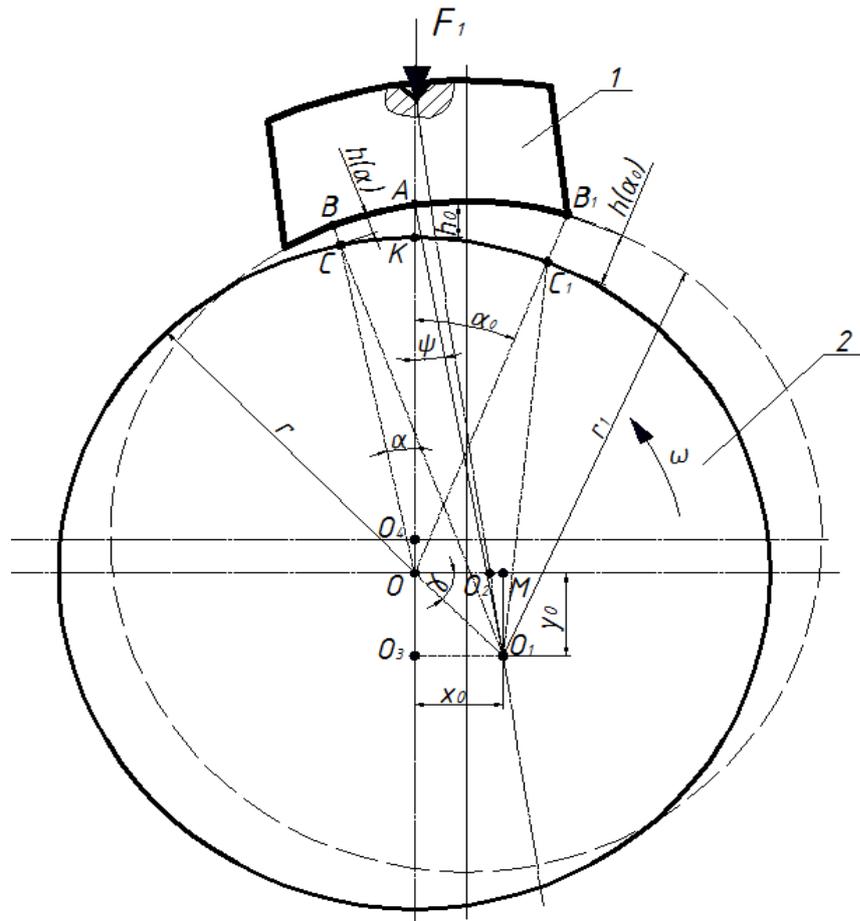


Рис. 1 – Расчетная схема пары трения самоустанавливающаяся колодка – вал:
1 – колодка; 2 – вал (ролик)

Рассмотрим работу пары трения «колодка–вал», где вал вращается с угловой скоростью ω и на колодку действует внешняя сила F_1 . Работа пары трения проводится при использовании жидкого смазочного материала (ЖСМ). В результате присутствия в зазоре между колодкой и валом смазочного материала и достижения начального значения толщины смазочного слоя h_0 появляется гидродинамическое давление, приводящее к смещению центров колодки и вала, которое можно определить с помощью эксцентриситета

$$\varepsilon = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}, \quad (1)$$

где $x_0 = r \sin \psi$ – смещение центра колодки по оси x ;

$y_0 = r + h_0 - r \cos \psi$ – смещение центра колодки по оси y ,

где r – радиус вала;

ψ – угол перекоса колодки.

Для описания формы зазора, образующегося в паре трения рассмотрим функцию $h(\alpha_i)$, описывающую форму зазора в зависимости от текущего угла α_i :

$$h(\alpha_i) = O_1B_i - O_1C_i = r - O_1C_i. \quad (2)$$

Выполнив несложные преобразования окончательно получим

$$h(\alpha) = r - \sqrt{r^2 + \varepsilon^2 - 2r\varepsilon \cos f(\alpha, \psi)}, \quad (3)$$

$$f(\alpha, \psi) = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{y_0}{x_0}\right) - \alpha$$

где

$$\frac{dp}{dx} = 6\mu_0 U \frac{h(x) - h_m}{h(x)^3}$$

Преобразуем уравнение Рейнольдса от переменной x к переменной α , используя выражение

$$x = x_1 + x_2 = r \sin \alpha + h(\alpha) \operatorname{tg} \alpha, \quad (4)$$

где x_1 и x_2 – проекции точек C_i и B_i – на ось x соответственно.

Функция $h(\alpha)$ и производная $\frac{dx}{d\alpha}$ не линейны и для численного решения уравнения Рейнольдса в новых переменных необходимо дифференцировать выражение (4) по α и преобразовать производную $\frac{dx}{d\alpha}$ в окрестности $\alpha = 0$ в ряд по степеням α :

$$dx = H_1(\alpha) d\alpha, \quad (5)$$

$$H_1(\alpha) = \sum_{j=0}^5 b_j \alpha^j + O(\alpha^6)$$

где

b_j – коэффициенты полинома.

Таким образом, уравнение Рейнольдса, с учетом $U = \omega \cdot r / 2\pi$, примет вид

$$\frac{dp(\alpha)}{d\alpha} = -3\mu_0 \frac{\omega \cdot r}{\pi} H_1(\alpha) \frac{H(\alpha) - h_m}{H(\alpha)^3}, \quad (6)$$

где h_m – минимальная толщина смазочного слоя в зазоре;

$$H(\alpha) = \sum_{j=0}^5 c_j \alpha^j + O(\alpha^6)$$

– преобразование функции $h(\alpha)$ в ряд по степеням α в окрестности точки $\alpha = 0$;

c_j – коэффициенты полинома.

Знак « \rightarrow » в выражении (6) учитывает направление движения вала по часовой стрелке.

Задавая начальные значения h_0 и ψ и решая уравнение (6) с граничным условием $p(\alpha_{\text{вх}}) = 0$, получим эпюры гидродинамического давления в зазоре. Решая уравнение (6), малым значением угла ψ , смещения точек входа и выхода ЖСМ в зазоре, пренебрегаем и

$$\alpha_{\text{вх}} = \arcsin\left(\frac{a}{r}\right)$$

считаем, что точка входа в зазор

$$\alpha_{\text{вых}} = \arcsin\left(-\frac{a}{r}\right),$$

где a – ширина зазора.

Получены эпюры гидродинамического давления в зазоре для различных углов ψ при заданных значениях $a = 0,01$ м, $r = 0,02$ м и $h_0 = 50$ мкм (рис. 2).

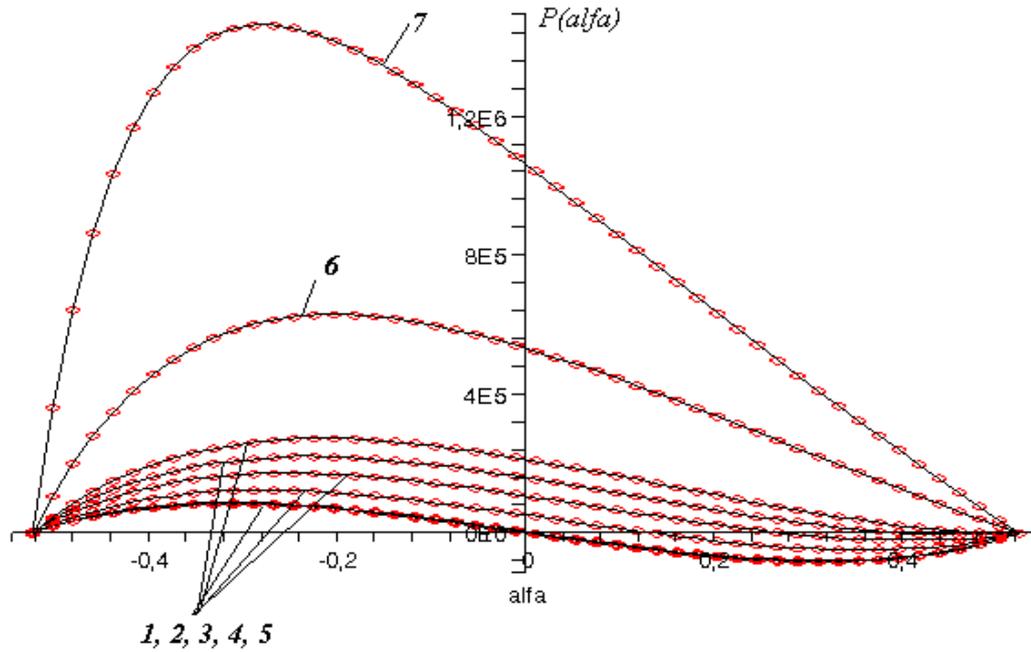


Рис. 2 – Давление ЖСМ в зазоре: кривые 1–5 (последовательно снизу вверх) при угле поворота колодки (в рад) $\psi_1 = 0$, $\psi_2 = 0,1 \cdot 10^{-3}$, $\psi_3 = 0,2 \cdot 10^{-3}$, $\psi_4 = 0,3 \cdot 10^{-3}$, $\psi_5 = 0,4 \cdot 10^{-3}$; 6 – $\psi_6 = 0,1 \cdot 10^{-2}$; 7 – $\psi_7 = 0,2 \cdot 10^{-2}$

Из рис. 2 видно, что при некоторых ψ для положительных α кривая $p(\alpha) < 0$. Появление отрицательной составляющей на входе в зазор, при малых значениях ψ и большом значении толщины зазора h_0 , связано с возникновением зоны разряжения на входе,

$$q = \int_{\alpha_{вх}}^{\alpha_{вых}} p(\alpha) \cos(\alpha) d\alpha$$

так как положение равнодействующей гидродинамического давления

не уравнивается положением максимума давления α_{max} , что приводит к исчезновению зазора. С увеличением угла ψ , равнодействующая α_q сместится влево к выходу из зазора (см. рис. 2, кривые 6 и 7) и пройдет максимальное значение, при котором будет обеспечена устойчивость гидродинамического режима смазки в зазоре (табл.).

На рис. 3 приведены кривые зависимости $\alpha_q(\psi)$, которые имеют выраженные максимумы.

Данные из табл. аппроксимированы с помощью функции

$$\alpha_q(\psi) = -33809,28825\psi^2 + 72,72719107\psi + 0,09158582713 \quad (7)$$

Таблица – Экспериментальные данные в зависимости от угла поворота колодки

ψ , рад	$h_m \cdot 10^{-6}$, м	$P_{max} \cdot 10^5$, Н/м ²	α_m , рад	α_q , рад	$q \cdot 10^5$, Н/м
$0,3 \cdot 10^{-3}$	47,33	2,20	-0,229	0,097	1,16
$0,4 \cdot 10^{-3}$	47,14	2,73	-0,215	0,117	1,56
$0,1 \cdot 10^{-2}$	44,88	6,36	-0,205	0,145	4,0
$0,12 \cdot 10^{-2}$	43,73	7,72	-0,214	0,140	4,85
$0,14 \cdot 10^{-2}$	42,36	9,21	-0,228	0,130	5,75

$0,144 \cdot 10^{-2}$	42,06	9,52	-0,231	0,128	5,93
$0,15 \cdot 10^{-2}$	41,60	10,0	-0,235	0,125	6,20
$0,16 \cdot 10^{-2}$	40,81	10,8	-0,243	0,120	6,65
$0,17 \cdot 10^{-2}$	39,93	11,7	-0,252	0,113	7,16
$0,2 \cdot 10^{-2}$	37,01	14,7	-0,279	0,091	8,74
$0,3 \cdot 10^{-2}$	24,06	32,1	-0,381	$-1,77 \cdot 10^{-7}$	15,9
$0,4 \cdot 10^{-2}$	6,420	142	-0,490	-0,154	34,9

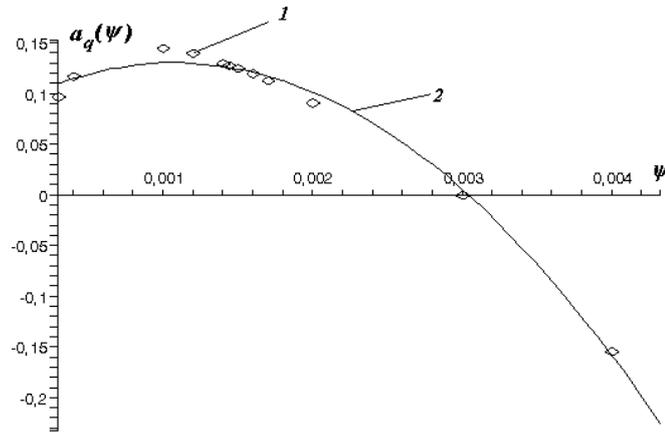


Рис. 3 – Зависимость положения равнодействующей всех сил давления $\alpha_q(\psi)$ в зазоре

от угла перекоса ψ : 1 – кривая по данным таблицы; 2 – аппроксимирующая кривая

При решении неравенства

$$\frac{dh(\alpha, \psi)}{d\alpha} \geq 0 \quad \text{при} \quad \alpha = \arcsin\left(\frac{a}{r}\right), \tag{8}$$

для заданных условий получим начальный угол перекоса $\psi_{нач} \geq 0,144 \cdot 10^{-2}$ рад, который обеспечит устойчивость данной модели (см. рис. 2).

Для определения предельного угла перекоса, при котором произойдет опрокидывание колодки, построим зависимость $h(\psi)$ в точке $\arcsin(-a/r)$ (рис. 4).

Очевидно, что колодка опрокинется в случае, когда будет выполняться условие

$$h(\arcsin(-a/r)) = 0, \tag{9}$$

где a – ширина зазора.

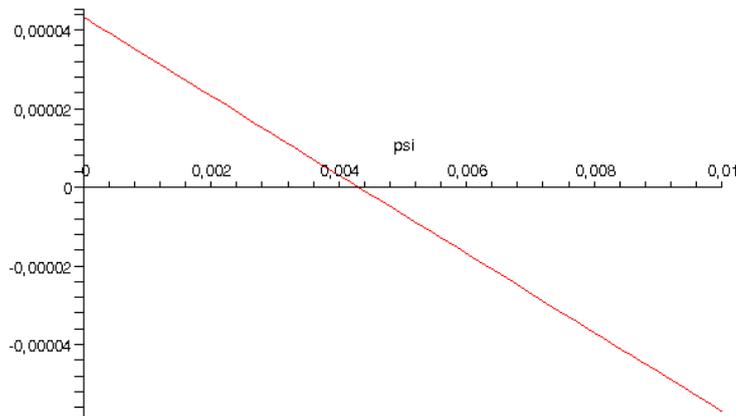


Рис. 4 – Зависимость $h(\psi)$ при $a = 0,01$, $r = 0,02$ и $h_0 = 50$ мкм

Проведенные расчеты показывают, что при угле $\psi_{\text{пред}} = 0,432 \cdot 10^{-2}$ давление в зазоре резко возрастает, а при $\psi_{\text{пред}} > 0,432 \cdot 10^{-2}$ происходит перераспределение потока ЖСМ в направлении вращения и избыток смазочного материала выдавливается через боковые поверхности.

Следовательно, определена зона устойчивого гидродинамического контакта (рис. 5), которая располагается в области

$$\psi_{\text{нач}} \leq \psi \leq \psi_{\text{пред}} \quad (10)$$

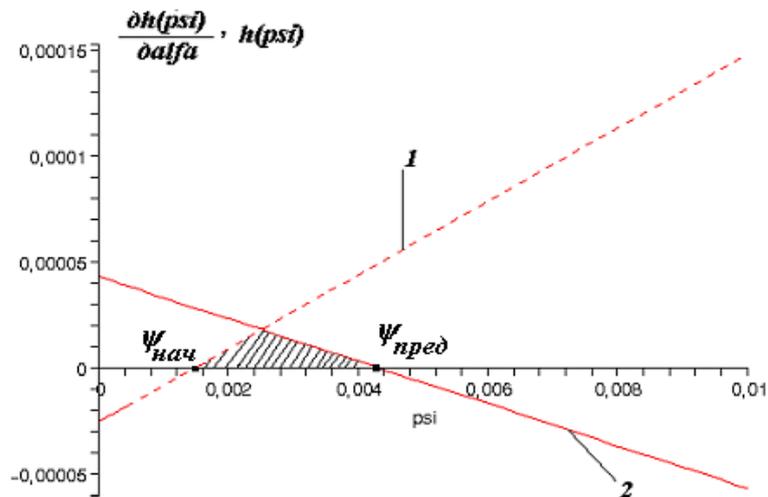


Рис. 5 – Область устойчивого гидродинамического контакта:

$$1 - \frac{dh(\psi)}{d\alpha} \text{ в точке } \alpha = \arcsin\left(\frac{a}{r}\right); 2 - h(\psi) \text{ в точке } \alpha = \arcsin\left(-\frac{a}{r}\right)$$

Таким образом, заштрихованная область на графике (см. рис. 5) является областью, где определен устойчивый гидродинамический режим смазывания в самоустанавливающейся паре трения «вал – колодка».

Библиографический список:

1 **Пичугин, В.Ф.** Самоустанавливающееся приспособление для крепления образца колодки на машине трения СМЦ-2 / В.Ф. Пичугин, С.М. Мкртчян, А.Ф. Сказыткин. // Заводская лаборатория, 1978. – Т. 44, – № 9. – С. 1142-1144.

2. **Поляков, В.Н.** Новая методика исследования трибологических свойств смазываемых пар трения по методу «колодка-ролик» / В.Н. Поляков, И.М. Елманов, Г.В. Даровской, М.А. Буракова, И.С. Морозкин. // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2015, № 8, – С. 40-43.

3. **Буракова, М.А.** К вопросу расчёта параметров ГД-смазки в плоском зазоре / М.А. Буракова, И.М. Елманов, М.Н. Езупова, В.Н. Поляков // Известия Самарского научного центра РАН. – 2015, – Т. 17, № 1, - С. 95-98.

Bibliography:

1. **Pichugin, V. F.** Self-aligning fixture for mounting the sample pads on the machine friction SMC-2 / V. F. Pichugin, S. M. Mkrtychyan, A. F. Skazytkin. // Factory laboratory, 1978. – Vol. 44, No. 9. – P. 1142-1144.

2. **Polyakov, V. N.** A new technique to study the tribological properties of lubricated friction couples by the method of "block-roller" / V. N. Polyakov, I. M. Elmanov, G. V. Darovskoy,

M. A. Burakova, I. S. Morozkin. // Friction and lubrication in machines and mechanisms. – 2015, № 8, – Pp. 40-43.

3. **Burakova, M. A.** Calculation of parameters for GD-lubrication in flat gap / M. A. Burakova, I. M. Elmanov, M. N. Isupova, V. N. Polyakov // Proceedings of the Samara scientific center of RAS. – 2015, Vol 17, No. 1, - Pp. 95-98.

УДК 621.894:620.179.16

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДИАГНОСТИКА СПЛОШНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ С ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫМИ КОМПОЗИТАМИ ФРИКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

¹Кожушко В. В., ¹Сергиенко В. П., ²Сычев А. П.

¹*Институт механики металлополимерных систем им. В.А.Белого НАН Беларуси*

²*Ростовский государственный университет путей сообщения*

Современные фрикционные композиты — это сложные гетерогенные системы, состоящие из 10 – 25 компонентов, в которой одной из непрерывных фаз (матрицей) является органический полимер или смесь полимеров, а в качестве наполнителей применяют металлические и минеральные высокопрочные и высокомодульные волокна, а также микроразмерные дисперсные частицы [1]. Изделия фрикционного назначения, состоящие, как правило, из композиционного материала и металлического основания, подвергаются воздействию самых неблагоприятных факторов — высоким и знакопеременным температурам (213-1073 К) и динамическим нагрузкам. Высокая скорость скольжения приводит к интенсивному износу, часто в присутствии различных агрессивных сред (солевых растворов, нефтепродуктов, кислот и т. д.) оказывающих «расклинивающее» воздействие в местах локализации микроповреждений клеевых и адгезионных соединений. Высоконаполненные композиты — сильно неоднородные материалы с существенными локальными изменениями плотности и акустических импедансов. Современные технические средства, в частности, акустические преобразователи, имеют ограниченные возможности по локализации микрон неоднородностей в гетерогенных средах, сильно рассеивающих ультразвук, что не позволяет контролировать дефекты сплошности механического соединения малых размеров, из которых развиваются трещины, приводящие к механическому разрушению изделия.

В работе рассматривается применение полимерных тонкоплёночных ультразвуковых преобразователей для решения задач неразрушающего контроля и диагностики металлополимерных композитов фрикционного назначения посредством оптимизации рабочего спектрального диапазона и сильного демпфирования на основе проведённых расчётов.

Ультразвуковые преобразователи, работающие на основе прямого и обратного пьезоэлектрического эффекта в режимах приёма и излучения, соответственно, используются наиболее часто для контроля сплошности соединения. В качестве чувствительных элементов коммерческих преобразователей преимущественно применяются керамические пластинки цирконата-титаната свинца (ЦТС), поляризованные в постоянном электрическом поле, с нанесёнными на поверхности электродами. В режиме излучения на пьезоэлемент подаются короткие импульсы напряжения с полным размахом амплитуды несколько сот вольт, возникает упругая деформация и излучается ультразвуковой импульс, длительность которого составляет порядка сотни наносекунд. Акустический контакт между преобразователем и объектом исследования обеспечивается жидкостью, что ограничивает возможности применения метода в случае сложной криволинейной поверхности или высокой температуры. В последнее время на североамериканском рынке оборудования представлено

несколько коммерческих проектов, в которых ультразвук возбуждается бесконтактным методом за счёт оптико-акустического преобразования наносекундных лазерных импульсов на поверхности исследуемого объекта, сильно поглощающей оптическое излучение [2]. Регистрация рассеянного ультразвукового импульса также выполняется бесконтактными оптическими средствами. Данные подходы вызывают неподдельный интерес исследователей и представителей сообщества неразрушающего контроля, поскольку являются перспективными для решения широкого спектра задач автоматизации контроля при производстве металлов и композитов.

Разделение режима возбуждения и регистрации ультразвуковых импульсов значительно упрощает техническое решение многочисленных задач. Далее рассмотрим более детально регистрацию импульсов давления наносекундной длительности с ярко выраженной фазой сжатия. Такие импульсы возбуждаются в результате оптико-акустического преобразования лазерного излучения на поверхности металлов, нагруженной прозрачной жидкостью, например, водой или маслом [3]. При длительности лазерного импульса порядка 10 нс, его спектр охватывает диапазон от 1 до 90 МГц. Естественно, в большинстве практических случаев затухание и рассеяние ультразвуковых волн на высоких частотах ограничено диапазоном ниже 15 МГц, однако для определения упругих модулей материалов более короткие импульсы дают ряд преимуществ в точности измерений [4].

Распространяясь в исследуемом объекте, зондирующие ультразвуковые импульсы частично рассеиваются на механических неоднородностях и возвращаются обратно к пьезоэлементу, вызывая его механическую деформацию, в результате чего на электродах возникает разность потенциалов и электрический заряд. Изменение напряжения во времени связано с формой импульсов давления, что и используется для дефектоскопии, чем больше размер неоднородности и значительнее отличаются её свойства от свойств матрицы, тем больше полный размах амплитуды напряжения. Упрощённо преобразователь может быть представлен электрической цепью, состоящей из конденсатора, ёмкость которого изменяется в результате механического смещения. В более общем случае последовательно с конденсатором включены, как минимум, сопротивление и индуктивность [5]. Спектральная чувствительность преобразователя зависит от толщины используемого элемента и свойств, граничащих с ним материалов. На практике требуется выполнение условий согласования элементов акустического тракта, с целью уменьшения амплитуды сигналов, возникающих в результате частичного отражения при прохождении границ раздела отдельных элементов.

В качестве чувствительного материала будет обсуждаться поляризованная плёнка поливинилиденфторида (ПВДФ) толщиной 25 мкм. Пьезоэлектрические константы данного полимера отличаются от ЦТС керамики, и имеют более низкое значение для зарядовой константы $d_{33} \approx 20$ пКл/Н и более высокую постоянную для индуцированного напряжения $g_{33} \approx 0.2$ Вм/Н против $d_{33} \approx 1000$ пКл/Н $g_{33} \approx 0.02$ Вм/Н у керамики, соответственно. Коммерчески доступные полимерные плёнки имеют толщину от 9 мкм и в силу близких значений импедансов прекрасно демпфируются поликарбонатом или метилметакрилатом. По сравнению с керамикой, имеющей на порядок большую постоянную заряда, для ПВДФ преобразователей необходимо использовать предварительные усилители электрических сигналов, что, в свою очередь, делает более гибким переключение в необходимый диапазон.

Проанализируем особенности работы преобразователя в «коротко замкнутом» режиме регистрации, представив упрощённую эквивалентную электрическую схему конденсатором и включённым параллельно сопротивлением. Для корректной регистрации высоких частот $f_h > 1/T$, где постоянная времени преобразователя T определяется произведением ёмкости C и номинала сопротивления R , включённого параллельно, через выражение $T=2\pi RC$. При диаметре чувствительного элемента 2 мм и толщине ПВДФ плёнки 25 мкм, ёмкость элемента ≈ 12 пФ, и если сопротивление резистора менее 100 Ом, то оно меньше реактивного сопротивления ёмкости в диапазоне частот до 100 МГц.

Заряд на электродах ПВДФ плёнки зависит от среднего значения механического напряжения по её толщине, что можно представить следующим образом [6]:

$$q(t) = A \frac{d_{33}}{h} \int_0^h P(x, t) dx, \quad (1)$$

где d_{33} пьезоэлектрическая постоянная, A площадь чувствительного элемента, h толщина плёнки, $P(x, t)$ поле давления, решение для которого включает волны, распространяющиеся навстречу друг другу, и зависит от толщин и акустических импедансов элементов линии задержки и демпфера. Изменение заряда связано с протеканием тока через сопротивление, и возникающая разность потенциалов может быть выражена как:

$$U(t) = R \frac{dq}{dt} = R \frac{d_{33} A}{h} \int_0^h \frac{d}{dt} P(x, t) dx. \quad (2)$$

В данном режиме работы толщина пьезоэлектрической плёнки определяет верхнюю границу рабочего диапазона, связанную с положением локального минимума чувствительности. Минимум соответствует частоте ультразвуковой волны, длина которой равна толщине плёнки. Из полученного выражение видно, что разность потенциалов пропорциональна производной изменения поля давления в плёнке по времени.

Отметим, что на практике в гетерогенных средах измерение ультразвуковых импульсов в диапазоне частот выше 15 МГц является сложной задачей ввиду сильного затухания, связанного как собственно с поглощением, так и рассеянием упругих импульсов на границах раздела сред, значительно отличающихся по плотности и акустическим импедансам. Компромиссное решение подразумевает снижение положения высокочастотной границы рабочего диапазона, и, соответственно, увеличение чувствительности в области низких частот посредством повышения номинала входного сопротивления. При этом предельным случаем будет бесконечно большое входное сопротивление. Преобразователь работает в режиме «холостого хода» и разность потенциалов, возникающая на электродах пьезоэлемента, повторяет временную форму импульса давления. В данном случае форма разности потенциалов на электродах преобразователя повторяет форму импульса давления и не зависит от площади чувствительного элемента.

$$U(t) = \frac{q(t)}{C_s} = g_{33} \int_0^h P(x, t) dx \quad (3)$$

На основе сделанных предположений в пакете Matlab рассчитана спектральная чувствительность преобразователей, с различными входными сопротивлениями при неизменной ёмкости, см. Рис.1.

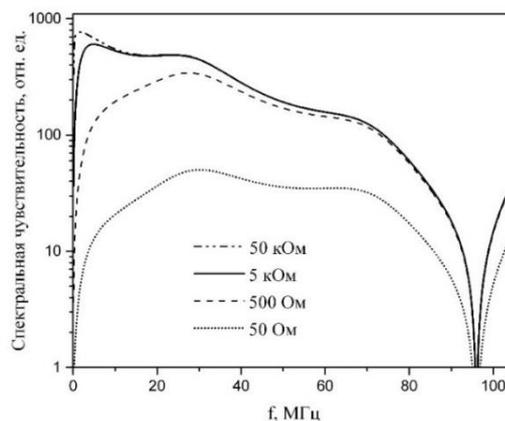


Рис. 1 – Рассчитанные спектры чувствительности ПВДФ преобразователей ёмкостью 12 пФ с различными номиналами параллельно включённого входного сопротивления

Решение данной задачи проводилось с учётом импеданса алюминиевой фольги толщиной 25 мкм, находящейся перед ПВДФ плёнкой, и достаточно протяжённого демпфирующего элемента из оргстекла за плёнкой. Толщиной клеевых слоёв пренебрегали. Изменение входного сопротивления с 50 Ом до 500 Ом увеличивает чувствительность в диапазоне от 5 до 80 МГц приблизительно в 10 раз. Дальнейшее повышение входного сопротивления увеличивает чувствительность только в полосе частот до 40 МГц приблизительно в 7 раз, а сопротивление 50 кОм повышает чувствительность по сравнению с 5 кОм в полосе до 10 МГц всего в два раза. Дальнейшие расчёты связаны с измеряемой формой электрического сигнала при регистрации импульса с выраженной фазой сжатия длительностью 25 нс по уровню $1/e$. С помощью прямого преобразования Фурье вычислялся спектр импульса, а форма регистрируемого сигнала получается из обратного преобразования Фурье от произведения спектра чувствительности и спектра давления. Результаты представлены на Рис. 2. Форма импульса, полученная в случае сопротивления 50 Ом качественно повторяет форму, полученную для 500 Ом, и не приводится на данном рисунке из-за на порядок меньшего полного размаха амплитуды. Для сопротивления 500 Ом, сигнал представляют собой двухполярный импульс с длительностью между пиками приблизительно 25 нс. Увеличение входного сопротивления повышает амплитуду и растягивает импульсы, что связано с медленным разрядом плёночного конденсатора. Полный размах амплитуды сигналов, рассчитанных для входных сопротивлений 5 кОм и 50 кОм, отличается незначительно, в последнем случае амплитуда отрицательного пика существенно меньше по сравнению с амплитудой положительного пика. При большем сопротивлении медленнее изменяется сигнал, что объясняется увеличением постоянной $T = 2\pi RC$.

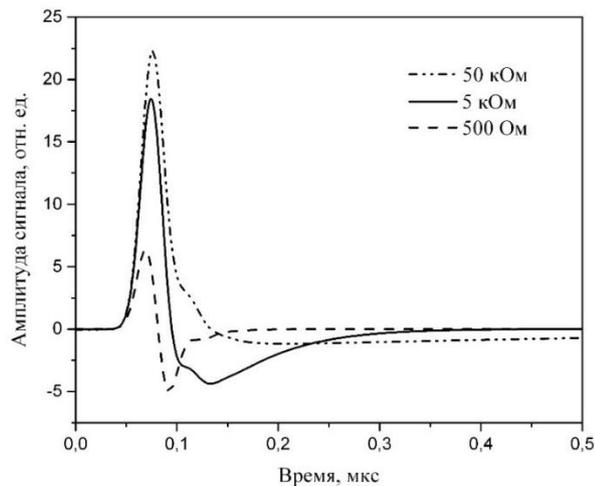


Рис. 2 – Рассчитанные формы сигналов ПВДФ преобразователей ёмкостью 12 пФ с различными входными сопротивлениями, включёнными параллельно.

Операционные усилители LMH6624/6626, с полосой единичного усиления порядка 1,5 ГГц, обеспечивает усиление более 26 дБ в диапазоне до 100 МГц при работе преобразователя в «коротко замкнутом» режиме. Небольшие габариты полупроводникового чипа, размещённого в корпусе SOIC8, и пассивных компонентов для поверхностного монтажа значительно уменьшают требуемую площадь однослойной печатной платы, максимальный линейный размер, который менее 25 мм, смотрите Рис. 3. Плата размещается в алюминиевом корпусе преобразователя, при этом используются провода минимальной длины для соединения с электродами на поверхности плёнки. Отметим, что увеличение номинала сопротивления в 10 раз увеличивает тепловой шум в 3 раза, что в свою очередь поднимает порог минимально регистрируемого давления. Для детального расчёта шума преобразователя необходимо учитывать шум, вносимый схемой предварительного усилителя, что выходит за рамки данной работы.

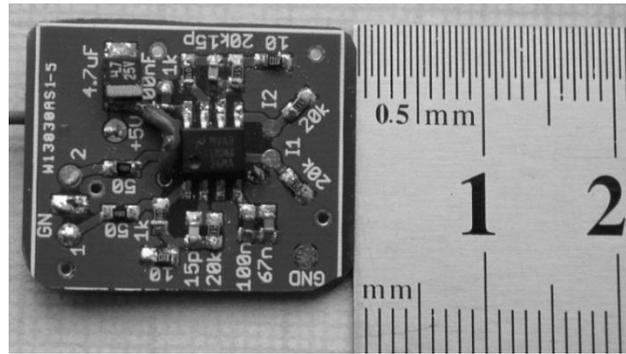


Рис. 3 – Печатная плата широкополосного усилителя на чипе LMN6626.

В заключение отметим одно неоспоримое преимущество использования полимерной пьезоэлектрической плёнки, связанное с возможностью её размещения на цилиндрической, конической или более сложной криволинейной поверхности с изгибом в одной плоскости. Таким образом, без установки акустической линзы решается задача фокусировки, поскольку локализуется область пространственной чувствительности. Приведенные исследования позволяют сделать вывод о возможности применения преобразователей на основе ПВДФ плёнки для решения задач неразрушающего контроля и диагностики сплошности соединения композитов фрикционного назначения с металлической основой. При разработке предварительных усилителей в «коротко замкнутом» режиме следует выбирать максимально допустимое значение входного сопротивления, а в режиме «холостого хода» ограничиться сопротивлением номиналом 3-7 кОм, принимая во внимание проблемы повышения уровня теплового шума на входе операционного усилителя, что ведёт к ухудшению значения его пороговой чувствительности.

Библиографический список/Bibliography:

1. **Friedrich K.** et al. Chapter 1 – Tribological applications of polymers and their composites – past, present and future prospects // *Tribology of Polymeric Nanocomposites*. 2013. P. 1–22.
2. **Pelivanov I.** et al. High resolution imaging of impacted CFRP composites with a fiber-optic laser-ultrasound scanner // *Photoacoustics*. 2016. Vol. 4, № 2. P. 55–64.
3. **Gusev V.É., Karabutov A.A.** *Laser Optoacoustics*. New York: American Institute of Physics, 1993. 271 p.
4. **Kozhushko V. V.** et al. Attenuation of ultrasound in severely plastically deformed nickel // *NDT E Int.* 2011. Vol. 44, № 3. P. 261–266.
5. **Emeterio J.L.S., Ramos A.** Models for Piezoelectric Transducers Used in Broadband Ultrasonic Applications / ed. Vives A.A. Springer Berlin Heidelberg, 2009. P. 97–116.
6. **Schoeffmann H., Schmidt-Kloiber H., Reichel E.** Time-resolved investigations of laser-induced shock waves in water by use of polyvinylidene fluoride hydrophones // *J. Appl. Phys.* 1988. Vol. 63, № 1. P. 46–51.

УДК 621.891+06

МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ КОМПОНЕНТ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРИБОСИСТЕМВ.А. Кохановский¹, С.И. Иванов², А.А. Петренко², И.В. Больших¹¹ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»,
г. Ростов-на-Дону, Россия²ФГБОУ ВО «Таганрогского филиала Донского государственного технического университета (ДГТУ)», г. Таганрог, Россия

Одной из основных особенностей металлополимерных узлов трения, определяющей как их преимущества, так и недостатки, является значительная разница в физико-механических свойствах контактирующих деталей. Жесткость, прочность и термостойкость полимерных антифрикционных композитов или их покрытий на подшипниковой втулке на порядки ниже, чем у контактирующей с ней металлической шейки вала.

На физико-механические свойства контактирующих деталей большое влияние оказывает качество поверхностисопряженных металлических деталей, контактирующих с самосмазывающимися композиционными покрытиями. Под качеством поверхности понимают расширенную геометрическую характеристику поверхности и физическое состояние поверхностного слоя материала. Расширенная геометрическая характеристика включает показатели микрогеометрии (шероховатости) поверхности и волнистости. Волнистость представляет собой периодически повторяющиеся неровности поверхности, величина которых (шаг, высота) занимает промежуточное положение между шероховатостью (микрогеометрией) и погрешностью формы (макрогеометрией). Поверхностный слой представляет собой прилегающий к поверхности слой материала, а именно структура, твердость и другие показатели, которые отличаются от состояния нижележащего основного материала.

Шероховатость (чистота обработки) является важнейшим показателем точности обработки поверхности, которая также оказывает важное влияние на эксплуатационные свойства (износ). В отдельных случаях твердые шероховатости, могут разрывать отдельные фрагменты фторопластовых нитей или разрушать контактную поверхность в результате микрорезания.

Преимущество металлополимерных пар определяется приработочным изнашиванием, увеличивающим площадь фактического контакта и снижающим уровень реальных контактных напряжений; недостаток – чувствительность к микронеровностям металлических контртел и значительный приработочный износ. Таким образом, шероховатость контактной металлической поверхности, характеризуемая величиной среднего арифметического отклонения профиля R_a , является весьма важным параметром [1].

Требования к шероховатости металлических контртел для зарубежных аналогов полимерных покрытий со стекловолокном колеблются от $R_a = 0,025$ [2] до 0,4 [3] и нуждаются в корректировке.

Проведенные экспериментальные исследования выполнялись на стенде с вращательным движением, сформированным на базе токарного станка. Образцами являлись полувтулки $\varnothing 14$ с полимерным композиционным покрытием. Эксперименты проводились при скорости $V = 0,83$ м/с и контактных напряжениях $\sigma = 50$ МПа в диапазоне микронеровностей контртела от $R_a = 0,025$ до 1,3 мкм (6 – 12 класс шероховатости). Обработка их результатов позволила получить модель, отражающую изменение времени приработки следующего вида:

$$t_{пр} = 26,868 \exp(-3,141 R_a) \quad (1)$$

Модель адекватна, а ее средняя погрешность не превышает 8,3%.

При исследовании зависимости приработочного износа от параметров шероховатости контртела необходимо учитывать тип изнашивания. При величине $R_a = 0,025$ мкм наблюдается адгезионное изнашивание с переносом продуктов износа фторопласта на контртело и последующем их выносе из зоны трения.

С ростом шероховатости увеличивается вклад в процесс изнашивания микрорезания композита отдельными микронеровностями контактной металлической поверхности. При величине $R_a = 1,3$ мкм (6-й класс шероховатости) практически весь фторопласт подвергается износу микрорезанием с отделением относительно крупных фрагментов (рис. 1).

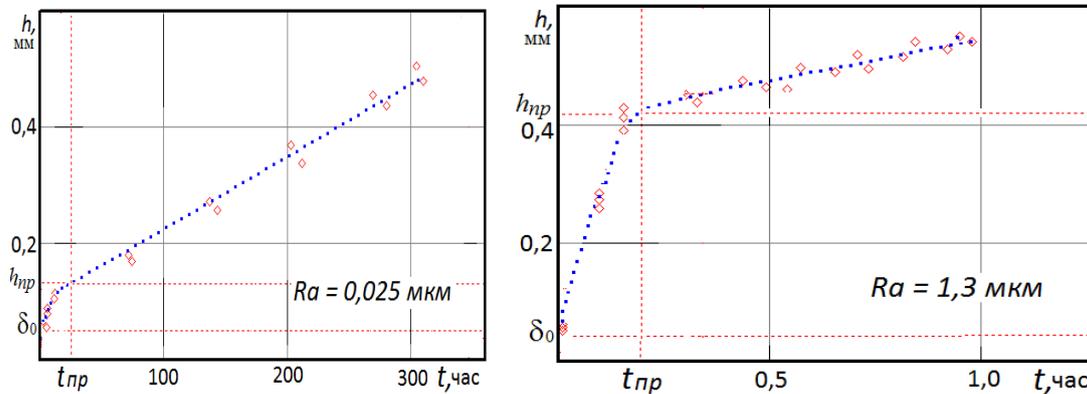


Рис.1- Влияние шероховатости поверхности контртел на тип изнашивания и ресурс металлополимерных трибосистем

Реализация микрорезания доказывается очень коротким приработочным периодом на кривой Лоренца (всего 25,8 минут) и сокращением ресурса трибосистемы до одного часа.

Зависимость приработочного износа исследуемых полимерных покрытий от шероховатости металлической поверхности контактирующих с ними тел описывается моделью:

$$h_{np} = 0,308 (R_a)^{0,463} + 0,073 . \tag{2}$$

Модель адекватна и обеспечивает среднюю погрешность не более 7,1%. Графики моделей (1) и (2) представлены на рис.2.

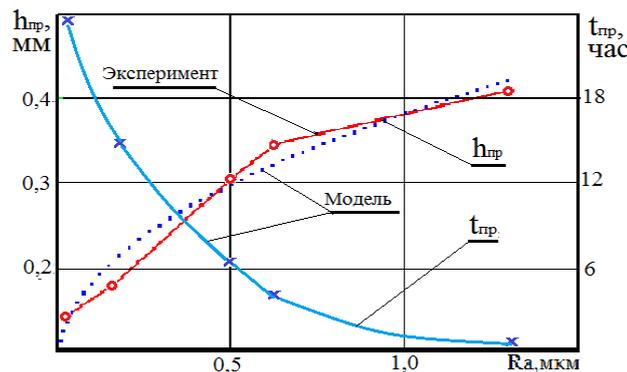


Рис.2 - Зависимость приработочных параметров фторопластсодержащих покрытий от величины шероховатости ответной детали

Изнашивание за приработочный период при шероховатости контртела в 1,3 мкм составляет до 75% толщины покрытия, что делает эксплуатацию рассматриваемых трибосистем в этих условиях нецелесообразной.

Анализ полученных моделей и графиков позволяет сделать ряд выводов:

- близкое к линейному увеличению приработочного износа с ростом шероховатости контртел свидетельствует о преобладающем в этих условиях изнашивании микрорезании.

Процесс интенсифицируется как относительно низкой прочностью фторопласта, так и отсутствием у него адгезионных связей с матричным материалом;

- уменьшение времени приработки с ростом шероховатости контртел определяется увеличением сечения снимаемой стружки, срезаемой более высокими микрощероховатостями (аналогия с работой напильника).

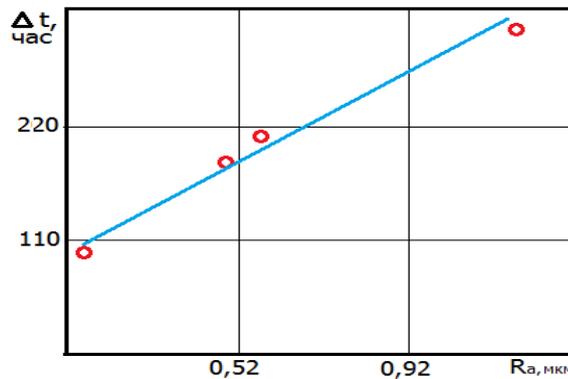


Рис.3 - Величина недоиспользованного ресурса покрытия при недостаточной чистоте обработки поверхности металлического контртела

Следует отметить, что потери ресурса, при недостаточном технологическом обеспечении требуемой шероховатости поверхности контртел в сравнении с его минимальной величиной ($R_a = 0,025 \text{ мкм}$), могут быть определены по следующей расчетной модели:

$$\Delta t = 268,47 (R_a)^{0,533}, \quad (3)$$

где $\Delta t = t_{0,025} - t_i$

График этой зависимости приведен на рис.3. Модель адекватна и обеспечивает погрешность не более 3,0%.

Различие в величинах основных параметров металлополимерных трибосистем при изменении шероховатости контртел в исследованном диапазоне приведена в табл. 1. Это различие наблюдается в целом ряде триботехнических параметров.

Таблица 1 - Параметры исследованных трибосистем

Средне-арифмет. отклон. профиля	Равновесный модуль	Вязкоупругая деформация	Температура	Время приработки	Прирабочный износ	Ресурс	Скорость изнашивания
$R_a, \text{мкм}$	$E, \text{МПа}$	$\varepsilon(t), \text{мм}$	$T, ^\circ\text{C}$	$t_{пр}, \text{час}$	$h_{пр}, \text{мм}$	$t, \text{час}$	$V_{и}, \text{М/с}$
0,025	513,6	0,053	94	24,0	0,141	304	1,81
1,3	473,5	0,060	133	0,43	0,410	1,00	550

Изменение равновесного модуля и вязкоупругой деформации (ползучести) полимерного покрытия вызывается ростом температуры, сопровождающим увеличение шероховатости поверхности контртел. Температура влияет также на прочностные характеристики композита.

Дополнительным значимым фактором для прирабочных параметров является физическая природа и марка материала контртел. Это может быть объяснено строением поверхности и теплофизическими свойствами материалов (рис.4).

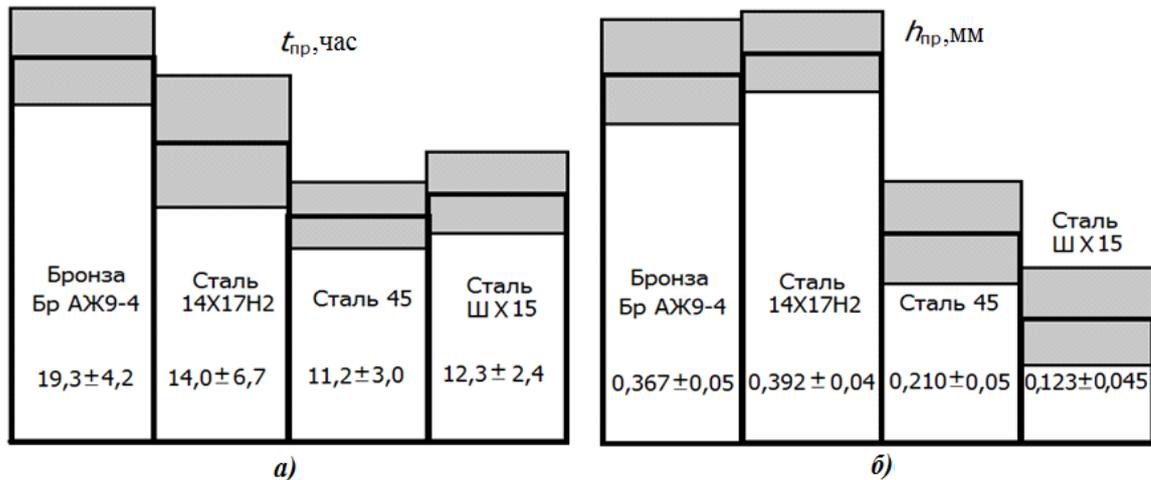


Рис.4 -Влияние материала контртела на параметры приработки,

В качестве образцов контртел были выбраны типичные представители материалов, используемых в триботехнике. Заштрихованная часть диаграмм представляет величины доверительных интервалов. Полученные результаты показывают, что величины прирабочных характеристик имеют один порядок, а их значения близки данным, имеющимся в [4].

Вывод. Результаты экспериментальных исследований работы полимерных композиционных фторопластсодержащих покрытий определяют рациональные конструктивные параметры металлополимерных трибосистем и их триботехнические характеристики в условиях как нестационарного прирабочного процесса, так и стационарного. Период приработки был выбран для исследований как наиболее чувствительный к исходным начальным свойствам рассматриваемых пар трения. Это позволило разработать рекомендации для рационального выбора материалов, конструирования и эксплуатации металлополимерных трибосистем данного класса.

Библиографический список:

1. **Кохановский, В.А.** Армирующая компонента для антифрикционных композиционных покрытий. / В.А.Кохановский// Управление, Конкуренто-способность. Автоматизация.- Ростов н/Д: ГОУДПО, 2002.-вып.1.- С.73-79.
2. **Мур, Д.** Основы и применение трибоники./ Д. Мур.- М.: Мир, 1978.- 487с.
3. **Lancaster, J.K.** Composite for Aerospace Dry Bearing Application / J.K. Lancaster// Friction and wear of polymer composites. Composite Materials Series; ed. by Klaus Friedrich, 1986.- P.363 – 396.
4. **Craig, W.D.** Initial Wear of PTFE lined bearings. // Lubrication Engineering.-1966.- v.22.-№5.-P.160.

Bibliography:

1. **Kochanowski, V. A.** Reinforcing component antifriction composite coatings. / V. A. Kokhanovsky// Management, Competitiveness. Automation.- Rostov n/D: GOUDPO, 2002.-vol.1.- P. 73-79.
2. **Moore, D.** principles and application of trebonice./ D. Moore.- M.: Mir, 1978.- 487с.
3. **Lancaster, J.K.** Composite for Aerospace Dry Bearing Application / J.K. Lancaster// Friction and wear of polymer composites. Composite Materials Series; ed. by Klaus Friedrich, 1986.- P.363 – 396.
4. **Craig, W.D.** Initial Wear of PTFE lined bearings. // Lubrication Engineering.-1966.- v.22.-№5.-P.160.

УДК 629.4 +06

ИССЛЕДОВАНИЕ ВПИСЫВАНИЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В КРИВОЛИНЕЙНЫЙ УЧАСТОК ПУТИ

А.Л. Озябкин, М.И. Никитина, Л.И. Коваленка
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»,
г. Ростов-на-Дону, Россия

Важнейшие приоритеты ОАО «РЖД» является освоение перспективного поездопотока при гарантированной безопасности движения и повышение эффективности работы на основе оптимизации взаимодействия служб пути и подвижного состава. Одним из аспектов проблемы, которой является взаимодействие колеса и рельса, составляющей физическую основу движения поездов по железным дорогам. Именно оно во многом определяет безопасность, а также такие важнейшие технико-экономические показатели, как масса поездов, скорость их движения и уровень эксплуатационных расходов.

На первом этапе определение условий, позволяющих оптимизировать параметры пути рассмотрим, взаимодействие условной одноосной (I), двухосной (II) и трехосной (III) тележек с рельсами (рис. 1).

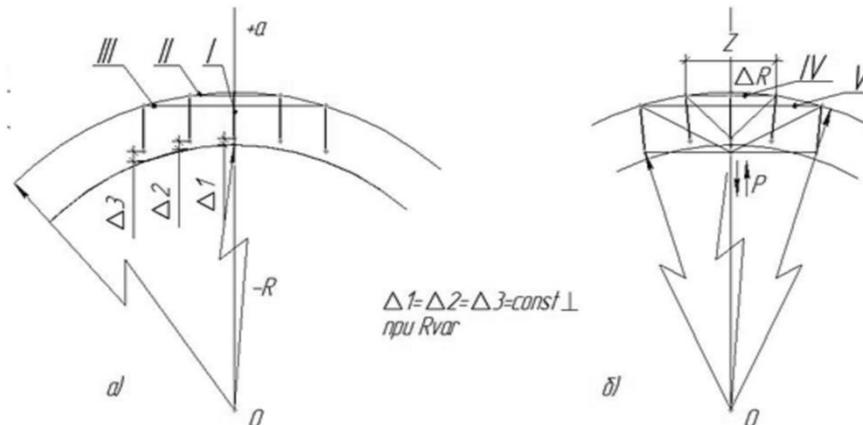


Рис. 1 – Схема взаимодействия гребней колес железнодорожного подвижного состава с рельсами, а, I - свободная колесная пара, II, III – двухосная тележки с различными колесными базами; б, IV, V – трехосные тележки с осевой разбалансировкой $\pm P$.

Как видно из схемы взаимодействия колес подвижного состава с рельсами (рис. 1 а) значение ширины колеи при двухосных тележках не влияет на условия вписывания в кривых. На рис. 1 а представлен случай движения с положительным непогашенным ускорением ($+a$) и при допущении, что контактирует в точке два тела: конусе (гребень колеса) и цилиндр (боковая поверхность головки рельса).

Тележки при магистральном тепловозе 2ТЭ116, имеющих максимальное значения колесной базы по сравнению с трехосными тележками подвижного состава, эксплуатируемого на сетях дорог ОАО «РЖД», свободно, без заклинивания вписываются в кривые с минимальным радиусом $R=150$. Учитывая, что, наиболее сложные условия вписывания в кривые существует у трехосной тележки тепловоза 2ТЭ116, при решении вопросов о значении ширины колеи в кривых малого радиуса для всего подвижного состава эксплуатируемого на данное положение позволяет унифицировать все кривые ширине колеи равной 1520 мм.

При решении вопроса об оптимальном значении ширина колеи определяющим является условие свободного (без заклинивания) вписывания подвижного состава в кривых. Такие проблемы как увеличение контактных нагрузок, а соответственно и интенсивности использования рельсов, при увеличении ширины колеи, а значит и угла набегания –

очевидный факт. Так же негативно влияет, на надежность, долговечность, интенсивность изнашивания рельсов, увеличение зазоров в контакте колеса с рельсом. Это связано с увеличением возможных амплитудных горизонтальных колебаниях в системе путь – подвижной состав, соответственно уровня динамических нагрузок. Таким образом, минимально – допустимый уровень зазора в контакте гребня колеса с рельсом, (т.е. обеспечение минимального размера колеи исключая заклинивание, обеспечивающий однохордовое взаимодействие колёс тележек подвижного состава) является необходимым условием оптимального взаимодействия колес подвижного состава с рельсами, в прямых и криволинейных участках пути.

На основании полученной от структурных подразделений Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД» информации о кривых радиусом от 300 до 350 м и менее 300 м с номинальной шириной колеи 1520 мм и 1530 мм: установленной скорости, радиусу кривого участка пути, уровню (возвышение наружного рельса); а так же технических характеристик используемого подвижного состава и параметрам пути, для которых рассчитаем непогашенное ускорение и параметры перераспределения нагрузки от колеса к рельсу при вписывании в кривые малого радиуса.

Таблица 1 – Параметры пути

Дорога	Направление	Привязка участка КМ, ПК+м	Установленная скорость пасс/грузовым	Радиус, м	Уровень (возвышение), мм	Дата измерения
В-СИБ	Слюдянка-Утулик	5316пк9+31-5317пк2+59	70/60	306	91	18.04.2015

Таблица 2 – Параметры подвижного состава

Параметр	Обозначение	Значение 2ТЭ116
осевая формула	h_c	30–30
масса кузова, т	$m_в$	182,600
масса тележки, подрессоренная, т	m_p	10,500
неподрессоренная масса, т	m_n	4,250
статическая нагрузка колёсной пары на рельсы, кН	$2P$	225,400
высота центра тяжести, м	h_c	2,000
половина расстояния между кругами катания, м	bs	0,800
радиус колеса, м	r_k	0,525

Непогашенное ускорение определяется в зависимости от кривизны пути и возвышения наружного рельса

$$a_n(s) = \frac{V^2}{3,6^2} \cdot \rho(s) - \frac{g \cdot h(s)}{2 \cdot bs}$$

где V – скорость движения подвижного состава, км/ч;

ρ – кривизна пути, m^{-1} ;

g – ускорение свободного падения, m/c^2 ;

h – возвышение наружного рельса, м;

bs - половина расстояния между кругами катания, м

Кривизна пути:

$$\rho = \frac{1}{R},$$

где R – радиус криволинейного участка пути, м.

$$\rho = \frac{1}{306} = 0,00327 \text{ м}^{-1},$$

$$a_n(s) = \frac{60^2}{3,6^2} \cdot 0,00327 - \frac{9,81 \cdot 0,091}{2 \cdot 0,8} = 0,35 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

В процессе движения происходит изменение нагрузок от колёс на рельсы, вызванные реализацией силы тяги и торможения, действием центробежных сил, динамическими процессами при колебаниях экипажа.

Статическая нагрузка колеса на рельс только от действия непогашенного поперечного ускорения:

$$\Delta P = P \cdot p_0 \cdot a_n$$

где P – статическая нагрузка колеса на рельс, кН

p_0 – относительное перераспределение нагрузки на колесо

a_n – непогашенное поперечное ускорение.

Статическая нагрузка колеса на рельс рассчитывается по формуле:

$$P = \frac{(m_b + n \cdot m_p + 2 \cdot n_0 \cdot m_n) \cdot g}{n_{01}}, \text{кН}.$$

где m_b – масса кузова, т; m_p – подрессоренная масса тележки, т; m_n – неподрессоренная масса, т; n – количество тележек, n_0 – число колесных пар, n_{01} – число колес.

$$P = \frac{(91,3 + 2 \cdot 10,5 + 2 \cdot 3 \cdot 4,25) \cdot 9,81}{4 \cdot 3} = 112,652 \text{ кН};$$

$$\Delta P = 112,652 \cdot 0,255 \cdot 0,35 = 10,043.$$

Относительное перераспределение нагрузки на колесо равно:

$$p_0 = \frac{h_c}{g \cdot b_s},$$

где h_c – высота центра тяжести локомотива от уровня головок рельсов, м.

$$p_0 = \frac{2}{9,81 \cdot 0,8} = 0,255.$$

Нагрузка на рельсы от наружного ($k=1$) и внутреннего ($k=2$) колёс определится в виде:

$$P_{ij1} = P + \Delta P, \text{кН}; \quad P_{ij2} = P - \Delta P, \text{кН};$$

$$P_{ij1} = 112,652 + 10,043 = 122,695 \text{ кН}; \quad P_{ij2} = 112,652 - 10,043 = 102,609 \text{ кН}.$$

Рассмотрим соударение двух тел, одно из которых – колесо, имеющее коническую поверхность с радиусом R_k по кругу катания (магистрального тепловоза 2ТЭ116, $R_k=525$ мм) и обладающее массой, равной массе половины колёсной пары. Контактная поверхность второго тела – рельса представляет собой цилиндр с радиусом, равным радиусу r головки (радиус головки рельса Р65 равен 300 мм). При этом предполагается, что рельс закреплен жестко, т. е. его масса принята бесконечно большой [1].

Максимальное давление в контакте:

$$P_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{\pi ab},$$

где a и b – полуоси эллипса контакта;

P – нормальная сила.

$$a = m^3 \sqrt{\frac{3\pi P(k_1 + k_2)}{4(A+B)}}, \quad b = n^3 \sqrt{\frac{3\pi P(k_1 + k_2)}{4(A+B)}}.$$

где $k_1 + k_2$ – приведенный модуль Юнга;

$$k_1 + k_2 = \frac{2(1 - \mu^2)}{\pi E},$$

μ - коэффициент Пуассона;

E – модуль упругости первого рода;

$$k_1 + k_2 = \frac{2 \cdot (1 - 0,3^2)}{\pi \cdot 2,1 \cdot 10^{11}} = 3,304 \cdot 10^{-12} \frac{M^2}{H}.$$

$$A + B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1'} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2'} \right); \quad A + B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_k} + \frac{1}{r} \right).$$

$R_1 \cong R_k, R_1' = \infty$ – главные радиусы кривизны колеса;

$R_2 = \infty, R_2' = r$ – главные радиусы кривизны рельса;

Величина m и n определяется в зависимости от θ [2].

$$\cos \theta = \frac{B - A}{A + B}; \quad B - A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'} + \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'} \right); \quad |B - A| = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_k} - \frac{1}{r} \right).$$

Таблица 3 – Значения коэффициентов m и n

$\cos \theta$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
m	1	1,07	1,15	1,25	1,36	1,46	1,66	1,89
n	1	0,931	0,871	0,821	0,760	0,721	0,666	0,610
$\cos \theta$	0,8	0,85	0,9	0,95	0,97	0,99	0,997	1,0
m	2,29	2,60	3,09	4,08	5,09	7,83	12,21	-
n	0,539	0,506	0,461	0,396	0,356	0,290	0,224	-

При $R_k = 0,525$ м, $r = 0,3$ м

$$A + B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0,525} + \frac{1}{0,3} \right) = 2,619 \frac{1}{m}; \quad B - A = \left| \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0,525} - \frac{1}{0,3} \right) \right| = 0,741 \frac{1}{m};$$

$$\cos \theta = \frac{0,741}{2,619} = 0,273.$$

По таблице для находим $m = 1,223, n = 0,835$.

Большая и малая полуоси эллипса контакта:

$$a = 1,223 \cdot \sqrt[3]{\frac{3\pi}{4} \cdot \frac{122,7 \cdot 10^3 \cdot 3,304 \cdot 10^{-12}}{2,619}} = 8,74 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 8,74 \text{ мм};$$

$$b = 0,835 \cdot \sqrt[3]{\frac{3\pi}{4} \cdot \frac{122,7 \cdot 10^3 \cdot 3,304 \cdot 10^{-12}}{2,619}} = 5,96 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 5,96 \text{ мм}.$$

Максимальное давление в контакте:

$$P_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{122,7 \cdot 10^3}{\pi \cdot 8,74 \cdot 10^{-3} \cdot 5,96 \cdot 10^{-3}} = 1129 \text{ МПа}.$$

Рассчитаем отрезок, который появляется при контакте «колесо – рельс» при эллиптическом контакте:

$$\Delta h = \tan \left(\frac{h}{a} \right) \cdot a, \text{ мм}; \quad \Delta h = 0,184 \cdot 8,74 = 1,6 \text{ мм}.$$

Таким образом, нормальное напряжение на поверхностях катания рельса и колеса зависит от нагрузки колеса на рельс, радиусов поверхностей катания колеса и рельса, свойств взаимодействующих материалов. При движении подвижного состава положение

колёсной пары по отношению к рельсам существенно меняется, приводя к возникновению различных сочетаний контактных зон колеса и рельса.

Библиографический список:

1. **Евтух, Е. С., Сакало, В. И.** Влияние рельсовых стыков на накопление контактно-усталостных повреждений в колесах подвижного состава // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2013. - № 4. - С. 9-17.
2. **Захарова, С.М.** Контактно-усталостные повреждения колёс грузовых вагонов // М.: Интекст, 2004. – 160 с.

Bibliography:

1. **Evtukh, E.S., Sakai, V.I.** Effect of rail joints on the accumulation of contact fatigue damage in the wheels rolling // Herald Bryansk State Technical University. - 2013. - № 4. - S. 9-17.
2. **Zakharov, S.M.** Contact fatigue damage of wheel wagons // M.: Intekst, 2004. - p.160

УДК 620.178.37

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПЫТАНИЙ НА ИЗНАШИВАНИЕ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Е.А. Памфилов, Г.А. Пилюшина

Брянский государственный технический университет

Решение проблемы повышения работоспособности техники различного назначения и необходимость прогнозирования срока службы изделий по показателям износостойкости требует разработки методологии триботехнических испытаний и соответствующего испытательного оборудования. Правильно разработанная или выбранная методика износных испытаний является необходимым условием получения достоверных результатов, позволяющих обоснованно использовать выработанные рекомендации в промышленности. Следовательно, вопросы методологии износных испытаний неразрывно связаны с проблемой повышения качества машин и инструмента.

Для исследования влияния выявленных факторов на сопротивляемость изнашиванию поверхностей деталей машин целесообразно использовать лабораторные испытания как наименее трудоемкие и дорогостоящие. При их проведении выбранные экспериментатором факторы, могут задаваться достаточно точно, что создает условия для надежной сравнительной оценки их влияния на износ.

Достоверность информации в этом случае обеспечивается главным образом тщательностью постановки опытов, число повторений которых составляет значительно меньшую величину, чем при натурных испытаниях.

Методики испытаний на изнашивание необходимо разрабатывать таким образом, чтобы воспроизводились возможные виды изнашивания. Оценка же сопротивляемости деталей машин и инструментов износу при проявлении каждого из видов изнашивания может осуществляться посредством проведения отдельных испытаний на различных образцах или путем дифференцированной оценки результатов действия альтернативных механизмов изнашивания на одном образце, воспроизводящем рабочую поверхность детали или инструмента.

В натурных условиях эксплуатации землеройных и дорожно-строительных машин и оборудования самым распространенным является механическое изнашивание, включающее абразивное, ударно-абразивное, усталостное и некоторые иные разновидности.

При взаимодействии абразивных частиц с поверхностью в каждом случае отделению частицы с поверхности трения предшествует механическое разрушение металла. При этом силовой фактор в раскрытии механизма имеет исключительно важное значение. С ним связаны последующие поиски критериев оценки износостойкости материалов. Зная заранее исходные условия нагружения оборудования или инструмента можно определить ведущую роль динамических нагрузок и их связь с характером изнашивания.

Поэтому при выборе принципиальных схем исследования изнашивания при динамических нагрузках учитывалась необходимость получения на образцах качественной картины характерной для условий эксплуатации, и возможности сравнения результатов исследований, полученных с ранее известными результатами абразивного изнашивания.

Для абразивного изнашивания при трении скольжения по монолитному абразиву характерно высокое внешнее силовое воздействие на поверхность металла. В этих условиях интенсивность изнашивания определяется соотношением прочностных характеристик металла и абразива, то есть высокая прочность и твердость абразива определяет его способность внедряться в металл и разрушать его при движении путем резания или смятия. Если металл более прочный и твердый – разрушается абразив.

В механизме абразивного изнашивания при трении скольжения велика роль не только твердости и прочности, но и способности исходных структур материалов сопротивляться хрупкому разрушению при воздействии климатически низких температур, при которых работают значительное количество строительной и землеройной техники.

Охлаждение сталей в область низких температур ухудшает вязкость и пластичность, что вызывает переход от вязкого разрушения поверхности абразивными частицами к хрупкому. В точках контакта абразива и материала при определенных условиях напряжения возникают микротрещины, а скольжение абразивных частиц обуславливает их распространение в микрообъеме. Ухудшение пластических свойств и внешнее трение вызывают макролокализацию пластической деформации. Образующиеся в процессе деформации микротрещины являются своего рода концентраторами напряжений, облегчающими срез материала. С понижением температуры в локальных зонах может происходить переход от среза к сколу. Границы этого перехода весьма условны и могут характеризоваться критическим напряжением, определяющим границу вязкого и хрупкого разрушения, и зависящую от величины возникающих деформаций микротрещины. Эту критическую величину напряжения в приближенном значении можно определить по формуле Гриффитса – Орована [1]:

$$\sigma = \left(\frac{W_p \cdot E}{L} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

где σ – критическое напряжение перехода от вязкого разрушения к хрупкому; W_p – энергия пластического деформирования; E – модуль упругости материала; L – длина микротрещины в зоне деформации.

Учитывая специфику работы исследуемой техники и инструмента были разработаны методы исследования на изнашивание в условия динамического нагружения и воздействия низких температур.

Сущность этих методов состоит в том, что по охлажденному до заданной температуры образцу металлическим образцом через абразивную ленту наносят удары с заданными энергией, частотой и скоростью или осуществляют скольжение образца с заданными давлением и скоростью по абразивной поверхности и оценивают износ после окончания испытаний путем взвешивания образца или измерения его линейных размеров.

Схема испытательной установки для определения износа при трении по абразивной поверхности приведена на рис. 1. Испытательная установка содержит привод, механизм нагружения и систему охлаждения образца. Привод обеспечивает скольжение образца по абразивной поверхности, закрепленной на пустотелом барабане, совершающем возвратно-

винтовое движение со скоростью 0,01...0,2 м/с. Шаг винтового движения равен шагу ходового винта, по которому перемещается барабан, обеспечивая контактирование образца с возобновленной не менее чем на 50% изнашивающей поверхностью. Механизм нагружения содержит шпиндель и сменные грузы, которыми регулируется давление на образец в процессе проведения испытаний на изнашивание в пределах 0,05...0,5 МПа.

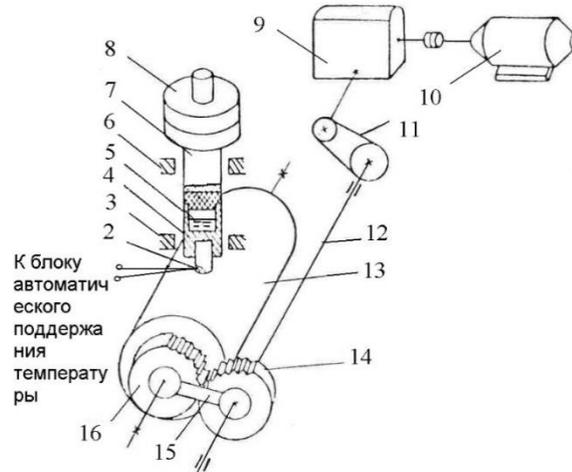


Рис. 1. Схема испытательной установки для исследования изнашивания при трении по абразивной поверхности: 1-образец; 2-термопары; 3,6-кольца; 4-теплоизолированная камера; 5- охлаждающая среда; 7-шпиндель; 8-сменные грузы; 9-редуктор; 10-электродвигатель; 11-клиноременная передача; 12-вал; 13-барабан; 14,16 – зубчатые колеса; 15- скользящие опоры

Система охлаждения образца включает закрепленную в шпинделе при помощи колец теплоизолированную камеру, во внутреннюю полость которой подают охлаждающую среду, обеспечивающую охлаждение испытуемого образца и поддержание его заданной температуры при испытаниях. Интенсивность и объем подачи охлаждающей среды регулируют блоком автоматического поддержания температуры, управляемым сигналом, поступающим от закрепленной в образце термопары. Система обеспечивает охлаждение образца от 173 до 293К и поддержание при испытаниях заданной температуры в указанном диапазоне с погрешностью не более 5К.

Конструктивно привод установки выполнен следующим образом. От реверсивного электродвигателя вращение через редуктор передается с помощью клиноременной передачи на вал. На валу на скользящей шпонке установлено зубчатое колесо, которое входит в зацепление с зубчатым колесом, жестко соединенным с барабаном. При вращении барабан одновременно движется вдоль неподвижно закрепленного ходового винта.

Таким образом, путь трения образца по абразивной поверхности представляет собой винтовую линию. Передвижение зубчатого колеса вдоль вала по мере движения барабана осуществляется с помощью скользящих опор. По окончании испытаний одного образца или в случае использования всей абразивной поверхности привод установки автоматически отключается. После замены изношенной абразивной поверхности барабану задается обратное движение.

Изнашивание деталей при ударных нагрузках по абразиву имеет ряд особенностей. На изнашивание сталей при ударе по абразиву влияет слой абразива, энергия удара, форма и площадь контакта, размер абразивных частиц, соотношение твердости материала и абразива. Факторы, определяющие специфику изнашивания при ударе сложны и многочисленны: ударное взаимодействие детали с абразивом, внедрение твердой частицы в металл, упругие и пластические свойства поверхностного слоя с последующим развитием в нем температурных, фазовых и структурных изменений, усталостные явления, изменение исходного состава материала в поверхностных слоях.

В зависимости от свойств материала и энергии удара разрушение поверхности может иметь различную физическую природу: хрупкое разрушение срезом, малоцикловую усталость, вязкое разрушение [2]. При хрупком разрушении с увеличением пластичности износостойкость материала увеличивается. Малоцикловая усталость при ударно-абразивном изнашивании развивается при повышении температуры, самоупрочнении и последующем охрупчивании поверхностного слоев. При вязком разрушении твердость повышает износостойкость материала.

При выборе материалов для деталей, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания, использование одной твердости в качестве критерия износостойкости недостаточно. Необходим комплексный подход с использованием таких свойств материала, как прочность, пластичность, ударная вязкость, от которых зависит аккумулирование энергии ударного воздействия частиц [3].

Возможность использования такой методики связана с тем, что процессы изнашивания поверхностей при ударе являются быстропротекающими, совпадающими по времени с собственно ударом и продолжающимися в течение малых промежутков времени, следующих за моментом удара.

Схема предлагаемой установки для испытаний на ударно-абразивное изнашивание приведена на рис. 2. Установка содержит ударный механизм, привод, механизм перемещения абразивной ленты, систему охлаждения образца и механизм удаления продуктов изнашивания.

Ударный механизм включает шпindel с закрепленными в нем контрообразцом и сменными грузами, с помощью которых регулируют удельную энергию удара контрообразца по образцу в пределах $0,5 \cdot 10^4 \dots 8 \cdot 10^4$ Дж/м² (частота ударов - 0,5...1,5 Гц; продолжительность контактирования образца и контрообразца – не более 0,1 с). Подъем шпинделя осуществляется от привода кулачком на высоту, задаваемую геометрией кулачка.

Система охлаждения образца содержит теплоизолированную камеру, во внутреннюю полость которой подают охлаждающую среду, например, жидкий азот. Интенсивность подачи и объем подаваемой охлаждающей среды регулируют блоком автоматического поддержания температуры, управляемым сигналом.

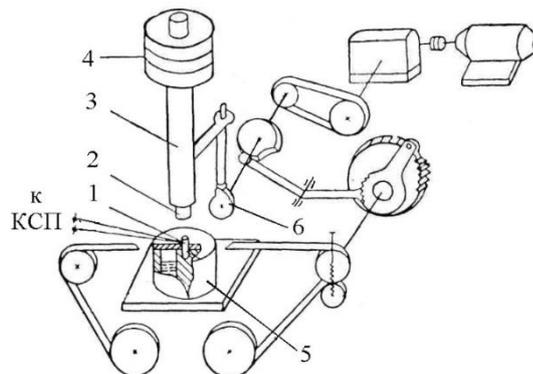


Рис. 2. Схема установки для испытаний на ударно-абразивное изнашивание: 1 – образец; 2- контрообразец; 3 – шпindel; 4- сменные грузы; 5- теплоизолированная камера; 6 – кулачок

Существенно приближает условия лабораторных исследований к натурным условиям использование замороженных абразивных поверхностей [3,4].

Исследования изнашивания материалов в условиях низких климатических температур выполнялись с целью выбора перспективных материалов для изготовления рабочих органов и инструментов техники северного исполнения и способов их упрочняющей обработки [8,9,10].

Сущность методики исследования изнашивания в условиях ударного нагружения при температурах до 173К состоит в том, что по охлажденному до температуры испытаний образцу производятся повторные удары с заданной энергией, частотой и скоростью соударения металлическим контробразцом непосредственно или через гибкую изнашивающую ленту, температура которых поддерживается нормальной. Кратковременность процесса удара в сочетании с интенсивным охлаждением и относительно не высокой частотой соударения позволяет стабилизировать температуру контактирующих поверхностей еще до наступления момента следующего удара.

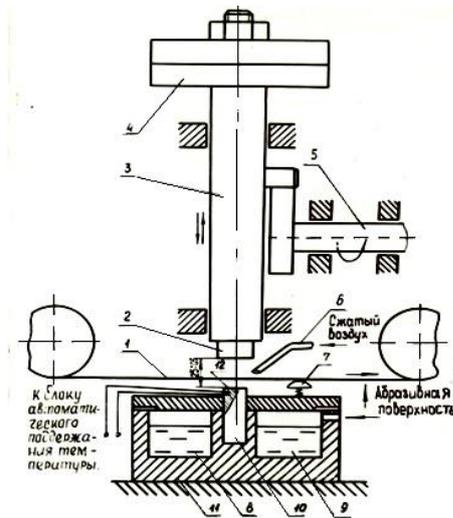


Рис.3. Схема установки для исследования изнашивания при ударе в условиях низких температур: 1- изнашивающая лента, 2- контробразец, 3- ударник, 4 - сменные грузы, 5- привод, 6- сопло, 7 – приспособление, 8- теплоизолированная камера, 9-охлаждающая среда, 10- образец, 11- стол; 12- термометр.

Схема реализации указанного способа приведена на рис.3. Для ее осуществления предусмотрен ударный механизм, привод перемещения изнашивающей ленты, система охлаждения образца и механизм удаления продуктов изнашивания. Ударный механизм включает ударник, в котором закрепляется контробразец и сменные грузы, с помощью которых регулируется энергия удара контробразца по образцу в пределах от 0,25 до 2,50 Дж. Привод установки обеспечивает подъем ударника, его свободное падение и удар с различной частотой. Продолжительность контактирования образца и контробразца после соударения составляет не более 0,1 с.

Конструкция установки обеспечивает периодическое перемещение изнашивающей ленты между ударами по неподвижной поверхности или непрерывное движение ленты с заданной скоростью в случае необходимости нагружения после удара. Установка имеет приспособление для отвода перемещаемой изнашивающей ленты от образца.

Охлаждение образцов и поддержание их заданной температуры достигается с помощью теплоизолированной камеры, во внутреннюю полость которой подается охлаждающая среда. Интенсивность и объем подачи охлаждающей среды регулируется системой автоматического поддержания температуры, управляемой сигналами, поступающими от термометра, закрепляемой вблизи испытываемого торца образца. Продукты изнашивания удаляются струей сжатого воздуха, охлажденного до 253-263К, подаваемого под давлением на изнашиваемую поверхность образца. Установка позволяет исследовать изнашивание замороженным абразивом [6, 7].

При разработке методики исследований установлено, что из режимов испытаний наибольшее влияние на стабильность температурного режима исследуемого образца,

оказывают энергия и частота соударения, время контактирования образца и контробразца после удара, теплопроводность исследуемого материала, разность температур испытания и охлаждающей среды. Для оценки их взаимосвязи при планировании исследований установлен критерий соблюдения температурного режима, на основании которого задаются условия испытаний:

$$\frac{K_T \cdot E^{2,91} \cdot f^{1,86} \cdot \tau^{1,42}}{\Delta T \cdot Q^{0,24} \cdot \lambda^{0,11}} \leq 1$$

где E – энергия соударения; f – частота соударения; τ – время контактирования образца; λ – теплопроводность материала; Q – разность температур испытания и охлаждающей среды; K_T – коэффициент определяемый экспериментально

В процессе экспериментов установлено, что, помимо E , f , τ , λ , Q на величину разогрева поверхностного слоя образца при испытаниях оказывают влияние размеры образца, конструктивные особенности охлаждающего устройства и некоторые другие факторы, учитываемые коэффициентом K_T , который определяется экспериментально для конкретных условий.

Таким образом, для эффективного повышения износостойкости рабочих органов и инструмента землеройной, дорожно-строительной и других видов техники необходим анализ трибоматериаловедческой системы «износостойкий материал – условия изнашивания – изнашивающая среда», так как процесс изнашивания охватывает совокупность сложных явлений, происходящих при различных взаимодействиях поверхностных слоев металла с изнашивающей средой в определенных условиях эксплуатации.

В решении задачи повышения износостойкости путем оптимизации составов и структуры конструкционных материалов необходимо учитывать такие важные показатели, как совместимость материалов узла трения в заданном диапазоне температур и нагрузок, поскольку изменение структуры поверхностных слоев, находящихся в контакте материалов оказывает существенное влияние на протекание механизмов изнашивания на фрикционном контакте.

Применение разработанных в работе экспериментальных методов при решении задач повышения износостойкости деталей и инструмента дает значительные преимущества с точки зрения сокращения времени испытаний, средств, усилий, позволяет представить экспериментальный материал в виде аналитических зависимостей, выбирать оптимальные решения, осуществлять более глубокий анализ полученного материала, давать более обоснованные рекомендации.

Библиографический список

1. **Тарасов, Г.Ф.** Термическая обработка сталей, как фактор повышения износостойкости при низких температурах/ Г.Ф. Тарасов, А.И. Горбуля //Вестник Сиб. гос. аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева, 2005. № 3. С. 253-257.
2. **Сорокин, Г.М.** Трибология сталей и сплавов/ Г.М. Сорокин М. Недра, 2000.317с.
3. ГОСТ 23.212-82. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на изнашивание при ударе в условиях низких температур/Е.А. Памфилов, В.А. Ковальчук, С.С. Грядунов и др.//Гос. комитет СССР по стандартам. М.:Изд-во стандартов, 1982. 11 С.2.
4. **Памфилов, Е.А.** Методические основы оценки работоспособности рабочих органов строительных и дорожных машин /Е.А. Памфилов, С.С. Грядунов, Г.А. Пилюшина //Вестник Брянского гос. тех. универ. БГТУ, 2009. № 4.С. 37-42.
5. **Памфилов, Е.А.** Методология триботехнических испытаний/Е.А. Памфилов, Г.А. Пилюшина, А.М. Савочкин //Физика, химия и механика трибосистем: Межвуз. сб. науч. тр. Иван. гос. ун-т, 2006. 5. С. 9-14.

6. А.С. 1010514 СССР, МПК G01N 3/56, № 3305960/25 Способ определения износостойкости материалов при низких температурах/Е.А. Памфилов//заявл. 25.06.81; опубл. 07.04.83, Бюл. № 13.
7. **Памфилов, Е.А.** Установка для определения износостойкости материалов в условиях циклического изменения температуры и нагрузки/ Е.А. Памфилов, В.С. Рыжеванов, А.М. Буглаев и др.// Заводская лаборатория. 1979.№ 4. С. 372-374.
8. **Памфилов, Е.А.** Методика ускоренных испытаний на изнашивание рабочих органов землеройных машин/Е.А. Памфилов, С.С. Грядунов, А.А.Суслов// Строительные и дорожные машины.1987. № 6. С.5-6.
9. **Памфилов, Е.А.** Технологическая оптимизация триботехнических параметров функциональных поверхностей деталей машин/Е.А. Памфилов, Г.А. Пилюшина, П.Г. Пыриков//Контактная жесткость и износостойкость деталей машин. Брянск: БГТУ, 2008. С.144.
10. **Памфилов, Е.А.** Возможности и перспективные пути повышения работоспособности машин и оборудования лесного комплекса/Е.А. Памфилов, Г.А. Пилюшина //Известия вузов «Лесной журнал». 2013. № 5. С. 129-141.

Bibliography:

1. **Tarasov, G.F.** Termicheseskaja processing of steels, as the factor of increase of wear resistance at low temperatures/G.F.Tarasov, A.I.Gorbulja//Bulletin of the Siberian state Space university of academician M.F.Reshetneva, 2005. № 3. 253-257.
2. **Sorokin, G.M.** Tribologija of steels and alloys / G.M.Sorokin of M.:Nedra, 2000.317.
3. GOST 23. Maintenance of wear resistance of products. A test method of materials on wear process at blow in the conditions of low temperatures/ Е.А. Pamfilov, V.A.Kovalchuk, S.S.Grjadunov and other//State Committee of the USSR on standards. M.:Standards, 1982. 11.2.
4. **Pamfilov, E.A.** Methodical of a basis of an estimation of working capacity of working bodies of building and road cars/ Е.А. Pamfilov, S.S.Grjadunov, G.A.Piljushina//the Bulletin Bryansk state That. University. BSTU, 2009. № 4. 37-42.
5. **Pamfilov, E.A.** Methodolog triboteshnical tests/ Е.А. Pamfilov, G.A.Piljushina, A.M.Savochkin//Physics, chemistry and mechanics tribosistem: Interhigh school. Ivan. state Un y, 2006. 5. 9-14.
6. А.С. 1010514 USSR, МПК G01N 3/56, № 3305960/25 Way of definition of wear resistance of materials at low temperatures/Е.А. Pamfilov // declared 25.06.81; published 07.04.83, Bull. № 13.
7. **Pamfilov, E.A.** Installation for definition of wear resistance of materials in the conditions of cyclic change of temperature and loading / Е.А. Pamfilov, V.S.Ryzhevanov, А.М. Buglaev and other//Factory laboratory. 1979. № 4. 372-374.
8. **Pamfilov, E.A.** Technique of the accelerated tests for wear process of working bodies of digging cars/ Е.А. Pamfilov, S.S.Grjadunov, А.А.Suslov//Building and road cars.1987. № 6. 5-6.
9. **Pamfilov, E.A.** Technological optimisation triboteshnical parametres of functional surfaces of details of cars/ Е.А. Pamfilov, G.A.Piljushina, P.G.Pyrikov//Contact rigidity and wear resistance of details of cars. Bryansk: BSTU, 2008. 144.
10. **Pamfilov, E.A.** Possibilit and perspective ways of increase of working capacity of cars and the equipment of a wood complex/ Е.А. Pamfilov, G.A.Piljushina//News of high schools «Wood magazine». 2013. № 5.129-141.

УДК 620.178.162.4; 620.194.3

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИСПЫТАНИЙ КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОГО ИЗНАШИВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

Е.А.Памфилов¹, Я.С.Прозоров², С.В.Кузнецов³, С.В.Лукашов²

¹Брянский государственный технический университет

²Брянский государственный инженерно-технологический университет

³Брянский государственный университет имени академика И.Г.Петровского

Коррозионно-механическое изнашивание (трибокоррозия) представляет собой разрушение материала в результате одновременного действия трения и коррозии. При этом во многих случаях проявляется взаимовлияние механических и химических явлений (синергизм), в результате чего картина изнашивания может существенно изменяться. Трибокоррозия происходит в широком спектре совместных механических и химических воздействий. Механическое изнашивание при этом возникает в результате фрикционного контакта твердых тел (трение скольжения и качения, фреттинг), воздействий потока жидкости (кавитация) и абразивных частиц (эрозия). Коррозия возникает вследствие присутствия в зоне контакта химически агрессивных жидких сред или окисляющих газов. Эксплуатация в подобных условиях характерна для металлургического оборудования, техники химической, деревообрабатывающей, строительной и нефтяной отраслей промышленности.

К сожалению, закономерности проявления взаимовлияния механического и химического факторов трибокоррозии пока недостаточно изучены как теоретически, так и экспериментально. Это связано с тем, что для изучения коррозионно-механического изнашивания необходимо одновременное воспроизведение механических и химических составляющих процессов изнашивания. В последнее время в зарубежной и отчасти отечественной практике исследования коррозионно-механического изнашивания используются методы, применяемые при изучении коррозии. С их помощью можно понять, как механическое изнашивание влияет на кинетику реакций коррозии, а также оценить влияние этих реакций на механические характеристики фрикционного контакта [1].

Поэтому необходима разработка методики использования экспериментов для исследования коррозионно-механического изнашивания и их стандартизация. В результате выполнения указанных работ в 2004 году был создан стандарт США ASTM G119 [2], описывающий порядок вычленения компонентов коррозионно-механического изнашивания и исследования взаимодействия между ними. Европейские исследователи предложили собственный экспериментальный подход к исследованию трибокоррозии [3-5]. Оба этих подхода основаны на объединении электрохимических и трибологических нагрузок и могут быть выполнены с помощью одного и того же экспериментального оборудования. Однако G119 включает изнашивание при анодной и катодной поляризации для исследования взаимодействия между износом и коррозией, а европейский подход предусматривает изнашивание в условиях равновесного потенциала E_{oc} .

Для изучения трибокоррозионных характеристик материалов в условиях трения скольжения предлагается использовать систему, позволяющую подвергать исследуемый образец одновременно трибологическим и коррозионным процессам [6]. При этом возможно применение стандартизованных как в России, так и за рубежом схем «палец - диск» и «сфера - плоскость». В настоящее время для проведения таких исследований применяется большое количество установок, в том числе и серийного изготовления.

При создании стендов для исследования коррозионно-механического изнашивания должны быть обеспечены следующие основные требования:

1. Зона фрикционного контакта должна быть полностью погружена в раствор электролита. При этом в целях безопасности образец желательно выполнять неподвижным со скользящим поверх него контробразцом.

2. Образец должен быть электрически подключен к потенциостату и выполнять функции рабочего электрода. Таким образом, он является элементом трибоэлектрохимической ячейки, включающей в себя также вспомогательный и противозлектрод, которые позволяют контролировать электрохимические параметры воздействия на образец при проведении экспериментов. Схема трибоэлектрохимической ячейки представлена на рис. 1.

3. Для изготовления контробразца желательно использовать диэлектрические материалы (например, оксид алюминия или диоксид циркония), что позволяет предотвратить гальваническую связь между образцом и контробразцом. Если это невозможно, тогда он должен быть изолирован от остальной части устройства.

4. Держатель контробразца также должен быть изготовлен из непроводящего ток материала, чтобы предотвратить электрический контакт между электролитом и аппаратурой.

Для оценки устойчивости материалов к коррозии возможно использование различных электрохимических методов, а именно гальванических, потенциодинамических, потенциостатических и электрохимической импедансной спектроскопии. Эти методы могут активно использоваться в трибокоррозионных экспериментах для оценки взаимосвязи между механическим и химическим компонентами износа.

При выполнении исследований трибокоррозии наибольшее распространение получили подходы, объединяющие в себе электрохимические и трибологические испытания: 1) исследование процессов в зоне трения скольжения при накладываемом внешнем потенциале электрохимической ячейки [2]; 2) изучение трения в условиях равновесного потенциала системы [3; 5].

Метод наложения внешнего потенциала предполагает проведение исследований в 4 этапа. Параметры проведения экспериментальных исследований определяются на основе анализа условий эксплуатации: параметры трения, нормальная нагрузка P , путь трения L , скорость скольжения V , свойства контробразца, вид электролита, его температура, кислотность, накладываемый анодный потенциал. Площадь поверхности образца, подверженной воздействию электролита, обозначается A_o и обычно имеет определенное значение. Эта площадь включает две зоны: область изнашивания в пределах дорожки трения A_w и неизношенную поверхность $A_o - A_w$.

Эксперимента проводится в следующем порядке: вначале осуществляется очистка и промывка образца, после чего он погружается в раствор электролита. После погружения образца необходимо дождаться стабилизации значения равновесного потенциала ячейки E_{oc} .

Общая потеря массы материала M_{tot} в условиях коррозионно-механического изнашивания может быть выражена как $M_{tot} = M_{mech} + M_c + M_{syn}$, где M_{mech} - потеря массы за счет механического износа в отсутствие коррозии; M_c - потеря массы из-за коррозии в отсутствие изнашивания; M_{syn} - потеря массы за счет взаимодействия между износом и коррозией. M_{syn} можно представить в виде суммы двух слагаемых: M_{w-c} и M_{c-w} , где M_{w-c} - увеличение коррозионных потерь из-за механических воздействия (индуцированная трением коррозия), M_{c-w} - увеличение механического износа вследствие коррозии (индуцированный коррозией износ). Поэтому предыдущее уравнение может быть выражено следующим образом:

$$M_{tot} = M_{mech} + M_c + M_{c-w} + M_{w-c}. \quad (1)$$

Потеря массы образца в результате электрохимических реакций может быть определена по закону Фарадея:

$$M = \frac{i_a \cdot M_a \cdot t}{n \cdot F}, \quad (2)$$

где M (кг) – потеря массы металла в результате химических реакций за время t (с.); i_a (A) - сила анодного тока; M_a (кг/моль) - атомная масса; n — число валентных электронов; F - постоянная Фарадея.

Для чистых металлов показатель n обычно известен. Для сплавов n получают с учетом их составных элементов (при условии, что все они участвуют в процессе окисления) по формуле

$$n = \sum X_j n_j, \quad (3)$$

где X_j и n_j - часть и число электронов валентности элемента j соответственно.

На **первом этапе** определяется суммарный износ M_{tot} , измеряемый как потеря массы образцов до и после единичных испытаний в условиях коррозионно-механического изнашивания.

Второй этап экспериментов (анодная поляризация) проводится в тех же условиях, что и первый, но между металлическим образцом (рабочим электродом) и электродом сравнения дополнительно задается фиксированный потенциал, поддерживаемый за счет тока между рабочим электродом и противозлектродом (рис. 1).

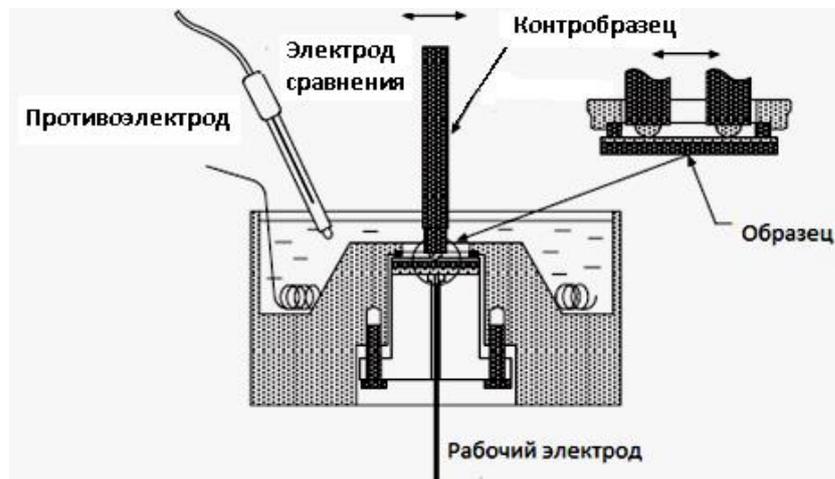


Рис.1 Трибоэлектрохимическая ячейка для исследования двунаправленного трения скольжения

Когда ток достигает стабильного значения i_a , в добавление к коррозионной нагрузке образец вступает во фрикционный контакт с контрольным образцом. Измеряемый анодный ток в условиях трения обозначается i_w (рис. 2). Сила тока измеряется при фиксированном потенциале в зависимости от времени. Таким образом, возможно проследить изменения электрохимической кинетики реакций окисления и восстановления, происходящих в зоне фрикционного контакта образца и контрольного образца. Потери материала из-за коррозии M_c и индуцированной трением коррозии M_{w-c} определяются следующим образом:

$$M_c = \frac{i_a \cdot M_a \cdot t}{n \cdot F}; \quad (4)$$

$$M_{w-c} = \frac{(i_w - i_a) \cdot M_a \cdot t}{n \cdot F}. \quad (5)$$

Следует отметить, что M_c рассматривается только для области локализации износа A_w для сравнения его значения с M_{w-c} . Площадь износа A_w определяется после трибокоррозионного испытания. Для пассивных материалов M_c пренебрежимо мало по сравнению с M_{w-c} , поскольку разрушение защитных пассивирующих пленок ведет к значительному ускорению растворения металла.

На данном этапе испытаний определяются значения стационарного потенциала E_{cor} , поляризационного сопротивления R_p и постоянных Тафеля β_a и β_c , а также вычисляются величины i_w и M_{w-c} .

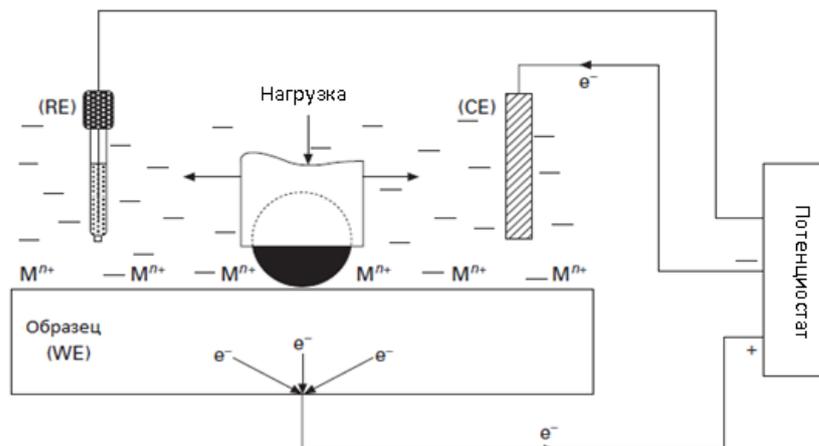


Рис.2 Механизм коррозионно-механического изнашивания при наложенном внешнем потенциале

На *третьем этапе* испытаний определяют механический компонент износа M_{mech} , для чего добиваются минимизации химического воздействия на образец. Стандарт ASTM G119 для этого предлагает применять катодную защиту (рис. 3) в размере $-1В$ от равновесного потенциала ячейки E_{oc} . Европейские исследователи рекомендуют использовать нейтральную среду с $pH=7$. В некоторых исследованиях используются сразу два подхода [2;3].

Четвертый этап представляет собой вариацию классического измерения коррозионной стойкости материала образца при отсутствии фрикционного контакта, при котором образец из исследуемого материала помещается в электролит на заданное время. По результатам испытаний определяется M_c .

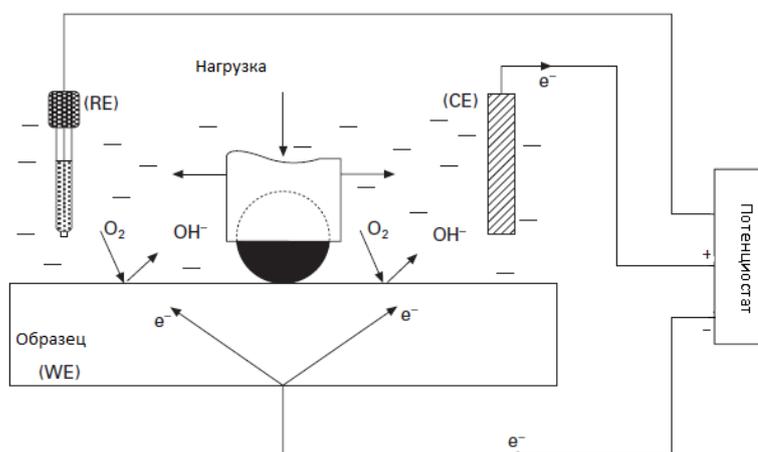


Рис.3 Механизма коррозионно-механического изнашивания в условиях катодной защиты

После определения M_{tot} , M_{w-c} , M_{mech} и M_c значение M_{c-w} вычисляется из приведенного уравнения (1). Отметим, что значение M_{c-w} может быть положительным в случаях, когда химические реакции способствуют смазыванию или уменьшают механический износ.

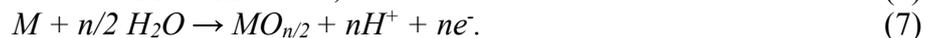
Основным преимуществом данной методики является возможность количественной оценки компонентов износа после серии экспериментальных тестов. Однако необходимость задания катодной защиты на одном из этапов эксперимента может привести к наводороживанию образцов. С другой стороны, наличие как катодной защиты, так и нейтральной среды не всегда приводит к полной остановке коррозии и химических реакций в

зоне фрикционного контакта, что свидетельствует об отсутствии универсальности у данного подхода.

Методика исследования коррозионно-механического изнашивания в условиях равновесного потенциала системы заключается в исследовании трения скольжения образца, погруженного в заданный электролит, без наложения внешнего потенциала. В указанной методике выделяют три подгруппы методов: мониторинг значения равновесного потенциала E_{oc} , исследование вольт-амперных характеристик и электрохимическая импедансная спектроскопия.

Мониторинг значения равновесного потенциала E_{oc} - простой в реализации метод, главным недостатком которого является невозможность дать количественную оценку механического и химического компонентов трибокоррозии. Равновесный потенциал системы E_{oc} – потенциал, установившийся между рабочим электродом и электродом сравнения, при котором в электрохимической системе "образец – электролит" имеют место анодные и катодные реакции. Этот параметр позволяет определить химическую активность материала образца в заданном электролите. Низкое значение E_{oc} показывает, что материал подвержен активному растворению, тогда как высокое значение E_{oc} свидетельствует о пассивности материала. Сущность метода заключается в фиксации изменений значения потенциала E_{oc} до, в течение и после приложения к образцу фрикционной нагрузки. Перед началом испытаний следует дождаться стабилизации значения потенциала. Во время трения образца его поверхность становится неоднородной, между изношенной областью A_w (внутри дорожки трения) и неизношенной областью $A_o - A_w$ (вне дорожки трения) возникают гальванические связи, что приводит к изменениям значения потенциала электрода (рис. 4). После окончания процесса трения в результате стабилизации формируется новое значение электродного потенциала E_{oc} , характер изменения которого определяет способность материала восстанавливаться после трибологической нагрузки.

Для пассивных металлов, таких как нержавеющая сталь и титановые сплавы, резкое снижение потенциала E_{oc} обычно наблюдается в начале трения и объясняется воздействием ювенильной поверхности металла на электролит из-за разрушения оксидного пассивирующего слоя на поверхности дорожки трения. Металл в этой зоне окисляется, образуя растворимые ионы и/или твердые продукты:



Образовавшиеся электроны должны быть вовлечены в катодную реакцию для продолжения окислительных реакций:

- в условиях наличия кислорода:



- в условиях отсутствия кислорода, $pH < 7$:



- в условиях отсутствия кислорода, $pH \geq 7$:



Значение потенциала E_{oc} во время трения зависит от коррозионных потенциалов изношенной и неизношенной областей образца, кинетики химических реакций в зоне трения, а также от отношения Γ площадей анодной (изношенной) и катодной областей образца. Если изношенной становится вся функциональная поверхность образца, то Γ стремится к единице и значение потенциала E_{oc} приближается к значению потенциала металла в контакте с его ионом E_{M/M^+} . При отсутствии износа поверхности ($r = 0$), потенциал E_{oc} практически не меняется. Таким образом, значения потенциала E_{oc} пассивных материалов при трибокоррозии варьируются в диапазоне от максимального (до приложения фрикционной нагрузки) до минимального ($E_{oc} = E_{M/M^+}$).

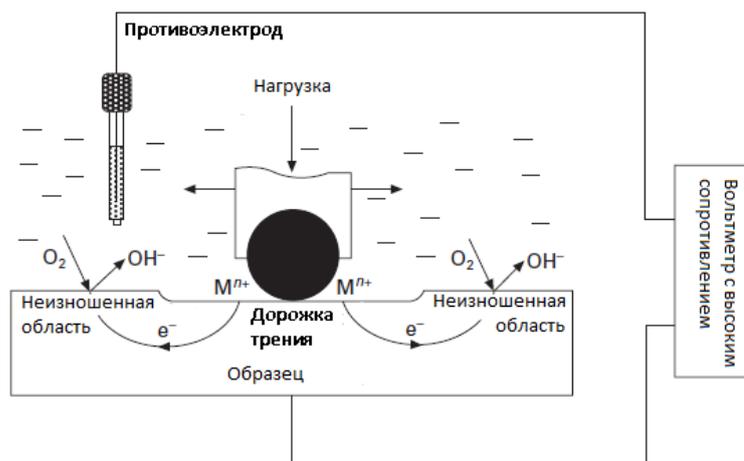


Рис.4 Возникновение гальванических связей в условиях равновесного потенциала системы

Для количественной оценки трибокоррозионного износа предлагается схема измерения вольтамперных характеристик между двумя электродами из одинакового материала. Первый электрод используется как образец, а второй служит противозлектродом (рис. 4). Два электрода связаны через амперметр, измеряющий гальванический ток. Перед приложением фрикционной нагрузки к образцу гальванический ток равен нулю, так как электроды имеют одинаковое значение потенциала E_{oc} . В условиях трения потенциал образца сдвигается, между образцом и контрэлектродом создается гальваническая ячейка. Возникающий гальванический ток измеряется амперметром. Этот метод применяется в тех случаях, когда изношенная область поверхности образца генерирует электроны в процессе окисления металла, а катодная реакция на неизношенной области задействует эти электроны. Изменение значения протекающего тока объективно характеризует влияние трения на процесс коррозии.

Стоит отметить, что не все электроны, порожденные реакцией окисления металла, проходят через амперметр. Поэтому данный метод показывает скорее тенденцию, но не дает репрезентативного количественного результата. Для определения точной количественной оценки либо изолируют поверхность образца от электролита (за исключением изношенной области) с целью снизить катодные реакции на поверхности образца, либо увеличивают размер вспомогательного электрода. Преимуществами этого метода являются его простота и доступность, недостатками – квазиобъективная количественная оценка влияния трения на процесс коррозии и отсутствие возможности определить влияние коррозии на изнашивание.

Сущность **метода электрохимической импедансной спектроскопии (EIS)** состоит в получении отклика в виде изменения силы тока при воздействии потенциальных колебаний (обычно с медианным значением E_{oc}) с амплитудой E_a и частотой f на электрохимическую систему. Электрохимический импеданс Z , являющийся отношением потенциала к току, вычислен по выбранному частотному диапазону для получения спектра импеданса. Последний моделируется с использованием эквивалентного электродного потенциала исследуемой системы.

Необходимым условием для генерации спектра сопротивления является стабильность электрохимической системы с точки зрения электродного потенциала. В целом колебания потенциала E_{oc} должны быть менее 1 мВ/мин, что в условиях коррозионно-механического изнашивания труднодостижимо. На текущий момент метод успешно применяется только для пассивных материалов, подвергающихся однонаправленной нагрузке трением скольжения.

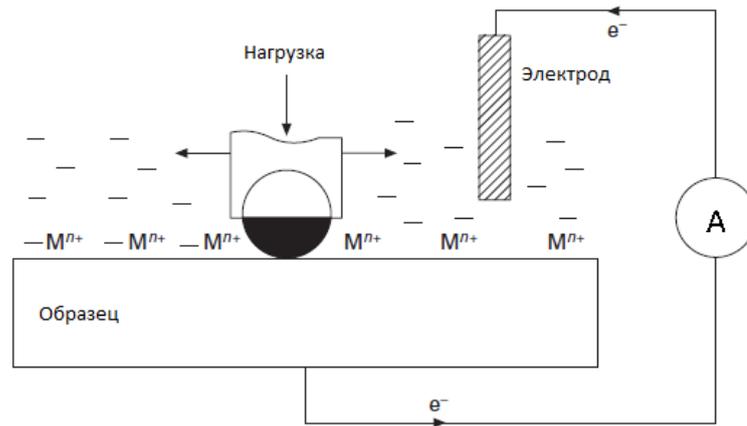


Рис. 5. Схема измерения вольтамперных характеристик гальванической связи.

Согласно применяемой методике, делается предположение, что дорожка трения на образце состоит из двух отдельных зон: активной площадки A_{act} , где исходный пассивирующий слой был удален; и пассивной площади A_{repass} , где оксидный слой либо не был удален, либо уже восстановился. Площадь поверхности дорожки износа A_{tr} рассматривается как площадь поверхности, измеренной в конце испытания в условиях трения скольжения:

$$A_{tr} = A_{act} + A_{repass}. \quad (11)$$

Потеря массы материала в дорожке трения W_{tr} состоит из компонентов, связанных с различными зонами износа на дорожке износа:

$$W_{tr} = W_{act}^c + W_{act}^m + W_{repass}^c + W_{repass}^m, \quad (12)$$

где W_{tr} – суммарная потеря массы материала в дорожке износа; W_{act}^c – потеря массы материала в результате коррозии материала в активной площади; W_{act}^m – потеря массы материала в результате механического изнашивания материала в активной площади; W_{repass}^c – потеря массы материала в результате коррозии материала в пассивной площади; W_{repass}^m – потеря массы материала в результате механического изнашивания материала в пассивной площади.

Величина W_{repass}^c находится путем измерения EIS до износа (после стабилизации потенциала E_{oc}). Поляризационное сопротивление пассивного материала определяется по формуле

$$R_{repass} = R_0 \cdot A_0, \quad (13)$$

где R_0 – поляризационное сопротивление пассивной области образца, измеренное при помощи EIS; A_0 – площадь поверхности образца.

Плотность тока через пассивную область может быть выражена следующим образом:

$$i_{repass} = \frac{B}{R_{repass}}, \quad (14)$$

где B – константа, обычно в диапазоне между 13 и 35 мВ для металлических материалов (для проведения экспериментов рекомендуется использовать значение 24 мВ). Потеря массы материала в результате коррозии пассивной области на дорожке износа определяется законом Фарадея:

$$W_{repass}^c = i_{repass} \cdot A_{repass} \cdot \frac{M}{n \cdot F \cdot d} \cdot t. \quad (15)$$

В условиях постоянного трения скольжения предполагается, что в дорожке трения активная площадь преобладает (времени для репассивации поверхности металла недостаточно). Можно считать, что $A_{tr} = A_{act}$ (A_{repass} пренебрежимо мало) и $W_{tr} = W_{cat}^m + W_{act}^m$. Электрохимическая импедансная спектроскопия выполняется в процессе приложения фрикционной нагрузки к образцу. Таким образом, по аналогии с формулой (15) можно найти W_{act}^m для активной площади:

$$W_{act}^c = i_{act} \cdot A_{act} \cdot n \cdot F \cdot d \cdot t \quad (16)$$

Потеря массы материала в результате механического износа активного материала вычисляется по формуле

$$W_{act}^m = W_{tr} - W_{act}^c \quad (17)$$

Для формирования репассивирующего слоя на изношенной поверхности образца после приложения фрикционной нагрузки делают перерыв, достаточный для образования этого слоя. Считается, что доля поверхности, покрытой репассивирующим слоем, A_{repass}/A_{tr} должна быть пропорциональна отношению времени t_{lat}/t_{reac} , где t_{lat} – промежуток времени между приложениями нагрузки, а t_{reac} – время, необходимое для формирования пассивного слоя и достижения стабилизации потенциала E_{oc} . В этом случае, W_{act}^c и W_{act}^m вычисляются из уравнения (16) и (17).

$$A_{act} = \left(1 - \frac{t_{lat}}{t_{reac}}\right) \cdot A_{tr} \quad (18)$$

При этом W_{repass}^c рассчитывается из уравнения [14], и во всех уравнениях $t = N \cdot t_{lat}$, где N – количество циклов скольжения.

Суммарную потерю материала в результате механического износа пассивного слоя получаем по формуле

$$W_{repass}^m = W_{tr} - W_{act}^c - W_{act}^m - W_{repass}^c \quad (19)$$

Достоинствами данного метода являются проведение испытаний при равновесном электродном потенциале E_{oc} без искусственного изменения электрохимических параметров системы и определение количественных оценок различных компонентов коррозионно-механического износа материала. К недостаткам метода можно отнести возможность применения только для пассивных материалов, возможность проведения исследования только в условиях однонаправленного трения скольжения, а также наличие ряда допущений (использование одинакового значения параметра B для пассивной и активной поверхностей металла, предположение об одинаковых электрохимических свойствах пассивной площади на дорожке трения и в исходной пассивной области).

Анализируя рассмотренные методы, можно сделать следующие выводы [7]:

- При исследовании коррозионно-механического изнашивания целесообразно использовать электрохимические методы, поскольку они позволяют моделировать многие химические характеристики коррозионной среды при одновременном механическом воздействии, что дает возможность оценить вклад коррозии в суммарный износ. Это достигается путем измерения силы тока и последующего расчета по известным достоверным зависимостям.

- Вместе с тем электрохимические методы имеют ряд недостатков. В частности, реальный потенциал в зоне фрикционного контакта может существенно отличаться от накладываемого потенциала вследствие омического падения напряжения. Кроме того, принятие анодного тока как меры износа образца за счет химического воздействия может быть правомерно только при отсутствии других значимых, кроме коррозионных, химических реакций, приводящих к разрушению или модификации материала образца.

- Несмотря на общность подходов к исследованию электрохимических методов, при их применении возникают серьезные затруднения при выявлении синергизма, интерпретации результатов и формулировании выводов, для чего необходим дополнительный анализ характеристик контактирующих поверхностей и продуктов износа. Для унификации и повышения точности исследований требуется более широкое использование международных и создание отечественных стандартов в части изучения коррозионно-механического изнашивания.

Библиографический список:

1. **Памфилов, Е.А.** К вопросу моделирования коррозионно-механического изнашивания / Е.А.Памфилов, Я.С.Прозоров // Трение и износ. – Минск, 2012. – Т.33.- № 3. – С. 288-297.
2. ASTM standard G119. Standard guide for determining amount of synergism between wear and corrosion. Annual Book of ASTM Standards. - USA, 2001. -Vol.03.02.
3. **Mischler, S.** Triboelectrochemical techniques and interpretation methods in tribocorrosion: a comparative evaluation // Tribology International. - 2008. - Vol. 41 - № 7. - P. 573–583.
4. Tribocorrosion of passive metals and coatings / edited by Dieter Landolt and Stefano Mischler. - Woodhead Publishing Limited, Cambridge UK, 2011. – 579 p.
5. Tribocorrosion properties of metallic materials and effects of metal release // Ph. D. Thesis by Morten Stendahl Jellesen. - Department of Manufacturing Engineering and Management, Technical University of Denmark (DTU), 2007.
6. **Pamfilov, E.A.** Mechanochemical Fracture of the Components of Wood-Cutting Equipment // Е.А.Памфилов, S.V. Lukashov, Ya.S. Prozorov // Material Science. - 2014. - Vol.50. - № 1. - P.148-155
7. **Памфилов Е.А.** Особенности исследования коррозионно-механического изнашивания в условиях трения скольжения / Памфилов Е.А., Лукашов С.В., Кузнецов С.В., Прозоров Я.С. // Вестник Брянского государственного технического университета.- Брянск, 2016.- Т.2.- №. 2.- С. 21-30

Bibliography:

1. **Pamfilov, E. A.** On modeling of corrosion-mechanical wear / E. A. Pamfilov, J. S. Prozorov // Friction and wear. – Minsk, 2012. – Vol. 33.- No. 3. – S. 288-297
2. ASTM standard G119. Standard guide for determining amount of synergism between wear and corrosion. Annual Book of ASTM Standards. - USA, 2001. -Vol.03.02.
3. **Mischler, S.** Triboelectrochemical techniques and interpretation methods in tribocorrosion: a comparative evaluation // Tribology International. - 2008. - Vol. 41 - № 7. - P. 573–583.
4. Tribocorrosion of passive metals and coatings / edited by Dieter Landolt and Stefano Mischler. - Woodhead Publishing Limited, Cambridge UK, 2011. – 579 p.
5. Tribocorrosion properties of metallic materials and effects of metal release // Ph. D. Thesis by Morten Stendahl Jellesen. - Department of Manufacturing Engineering and Management, Technical University of Denmark (DTU), 2007.
6. **Pamfilov, E.A.** Mechanochemical Fracture of the Components of Wood-Cutting Equipment // Е.А.Памфилов, S.V. Lukashov, Ya.S. Prozorov // Material Science. - 2014. - Vol.50. - № 1. - P.148-155
7. **Pamfilov E. A.** The features of the study of corrosion-mechanical wear in conditions of sliding friction / Pamfilov E. A., Lukashov C. V., Kuznetsov S. V., Prozorov Y. S. // Bulletin of Bryansk state technical University.- Bryansk, 2016.- Vol. 2 no. 2.- С. 21-30

УДК 621.891:620.178.16

УНИКАЛЬНЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ТРИБОИССЛЕДОВАНИЙ

П.Д. Дерлугян, В.М. Могильницкий, Р.А.Чебанов.
АО «ОКТБ «Орион», г. Новочеркасск

Введение

Антифрикционный самосмазывающийся материал марки К-112, разработанный «ОКТБ «Орион» для использования в качестве вкладышей опорно-ходовых частей затворов гидросооружений, а также других деталей антифрикционного назначения, в настоящее время поставляется по техническим условиям ТУ 2224-001-24191921-2004.

Материал АСМК-112 (наиболее востребованный материал марки К-112) внесен в соответствующую конструкторскую и технологическую документацию и является одним из базовых антифрикционных материалов отраслей гидроэнергетики и водного транспорта для изготовления узлов трения механических устройств гидросооружений России и ближнего зарубежья, а также других партнеров в области эксплуатации действующих и строительства новых электростанций различных типов.

Базовым специализированным оборудованием для проведения междуведомственных испытаний материала К-112 стал, разработанный «ОКТБ «Орион» стенд-имитатор, получивший после модернизации название «Универсальная стендовая установка трения УСУТ-2» (далее -УСУТ-2).

Стенд и методика исследований

Стенд УСУТ-2, в значительной степени имитирующий работу опорно-ходовых устройств, то есть реального узла трения механического оборудования гидротехнического сооружения, проектировался и доводился до требуемых параметров для решения достаточно узкой, но значимой задачи – создания антифрикционных полостей скользящих затворов, являющихся в паре с рельсом испытываемым узлом трения.

Мощные габариты стенда, тяжелонагруженные узлы трения, жесткие условия испытаний диктовали такие же жесткие требования к создаваемому материалу. Этот перманентный процесс взаимных требований и многочисленных трибоисследований завершился разработкой и материала К-112, и стенда УСУТ-2. Можно сказать, что в основе создания материала К-112 лежит метод триботехнических исследований, который является одним из основ при разработке антифрикционных самосмазывающихся материалов в «ОКТБ «Орион».

Стремление, в значительной степени имитировать реальный узел, привело к тому, что в кинематику стенда был встроено более, чем метровый участок стандартного цилиндрического рельса, используемого в мехоборудовании гидросооружений, который в паре с фрагментами вкладыша из материала К-112, создавал опорно-ходовое устройство–испытываемый узел трения. Систему нагружения в стенде УСУТ-2 создает 100 тонный пресс, который в паре с 8-ми киловатным приводом рельса очерчивает значительные габариты стенда, его первоначально высокую энергоемкость и низкую рентабельность в эксплуатации.

«ОКТБ «Орион», являясь разработчиком и поставщиком материала АСМК-112, используя стенд по его прямому назначению, осуществило дооснащение стенда УСУТ-2, который оказался в настоящее время единственным в РФ полигоном для испытания реальных узлов трения механического оборудования гидросооружений. За счет частотного регулирования удалось значительно понизить энергоемкость оборудования, а введение современной методологии исследований позволило расширить число пользователей.

Функциональная схема станда УСУТ-2, в значительной степени имитирующего работу опорно-ходовых устройств водопроводных галерей гидросооружений, представлена на рис. 1.

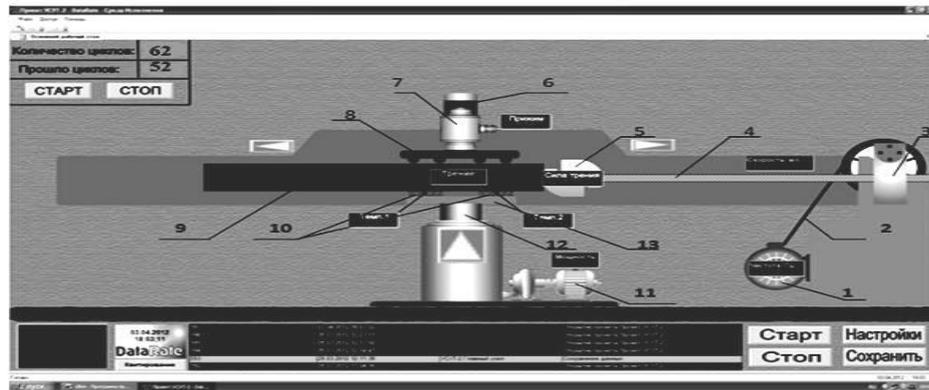


Рис.1 - Функциональная схема станда УСУТ-2

Работа установки осуществляется следующим образом. Вращательное движение от электродвигателя 1, клиноременную передачу 2, червячный редуктор 3, червячное колесо которого имеет резьбовую нарезку, соответствующую резьбе винта 4, преобразуется, через датчик измерения силы трения 5, в поступательное движение плиты 9 с закрепленным на ней рельсом, являющимся контртелом пары трения. Испытываемые фрагменты вкладыша 10 в количестве двух штук установлены в держателе 13. Нагрузка на фрагменты вкладыша создается электродвигателем 11 масляной станции пресса ПСУ-125, на нижней плите 12 которого на сферической опоре установлен держатель, а к верхней плите 6 через датчик измерения усилия нагружения 7 прикреплена роликовая тележка 8. Ролики тележки опираются сверху на плиту 9, и перекатываются по ней в процессе движения рельса под нагрузкой. Для проведения испытаний в водной среде и в среде других технических жидкостей, установлена ванна из нержавеющей стали, при наполнении которой происходит полное погружение зоны трения в требуемую среду.

Линейный износ в зоне трения определяется с помощью тензометрической системы и фиксируется на экране регистратора, а также на дисплее оператора в составе соответствующего тренда.

Возвратно-поступательное движение рельса осуществляется за счет реверса электродвигателя 1 с помощью векторного частотного преобразователя, который кроме того, позволяет регулировать скорость скольжения в широком диапазоне, производить эффективное торможение и плавный разгон рельса при смене направления движения, что значительно снижает нагрузки на двигатель.

Регулировка и регистрация нагружения испытываемых фрагментов вкладышей осуществляется через контроллер, аналогово-цифровой преобразователь и датчик измерения усилия нагружения 7, связанные с рабочим местом оператора станда. Регистрация силы трения скольжения в исследуемой паре трения фрагменты вкладыша – рельс осуществляется с помощью датчика 5. Внешний вид станда УСУТ-2 показан на рис.2.

В реальных узлах трения в качестве скользящих направляющих применяются, в большинстве случаев, вкладыши из фторопластовой композиции Ф4К20 (при нагрузках до 15МПа), а в тяжело нагруженных (до 60 МПа) – из антифрикционного материала АСМК-112, которые с помощью крепления «ласточкин хвост» набираются на необходимую (на несколько метров) длину. Сопрягаемым элементом в реальном узле является рельс цилиндрический из легированной стали 12Х18Н10Т. Устанавливаемые на затворах гидросооружений вкладыши из разработанного и выпускаемого «ОКТБ «Орион» материала АСМК-112 и участки цилиндрических рельсов, а также участок плоского универсального рельса показаны на рис.3.



Рис. 2. Общий вид стеновой установки УСУТ-2

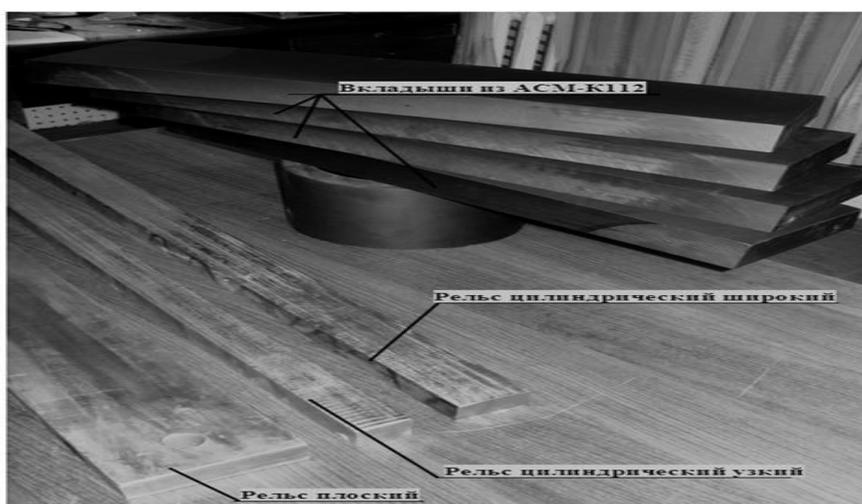


Рис.3 Вкладыши из материала АСМК-112 и участки цилиндрических рельсов.

На стенде имитаторе при схеме трения цилиндр – плоскость, предусмотрена установка участка реального цилиндрического рельса. Стыки цилиндрических рельсов при монтаже затворов подвергаются сварке, что создает дополнительные неровности поверхности трения, даже после зачистки сварочных швов. Профиль рельса на испытательном стенде имитирует эти неровности за счет уступов в 0,5мм, зашлифованных плавно на длине 200мм. Узкий рельс имеет ширину 35мм при радиусе кривизны рабочей поверхности 200мм, широкий рельс - 55мм при радиусе кривизны рабочей поверхности 300мм, универсальный плоский рельс - шириной 100мм.

Рабочая среда: воздух - пресная техническая вода. Скорость скольжения при возвратно - поступательном движении, м/с - (0,01-0.03).

Распределенная нагрузка на цилиндрический узкий (широкий) рельс составляет:

- при редком маневрировании 1400 (2000) кН/м;
- при частом маневрировании 800 (1200) кН/м;
- на всех аварийных и ремонтных затворах 2000 (3000) кН/м.

Триботехнические исследования антифрикционных материалов на испытательном комплексе УСУТ-2 выполняются в соответствии с программами и методиками, предусматривающими необходимый объем контрольных и ресурсных испытаний, в значительной степени отвечающих требованиям отраслевого стандарта СТБ 00117794-2-11-

95, и являющихся необходимыми при выдаче рекомендаций об использовании материала в гидротехнической отрасли.

В кратком изложении, испытания по определению коэффициента трения при страгивании, кинетического коэффициента трения и износостойкости осуществлялись по следующей методике.

На нерабочей поверхности фрагментов вкладышей наносилась разметка, обозначающая расположение точек замера высоты фрагментов вкладышей. С помощью оптиметра и набора концевых мер, производился замер высоты фрагментов вкладышей с точностью до 0,001мм. На стенд устанавливался широкий или узкий рельс из стали 12Х18Н10Т, а в держатель устанавливались два замеренных фрагмента вкладыша. Системой нагружения стенда фрагменты вкладыша подводились к рельсу до соприкосновения и в ванну стенда заливалось необходимое количество воды, уровень которой должен быть выше контакта образцов с рельсом.

Оператором стенда в программе аппаратно-программного комплекса задавались необходимые параметры и производился запуск программы на испытания. Системой нагружения стенда на фрагментах вкладыша создавалось удельное давление 100кН/м, включался привод возвратно-поступательного движения рельса и регистрировались сила трения, коэффициент трения при страгивании и кинетический коэффициент трения, путь трения, линейный износ пары трения и температура окружающей среды и в зоне трения. После прохождения пути трения 10м, удельное давление на образцах увеличивалось.

Испытания повторялись при удельных нагрузках 500 кН/м, 2000 кН/м, после чего из ванны стенда сливалась вода и испытания повторялись при выше указанных нагрузках всухую.

После испытаний повторно замерялись размеры образцов, и определялся их линейный износ. То есть, автоматическая фиксация линейного износа на экране регистратора и на одном из открываемых на экране компьютера трендов, включающая упругую и деформационную составляющие, дублировались ручным замером испытуемых образцов и вычислением величины износа по завершению испытаний с учетом релаксационных процессов.

По описанной выше методике испытаниям подвергался материал, прошедший предварительный отбор на экспресс-трибометре УСУТ-2-УЛ, входящем в состав стенда УСУТ-2.

Экспресс - трибометр УСУТ-2-УЛ оснащен автоматизированным приводом с частотным регулированием линейной скорости, с системой мониторинга трибоисследований с программным обеспечением, совместимым с программой базового УСУТ-2. Необходимость экспресс-трибометра обуславливалась на порядок меньшими материальными и временными затратами в сравнении с базовыми стендовыми, особенно при наличии нескольких композиций или типов материалов. При этом, объектом испытаний является стандартный образец для определения разрушающего напряжения при сжатии, входящий в комплект обязательных образцов для проведения дальнейших исследований.

Экспресс-трибометр УСУТ-2-УЛ (рис.4) представляет собой возвратно-поступательную машину трения, используемую для ускоренной предварительной оценки триботехнических свойств материалов и покрытий, включает в себя следующие основные узлы и комплектующие:

- механизм нагружения, представляющий собой систему рычагов, усиливающих приложенную набором гирь нагрузку и передающих её на образец для обеспечения требуемых удельных давлений в зоне трения;

- опорно-ходовой узел трения, состоящий из движущейся каретки, с установленным в ней контртелом, изготовленным, для настоящих условий, из материала сталь 12Х18Н10Т и держателя с неподвижно устанавливаемым образцом из испытываемых антифрикционных композиционных материалов;

- автоматизированный привод, обеспечивающий возвратно-поступательное движение опорно-ходового узла;
- система мониторинга трибоиспытаний;
- компьютерное место оператора узла испытаний с программным обеспечением.



Рис.4 Экспресс-трибометр УСУТ-2-УЛ

Результаты эксперимента.

Результаты испытаний показали перспективность применения экспресс-трибометра УСУТ-2-УЛ в составе испытательного комплекса УСУТ-2 на этапе предварительного подбора материала. На рис.5 представлен фрагмент с экрана монитора, отражающий промежуточную информацию о проводимом исследовании на конкретный, указанный на этом же снимке, момент времени. По числу окон и табло (их в данном случае с учетом дублирования -18) и объему показателей, отражающих эту информацию в режиме реального времени, можно судить о широких функциональных возможностях методологии испытаний, предусматривающей, в том числе, возможность посекундного архивирования. На основании сравнительных экспресс-испытаний появляется очевидная и достаточная информация о предпочтительном, по антифрикционным характеристикам, материале для проведения дальнейшего исследования на основном стенде.

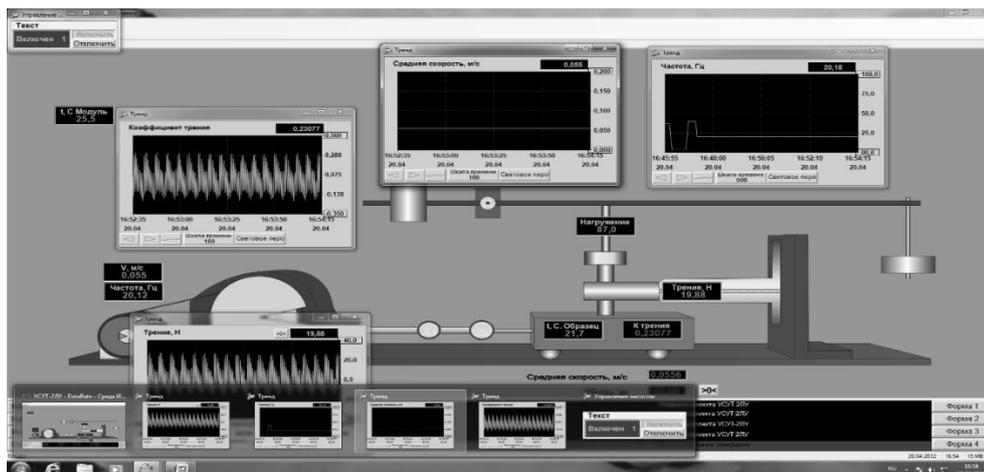


Рис. 5 Графический интерфейс экспресс-трибометра УСУТ-2–УЛ.

Результаты испытаний лучшего, по результатам экспресс-анализа, материала фиксируются по аналогичной программе. На рис. 6 графический интерфейс вывел момент проведения ресурсных испытаний экспериментального образца перспективной полимерной композиции, на котором открыты окна для отображения текущих показаний датчиков на реальные дату и момент времени. Каждое окно озаглавлено по значению

регистрируемого параметра (по вертикальной оси) и имеет размерность в соответствующих абсолютных единицах измерения. При этом в каждом окне регистрируются изменения характеристик во времени (по горизонтальной оси). В данном случае, для простоты и надежности, время выбрано для всех окон одинаковым – 3600 секунд.

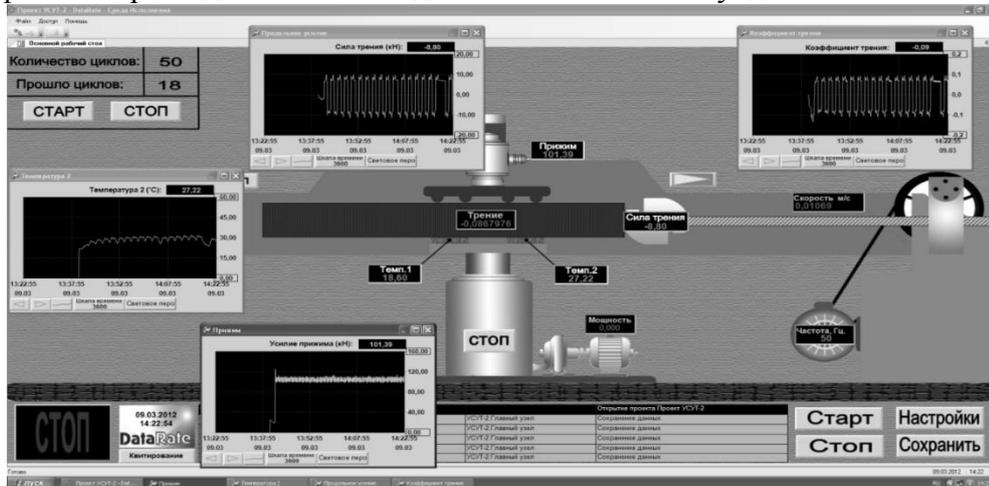


Рис. 6 Фрагмент ресурсных испытаний с узким рельсом.

По открытым четырем из семи доступных окнам и дополнительной информации на дисплее очевиден следующий объем информации:

- температура окружающей среды $18,6^{\circ}\text{C}$, в зоне трения $27,2^{\circ}\text{C}$, при линейной скорости $0,011\text{ м/с}$;
- выполнено 18 из 50-и заданных циклов испытаний, то есть пройдено восемнадцать из требуемых в данном отрезке испытаний пятидесяти метров пути трения одного;
- усилие прижима (нормальное давление) в зоне трения составляло $101,39\text{ кН}$;
- сила трения рельса при движении по испытываемому объекту находилась в пределах $8,8\text{ кН}$ для кинетического трения и $10,3\text{ кН}$ при страгивании;
- коэффициенты трения при страгивании до $0,11$, кинетического – до $0,08$.

Цена деления шкал варьируется оператором в широком диапазоне таким образом, чтобы наилучшим образом выявить динамику процессов, происходящих при испытаниях в трибосопряжении. Причем этот анализ трибоиспытаний программа позволяет производить и с заархивированным массивом.

Применяемое в УСУТ-2 Программное обеспечение HMI-DataRate двух совместимых версий обеспечивают широкий спектр действий с заархивированным массивом в виде таблиц, графиков и объемных диаграмм.

Выводы.

1 Уникальная установка трения УСУТ-2, оснащенная современными методами исследования трибопроцессов, дает возможность достижения значимых научных результатов в области антифрикционного материаловедения и трибологии, проведения междисциплинарных исследований для широкого диапазона материалов. Уникальность УСУТ-2 проявляется также в отсутствии аналогов в Российской Федерации, востребованности со стороны научного сообщества, экономической нецелесообразности создания аналогичных образцов. Исследовательский комплекс УСУТ-2 внесен в перечень Минобрнауки «Уникальные научные установки» РФ.

2 АО «ОКТБ «Орион» предоставляет инженеринговые услуги по проведению триботехнических испытаний антифрикционных материалов на универсальной стендовой установке УСУТ-2 в соответствии с требованиями отраслевого стандарта СТП 00117794-2-11-95, с выдачей заключения о возможности использования исследуемых композитов в узлах трения гидротехнических сооружений.

УДК 621.892

ВЛИЯНИЯ ФРИКЦИОННОГО НАГРЕВА И НАПОЛНЕНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНАЕ. Б. Седакова^{1,2}, Ю. П. Козырев¹*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия¹**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого Санкт-Петербург, Россия²*

Известно, что для повышения износостойкости в полимерные материалы вводят различные типы дисперсных и волокнистых наполнителей. Однако улучшение триботехнических свойств не определяется каким-то одним фактором. Так, в результате сравнительных исследований пленок переноса ПТФЭ и наполненных материалов на его основе, в [1] показано, что пленки, включающие частицы наполнителя, имеют большую адгезию к контртелу и поэтому в меньшей степени подвергаются износу. С другой стороны структуры, образованные наполнителем воспринимают значительную часть внешней нагрузки, разгружая, таким образом, полимерную матрицу, что также способствует снижению износа материала [2]. Процессы взаимодействия матрицы и наполнителя имеют сложный характер и не до конца изучены. Например, исследователи и конструкторы не всегда обращают внимание на физическое состояние, в котором находятся полимер и полимерный композит в диапазоне эксплуатационных параметров. В то же время при различных физических состояниях полимера происходит существенное изменение подвижности звеньев полимерных цепей, что может приводить к изменению адгезионного взаимодействия контртел в трибосопряжении.

ПТФЭ имеет температуру стеклования порядка минус 123 °С и поэтому при эксплуатации в узлах трения он уже находится в высокоэластическом физическом состоянии, что может определять его низкую износостойкость. С другой стороны, в [3] показано, что введение в полимерные материалы наполнителей приводит к существенному повышению температуры стеклования композита. В данной работе рассмотрено влияния фрикционного нагрева и наполнения на изменения физических состояний ПТФЭ и композита Ф4К20 на его основе, а также исследовалось влияние этих состояний на износостойкость. Для возможности сравнительного анализа дополнительно испытывался на износ по однотипной схеме с регистрацией температуры фрикционного нагрева полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), имеющий температуру стеклования ≈ 143 °С.

Испытания материалов на износ проводились на трибометре, подробно описанном в [4] по схеме кольцо - плоскость. Исследовались образцы трех материалов: полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), политетрафторэтилен (ПТФЭ) и композит Ф4К20 (ПТФЭ+ 20 об. % кокса). Контртело из стали 45 ГОСТ 1050-88 в форме кольца диаметром 10×8 мм контактировало с полимерным образцом, изготовленным в виде параллелепипеда размером 20×20 мм и высотой 6 мм. Путь трения L_{TP} во всех экспериментах составлял 1000 м. При испытаниях материалов внешняя нагрузка в виде произведения контактного давления p и скорости скольжения v варьировалась в диапазоне 0,1-5 МПа × м/с. Износ определялся в конце испытаний по измерению потери массы образца и, затем, рассчитывался объемный износ ΔV образцов и коэффициент износа K по известной формуле. В конце каждого испытания осуществлялся контроль температуры измерением ее в центре боковой поверхности образца с помощью инфракрасного термометра UT 302 С. Коэффициент трения f рассчитывался по изменению величины тока электродвигателя [5].

Для оценки физического состояния полимерного материала, при котором происходит трение и износ, определялась температура в зоне фрикционного контакта по методике, описанной в [6]. Для этого сначала определялась поверхностная температура полимерного образца, а затем рассчитывалась средняя поверхностная температура источника фрикционной энергии. Так как размер источника фрикционного нагрева был существенно меньше грани образца, для расчета поверхностной температуры можно рассматривать вариант методики, когда в квазистационарном режиме фрикционная мощность равномерно распределяется по всему полимерному образцу. При этом расчетный нагрев поверхности образца Δt_p имеет одинаковую величину для всех граней параллелепипеда. При этом допущении для расчета поверхностной температуры можно использовать формулу Ньютона

$$\Delta t_p = t_s - t_c = \frac{P}{\alpha_K S}, \quad (1)$$

где P – мощность сил трения, поступающая в полимерный образец; α_K – коэффициент теплоотдачи; S – площадь поверхности образца; t_s – температура грани образца; t_c – температура окружающей среды.

Для оценки величины α_K воспользуемся данными, приведенными в [6], где для ламинарной конвекции найдено, что α_K находится в пределах от 5 до 10 Вт/(м² град). В данной работе принята $\alpha_K = 8$ Вт/(м² град).

Величина P определяется по соотношению

$$P = (1 - K_T) f p v S_H, \quad (2)$$

где K_T – коэффициент распределения тепловых потоков; f – коэффициент трения; p – контактное давление; v – скорость скольжения; S_H – номинальная площадь контакта.

Для определения величины K_T воспользуемся формулой Шаррона [7]

$$K_T = \frac{\sqrt{\lambda \rho c}}{\sqrt{\lambda \rho c} + \sqrt{\lambda_1 \rho_1 c_1}}, \quad (3)$$

где λ и λ_1 – теплопроводности; ρ и ρ_1 – плотности; c и c_1 – теплоемкости металлического контртела и полимерного материала соответственно.

Подставляя (2) и (3) в (1) найдем величину Δt_p для различных величин $p v$. После определения поверхностных температур перейдем к рассмотрению температурного поля образца создаваемого плоским прямоугольным источником энергии со сторонами l_1 и l_2 , расположенным на грани полимерного образца с координатой $z=0$ (рис. 1). Этот источник моделирует тепловой поток от зоны трения в образец. Полагая, что на всех гранях температура постоянна и равна t_s , найдем сопротивление R тепловому потоку, распространяющемуся от источника до поверхности образца

$$R = \frac{t_{\text{нб}} - t_s}{P}, \quad (4)$$

где t_{cp} – средняя поверхностная температура источника; t_s температура на гранях образца.

Принимая за средний размер полимерного образца L линейный размер грани, на участке которой происходит фрикционный контакт, среднюю поверхностную температуру источника энергии можно найти из соотношения [6]

$$t_{\text{нб}} = \frac{P \varphi}{\lambda L} + t_s = \frac{P \varphi}{\lambda L} + \Delta t_p + t_c, \quad (5)$$

где φ – специальная функция.

Величина φ определяется по номограммам, приведенным в работе [6] .

Результаты исследования износостойкости ПЭЭК с данными измерения температуры приведены в табл 1.

Таблица 1. Величины коэффициента трения f , расчетной температуры на поверхности трибоконтакта t_k , коэффициента износа K , расчетные величины нагрева поверхности Δt_p , экспериментально полученных величины нагрева поверхности $\Delta t_{\text{э}}$ в зависимости от мощности сил трения для ПЭЭК.

Параметр	Мощность сил трения P , Вт				
	0,09	0,11	0,14	0,26	0,32
Коэффициент трения, f	0,24	0,19	0,10	0,3	0,3
Расчетная температура на поверхности трибоконтакта t_k , $^{\circ}\text{C } t_k=(t_{cp}+\Delta t_p+t_c)$	64,2	74,3	84,9	142,1	170,8
Коэффициент износа, K , м ³ /Нм $K=(\Delta V/FL_{mp})$	$7,6 \cdot 10^{-15}$	$1,0 \cdot 10^{-14}$	$4,1 \cdot 10^{-15}$	$2,0 \cdot 10^{-13}$	$6,4 \cdot 10^{-13}$
Экспериментально полученный нагрев поверхности, образца $\Delta t_{\text{э}}$, $^{\circ}\text{C}$	8,1	11,1	12,8	25,5	—
Расчетный нагрев поверхности образца, Δt_p , $^{\circ}\text{C}$	9,2	11,3	14,0	27,3	33,4

Примечание: F -нагрузка, Н.

Из данных таблицы 1. следует, что при достижении в зоне трибоконтакта температуры близкой к температуре стеклования ПЭЭК резко возрастает износ полимера. При этом происходит периодическое схватывание контактирующих тел. Это говорит о том, что при переходе полимера в высокоэластическое состояние происходит резкое увеличение адгезии между контактирующими телами в паре трения. Таким образом, данные испытаний материала ПЭЭК показывают справедливость методики тепловых расчетов приведенной выше, так как расчетные значения поверхностной температуры близки к значениям, полученным экспериментальным путем, а полученная расчетная величина температуры стеклования практически совпадает со справочными данными.

Зависимости f от pv для других испытуемых материалов приведены на рис. 1. Эти данные используются при расчете мощности сил трения по (2)

Из данных рис. 1 видно, что материал Ф4К20 с матрицей из ПТФЭ имеет более низкий коэффициент трения, чем чистый ПТФЭ практически во всем исследуемом диапазоне pv .

Далее рассмотрим зависимости K от температуры. Для определения температур полимерных образцов, при которых происходят физические переходы по формальным признакам можно соотнести величины K с температурой на поверхности трибоконтакта. Эти результаты приведены на рис. 2.

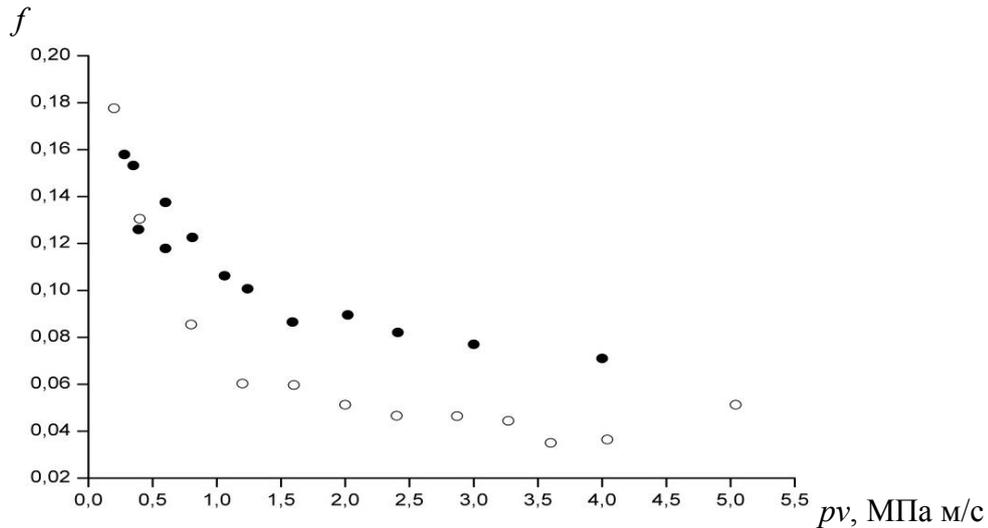


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения по стали 45 ПТФЭ (●) и Ф4К20 (○) от величины pv .

Из рис. 2 а) видно, что резкое возрастание величины K материала ПТФЭ наблюдается в диапазоне температур $t_k=250\div 300^{\circ}\text{C}$. При таких температурах обычно происходит размягчение ПТФЭ вызванное приближением к температуре плавления кристаллитов равной 327°C .

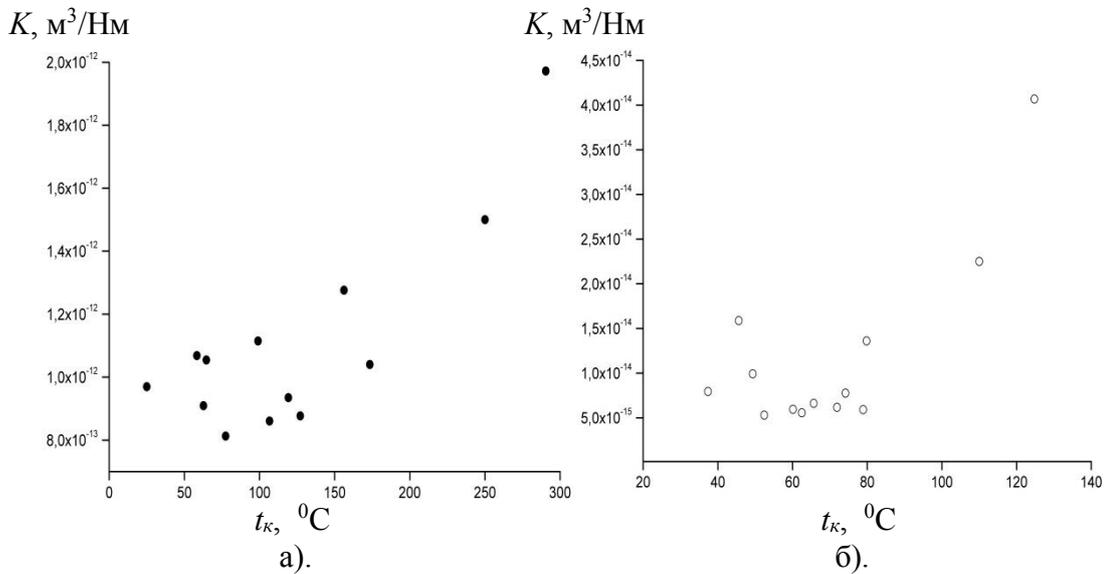


Рис. 2. Зависимость K от температуры на поверхности трибоконтакта: а). ПТФЭ (●); б). Ф4К20 (○)

Из рис. 2 б) видно, что для Ф4К20 резкое возрастание величины K происходит при $t_k = 110\div 124^{\circ}\text{C}$. Это, по-видимому, связано с переходом Ф4К20 от стеклообразного состояния к высокоэластическому, то есть этот диапазон температур близок к температуре стеклования Ф4К20. Таким образом, на износостойкость полимерных материалов существенное влияние оказывает физическое состояние полимерного материала и его композита.

Библиографический список

1. Bahadur S., Tabor D. The wear of filled polytetrafluoroethylene// Wear. 1994. V. 98. P. 1-13.

2. **Козырев Ю.П., Седакова Е.Б.** Влияние особенностей структуры композиционных материалов на основе политетрафторэтилена на снижение нагруженности матрицы// Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. N. 2. С. 40-45.

3. **Адаменко Н.А., Казуров А.В., Зарщиков К.Ю., Седов Э.В.** Исследование влияния наполнителя на трибомеханические свойства полиэфирэфиркетона. Известия ВолгГТУ. 2010. №4 (64). С. 52-54.

4. **Козырев Ю.П., Седакова Е. Б.** Метод определения допустимых нагрузок при трении с использованием эмпирического закона изнашивания.// Вестник машиностроения. 2007. N. 6. С. 44-46.

5. **Седакова Е.Б., Козырев Ю.П.** Инженерная методика оценки поверхностной температуры полимерного элемента узла трения// Труды IV Международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении». Том III / под ред. В.В. Максарова. – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2016.– 159 с. С. 122-125.

6. **Дульнев Г.Н, Семяшкин Э.М.** Теплообмен в электронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968. - 360 с.

7. **Амосов А.П.** Элементарные теплофизические модели трения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, № 4(3) С. 656 – 662.

8. **Михайлин Ю.А.** Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. С.Пб.: Профессия, 2006. -624 с.

Bibliography:

1. **Bahadur S., Tabor D.** The wear of filled polytetrafluoroethylene// Wear. 1994. v. 98. p.p. 1-13.

2. **Kozyrev, Yu.P. and Sedakova, E.B.,** The effect of the structural features of polytetrafluoroethylene-based composites on the reduction of matrix loading, J. Mach. Manuf. Reliab., 2010, vol. 39, no. 2, p.p. 131-135.

3. **Adamenko N.A., Kazyrov A.V., Zarshicov K.Yu., and Sedov E.V.** Issledovanie vliyaniya napolnitelya na tribomechnicheskiye svoystva polyetheretherketone. Isvestiys VolgGTU. 2010. N. 4 (64). p.p. 52-54.

4. **Kozyrev, Yu.P. and Sedakova, E.B.,** Method for determining the allowable loads in friction with the use of an empirical wear law, Russ. Eng. Res., 2007, vol. 27, no. 6, pp. 350–353.

5. **Sedakova, E.B., and Kozyrev, Yu.P.,** The influence of alloying elements on expansion of the working loadings range of the friction pair polytetrafluoroethulene – steel, Proceeding IV International Conference «Innovatsii na transporte I v mashinostroenii». V. III . pod red. V.V. Macsarov.- St. Petersburg: Nashional mineral'no syr'evoy university «Gornyy», 2016. – 159 p. , p.p. 122-125

6. **Dul'vev, G.N., Semyashkin E.M.** Teploobmen v radioelektronnoi apparature (Heat Transfer in electronics), Moscow: Energiya, 1968.-360 p.

7. **Amosov, A.P.,** Elementary Tegako physical models of friction, Izv. Samar. Nauch. Tsentra, Ross. Akad. Nauk, 2011, vol. 13, no. 4 (3), pp. 656–662.

8. **Mikhailin Yu.A.** Termoustoichevye polymery I polymernye materialy. St. Petersburg: Professiya, 2006. -624 p.

УДК 621.001.4

ИСПЫТАНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА МИКРОАБРАЗИВНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

П.А. Тополянский, С.А. Ермаков, А.П. Тополянский
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
ООО «Плазмацентр»*

Микроабразивное изнашивание - это процесс разрушения деталей, работающих в условиях трения скольжения или качения, при наличии в контакте трущихся поверхностей незакрепленных абразивных частиц с размером менее 100 мкм и твердостью, большей твердости материалов трибосопряжений. Данный вид изнашивания испытывают, например, открытые подшипники скольжения, направляющие станков, шестерни открытых передач и редукторов, шарнирные соединения цепей различных машин и т.п. Кроме этого, в связи с образованием продуктов износа, участвующих в процессах трения, возможности коксования масла, попадания абразивных частиц в смазку при нарушении герметичности смазочной системы, практически все поверхностные слои трибосопряжений также находятся под воздействием микроабразивного изнашивания. Изучение этого вида изнашивания является актуальным для деталей и инструмента с износостойкими тонкопленочными покрытиями, осаждаемыми с использованием PVD и CVD процессов, при выборе оптимального технологического режима нанесения одного и того же материала покрытия и при исследовании влияния химического состава, вида и физико-механических свойств различных покрытий. Для испытаний на микроабразивное изнашивание таких покрытий разработан международный стандарт EN 1071-6:2007. За рубежом данный вид испытаний является наиболее часто используемым для оценки трибологических свойств покрытий, наряду с процессами индентирования и испытаниями на трение [1].

Определение параметров износа в условиях микроабразивного изнашивания основано на микроскопическом измерении отпечатка, полученного при точечном контакте двух сопряженных тел – свободно вращающегося стального шара и неподвижного плоского образца с покрытием (или без покрытия) при наличии в зоне трения абразивосодержащей суспензии. Необходимым условием измерений является четкое изображение отпечатка износа и контраста покрытия и подложки, определяемые шероховатостью образца с покрытием. Испытания осуществляются в условиях наклонного расположения образца и прижатия к нему шара за счет собственной массы. Наличие определенного количества абразивосодержащей суспензии в зоне трения шара с образцом обеспечивает быстрое получение отпечатка с износом покрытия и подложки. Нагрузка в зоне контактного трения является постоянной величиной при использовании одинаковых шаров (размеров, параметров шероховатости и материала) и их позиционирования относительно испытуемого образца. Условия износа образцов являются одинаковыми при постоянстве шаров, скорости вращения приводного вала, времени испытаний, использования одной и той же абразивосодержащей суспензии и постоянного количества или скорости её ввода.

Принцип микроабразивного изнашивания состоит в воздействии когезионно-прочных абразивных частиц микронного размера, содержащихся в абразивосодержащей суспензии, которые находятся в зазоре между двумя поверхностями в процессе трения. При этом они производят резание контактирующих поверхностей, действуя как абразивный инструмент. В условиях вращения шара с большим диаметром относительно неподвижного образца с покрытием абразивные частицы удаляют с испытываемого образца выступы шероховатости и само покрытие на точечной поверхности, полируя и выглаживая ее, с образованием сферического сегмента износа.

Оборудование для определения параметров износа с использованием испытаний на микроабразивное изнашивание состоит из триботестера Tribotester PC102 (изготовитель

ООО «Плазмацентр»), с комплектом шаров, микроскопа, компьютера, эталонной меры малой длины, соединительных проводов и программного обеспечения (рис. 1-3).

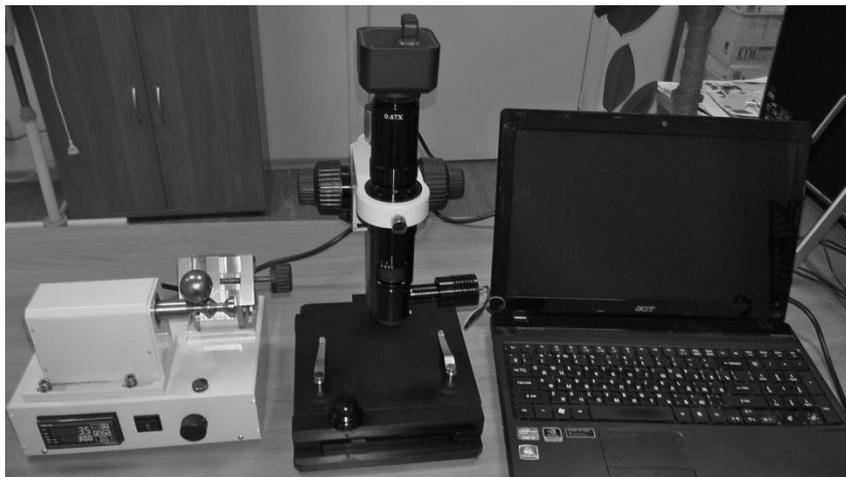


Рис. 1 - Общий вид оборудования для испытаний на микроабразивное изнашивание



Рис. 2 - Вид триботестера после установки шара

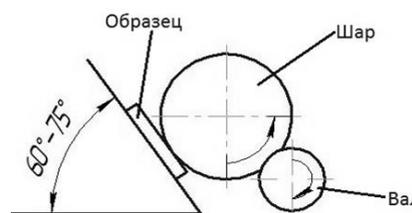


Рис. 3 - Схема расположения образца относительно шара и приводного вала

Триботестер предназначен для осуществления позиционирования шара и его вращения с заданной скоростью относительно установленного образца с покрытием (или без него) в течение заданного времени испытаний, а также для возможности переустановки образца с целью его замены или получения нового отпечатка на заданной поверхности. Основными элементами триботестера являются: основание с панелью управления, устройство крепления приводного вала, регулируемый предметный стол с тисками, электродвигатель постоянного тока, частотный преобразователь, счетчик-таймер, элементы управления. Испытываемый образец устанавливается неподвижно перпендикулярно плоскости вращения шара на опорные поверхности губок тисков. На панели управления триботестера устанавливаются два параметра - скорость вращения приводного вала и длительность испытаний.

Для визуализации зоны истирания используется моновидеомикроскоп с трансфокатором высокого разрешения, с держателем грубой и точной фокусировки, основанием, предметным столом с микроподвижками. С целью передачи изображения объекта исследования на компьютер применяется цифровая окулярная USB видеокамера. По USB-кабелю изображение передается с микроскопа на компьютер, где его можно рассматривать, проводить измерения, а также сохранять в виде графических файлов. На компьютере устанавливается программа визуализации микроскопического изображения и определения геометрических размеров отпечатков.

Основными (переменными, заменяемыми) компонентами испытаний являются шары и абразивосодержащая суспензия. Шары, в основном, используются из производства подшипников качения. Материал шаров - термообработанная сталь ШХ15, твердость 60-62 HRC. Параметр шероховатости поверхности шаров $R_a=0,1$ мкм. Диаметр шара – 30 мм. В

качестве абразивосодержащей суспензии используется суспензия на водной основе с монокристаллами синтетического алмаза диаметром 1 мкм (или на основе электрокорунда). Во время проведения испытаний подача суспензии в зону трения является строго дозированной и повторяемой в заданном временном интервале.

Для измерений используются плоские образцы с покрытием, нанесенным на торцевую поверхность. Размеры образцов ограничиваются размерами губок тисков триботестера - до 30 мм в ширину, до 40 мм в длину, до 10 мм в высоту. Рекомендуемый параметр шероховатости образцов с покрытием $R_a \leq 0,32$ мкм. Неплоскостность торцевых поверхностей образца не должна превышать 0,05 мкм. Рекомендуемая толщина покрытия > 1 мкм.

Длительность испытаний определяется получением глубины кратера износа большего, чем толщина покрытия. Оценка параметров износа возможна также для толстых покрытий (глубина отпечатка меньше толщины покрытия) и для монолитного материала, например, подложки.

Основополагающим для воспроизводимости испытаний является постоянство следующих параметров:

- угла наклона поверхности образца к горизонту (порядка 60-75°), оптимального расположения шара относительно приводного вала (ось приводного вала должна быть параллельна поверхности образца);

- нормальной нагрузки свободно лежащего шара к поверхности образца N [Н], определяемой расчетным путем в зависимости от массы конкретно используемого шара, его расположения относительно приводного вала и испытуемого образца, а также коэффициентами трения между шаром с поверхностью образца и поверхностью приводного вала. Для образца, расположенного под углом 60-75° к горизонтальной поверхности, нормальная нагрузка стального шара диаметром $D_{\text{шар}} = 30$ мм составляет 0,25 Н;

- круговой скорости вращения вала $n_{\text{вал}}$ [об/мин];

- круговой скорости вращения шара $n_{\text{шар}}$ [об/мин], определяемой из зависимости $n_{\text{шар}} = n_{\text{вал}} \cdot d_{\text{вал}} / D_{\text{шар1}}$, где $d_{\text{вал}}$ – диаметр вала в точках касания шара, $D_{\text{шар1}}$ – диаметр сечения шара, в точках соприкосновения с валом;

- времени испытаний $t_{\text{исп.}}$ [с] (принимается на основании тестовых испытаний или знаний конкретных свойств покрытий);

- длины пути скольжения шара относительно плоскости образца $S = t_{\text{исп.}} \cdot n_{\text{шар}} \cdot \pi \cdot D_{\text{шар}}$, где $t_{\text{исп.}}$ - время испытаний [мин], $n_{\text{шар}}$ - круговая скорость шара [об/мин], $D_{\text{шар}}$ - диаметр шара [мм].

Основными измеряемыми параметрами на отпечатке являются: $b_{\text{пар}}$, $b_{\text{перп}}$, $a_{\text{пар}}$, $a_{\text{перп}}$ (рис. 4).

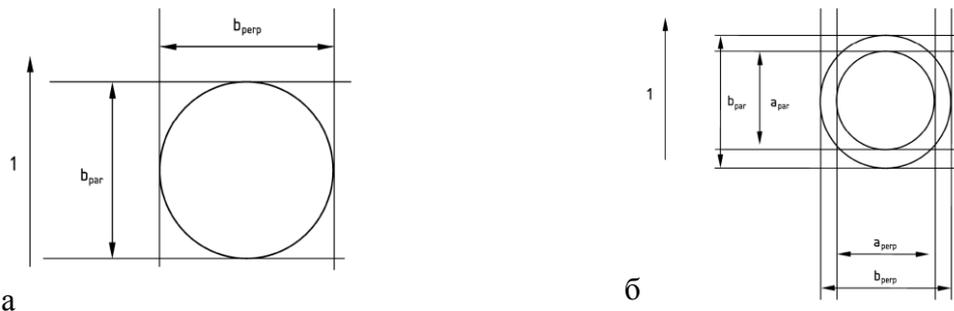


Рис. 4 - Измеряемые параметры: а - для монолитного материала (подложки или толстых покрытий), б - для тонкопленочных покрытий, где 1 - направление вращения шара

Основными расчетными параметрами при испытаниях на микроабразивное изнашивание принимаются:

- для образцов основного материала (подложки) без покрытий (образцов с покрытием при глубине отпечатка меньше толщины покрытия): объемный износ подложки

$$Vs = \pi \frac{b^4}{64R} [\text{мм}^3]$$

или объемный износ покрытия при глубине отпечатка меньше толщины покрытия

$$V_c = \pi \frac{b^4}{64R} [\text{мм}^3],$$

где R - радиус используемого шара, b - среднее значение диаметров отпечатка подложки $b_{\text{ираг}}$ и $b_{\text{ирер}}$

$$b = (b_{\text{ираг ср}} + b_{\text{ирер ср}})/2$$

- для образцов с покрытием (глубина отпечатка больше толщины покрытия):

объемный износ покрытия

$$V_c \approx \frac{\pi}{64R} (b^4 - a^4) [\text{мм}^3],$$

объемный износ подложки (с учетом их совместного влияния)

$$V_s \approx \frac{\pi a^4}{64R} [\text{мм}^3],$$

сумма объемного износа покрытия и подложки $V_c + V_s$ [мм³],

где a - среднее значение диаметра покрытия $a_{\text{ираг ср}}$ и $a_{\text{ирер ср}}$

$$a = (a_{\text{ираг ср}} + a_{\text{ирер ср}})/2,$$

Вспомогательными расчетными параметрами являются:

- коэффициент износа подложки - отношение объемного износа подложки к длине пути скольжения и нормальной нагрузке

$$K_s = \pi \frac{b^4}{64RSN} [\text{м}^3\text{Н}^{-1}\text{м}^{-1} \text{ или } \text{мм}^3/\text{Нмм}],$$

где S - длина пути скольжения, N - нормальная нагрузка к поверхности образца;

- коэффициент износа покрытия при глубине отпечатка меньше толщины покрытия - отношение объемного износа подложки к длине пути скольжения и нормальной нагрузке

$$K_c = \pi \frac{b^4}{64RSN} [\text{м}^3\text{Н}^{-1}\text{м}^{-1} \text{ или } \text{мм}^3/\text{Нмм}];$$

- коэффициент износа покрытия при глубине отпечатка больше толщины покрытия

$$K_c = \frac{1}{\frac{SN}{V_c} - \frac{1}{K_s} \cdot \frac{V_s}{V_c}} [\text{м}^3\text{Н}^{-1}\text{м}^{-1} \text{ или } \text{мм}^3/\text{Нмм}];$$

- скорость изнашивания подложки - отношение величины объемного износа подложки ко времени, в течение которого возник износ

$$W_s = V_s/t_{\text{исп}} [\text{мм}^3/\text{с}];$$

- интенсивность изнашивания подложки - отношение величины объемного износа подложки к пути трения, на котором происходил износ

$$I_s = V_s/S [\text{мм}^3/\text{м}];$$

- скорость изнашивания покрытия - отношение величины объемного износа покрытия ко времени, в течение которого возник износ

$$W_c = V_c/t_{\text{исп}} [\text{мм}^3/\text{с}];$$

- интенсивность изнашивания покрытия - отношение величины объемного износа покрытия к пути трения, на котором происходил износ

$$I_c = V_c/S [\text{мм}^3/\text{м}];$$

- скорость изнашивания покрытия и подложки - отношение величины суммарного объемного износа покрытия и подложки ко времени, в течение которого возник износ

$$W_{cs} = V_c + V_s/t_{\text{исп}} [\text{мм}^3/\text{с}];$$

- интенсивность изнашивания покрытия и подложки - отношение величины суммарного объемного износа покрытия и подложки к пути трения, на котором происходил износ

$$I_{cs} = V_c + V_s/S [\text{мм}^3/\text{м}].$$

Сравнительный анализ расчетных параметров производится:

- между объемным износом подложки без покрытия (например, измеренным на обратной стороне образца с покрытием) и суммарным объемным износом покрытия с подложкой;

- между объемным износом одной и той же подложки (образцов из одинакового исходного материала и технологии их изготовления) с различными тонкопленочными покрытиями (по толщине, по составам, по видам, по физико-механическим свойствам).

Покрытие, повышающее стойкость образца-подложки против микроабразивного изнашивания, должно иметь объемный износ V_s+V_c меньше, чем объемный износ образца-подложки без покрытия V_s .

Объективность сравнительной оценки покрытий по параметрам, связанным с объемным износом, основана на постоянстве вида трения (скольжение), силовых и кинематических параметров (давления на поверхность трения, скорости скольжения), внешних условий (температуры, влажности, вибраций) и условий проведения испытаний (постоянства контртела, абразивного материала и его количества).

На основании разработанной методики проводились испытания на микроабразивное изнашивание покрытия MultiPateks (многокомпонентное, многослойное, градиентное нанопокрывтие системы H-SiOCN), нанесенного с использованием технологии финишного плазменного упрочнения (ФПУ) [2] и широко применяемого покрытия TiN, осажденного методом вакуумного ионно-плазменного напыления с сепарированием плазменного потока на модернизированной установке ННВ6.6И1. В качестве материала подложки использовалась быстрорежущая сталь Р6М5, HRC 62-64. Толщина нанесенных покрытий составляла порядка 2-3 мкм. Используемый процесс ФПУ – это метод повышения долговечности деталей и инструмента путем нанесения тонкопленочных покрытий толщиной до 3 мкм с использованием технологии бескамерного химического осаждения при применении жидких элементоорганических соединений и активации электродуговой плазмой. Основными достоинствами ФПУ являются: осуществление процесса без вакуума и без применения специализированных камер; минимальный нагрев изделий, не превышающий 200°C; улучшение параметров шероховатости поверхностей с покрытием; возможность нанесения покрытия локально, в труднодоступных зонах и на изделиях любых габаритов; безопасность процесса с существенно меньшей нагрузкой на окружающую среду; использование малогабаритного, мобильного и экономичного оборудования.

Результаты испытаний для подложки без покрытия приведены в табл. 1, а на рис. 5 показан один из исследуемых отпечатков подложки. В табл. 2 и 3 приведены результаты измерений и расчетов данной подложки с нанесенными покрытиями MultiPateks и TiN, а на рис. 6 и 7 – микрофотографии отдельных отпечатков подложки с покрытиями MultiPateks и TiN соответственно.

Таблица 1. Результаты измерений и расчетов испытания подложки

Измерения			Расчет				
b_{ipar} , мкм	b_{iperp} , мкм	b , мкм	$V_s \times 10^5$, мкм ³	$K_s \times 10^{-13}$, м ³ Н ⁻¹ м ⁻¹	$I_s \times 10^{-5}$, мм ³ /м	$W_s \times 10^5$, мкм ³ /с	
654,15	654,15	681,9	7,07	8,96	22,41	0,24	
6	6						
99,59	99,59						
6	6						
92,01	92,01						

Таблица 2. Результаты расчетов испытания покрытия MultiPateks на стали Р6М5 для средних диаметров отпечатков $a=585$ мкм и $b=639$ мкм

$V_s \times 10^5$	$V_c \times 10^5$	$(V_s+V_c) \times 10^5$	$K_c \times 10^{-13}$	$I_c \times 10^{-5}$	$W_c \times 10^5$	$K_s \times 10^{-13}$	$I_s \times 10^{-5}$	$W_s \times 10^5$	$I_{cs} \times 10^{-5}$	$W_{cs} \times 10^5$
мкм ³	мкм ³	мкм ³	м ³ Н ⁻¹ м ⁻¹	мм ³ /м	мкм ³ /с	м ³ Н ⁻¹ м ⁻¹	мм ³ /м	мкм ³ /с	мм ³ /м	мкм ³ /с
3,8	1,6	5,5	6,9	5,2	0,05	4,9	12,2	0,13	17,3	0,18

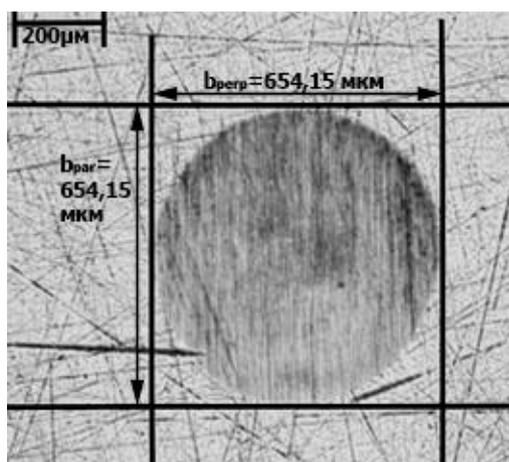


Рис. 5 - Микрофотография отпечатка №1 после испытаний на микроабразивное изнашивание стали Р6М5

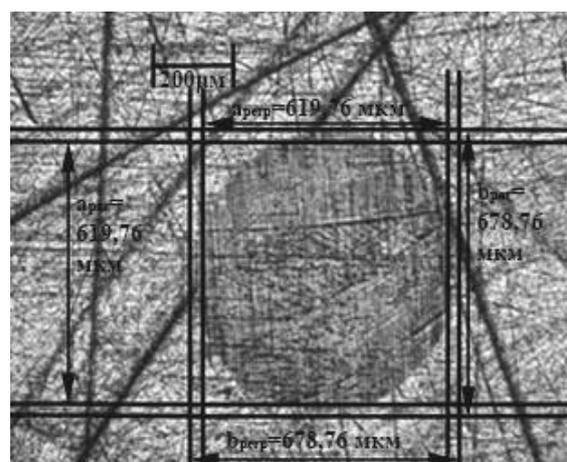


Рис. 6 - Микрофотография одного из отпечатков покрытия MultiPateks на стали Р6М5 после испытаний на микроабразивное изнашивание

Таблица 3. Результаты расчетов испытания покрытия TiN на стали Р6М5 для средних диаметров отпечатков, $a=585$ мкм и $b=639$ мкм

V_s $\times 10^5$	V_c $\times 10^5$	(V_s+V_c) $\times 10^5$	K_c $\times 10^{-13}$	I_c $\times 10^{-5}$	W_c $\times 10^5$	K_s $\times 10^{-13}$	I_s 10^{-5}	W_s $\times 10^5$	I_{cs} $\times 10^{-5}$	W_{cs} $\times 10^5$
мкм ³	мкм ³	мкм ³	м ³ Н ⁻¹ м ⁻¹	мм ³ /м	мкм ³ /с	м ³ Н ⁻¹ м ⁻¹	мм ³ /м	мкм ³ /с	мм ³ /м	мкм ³ /с
2,2	9,81	12,01	7,61	15,54	0,16	1,39	3,49	0,04	19,03	0,2

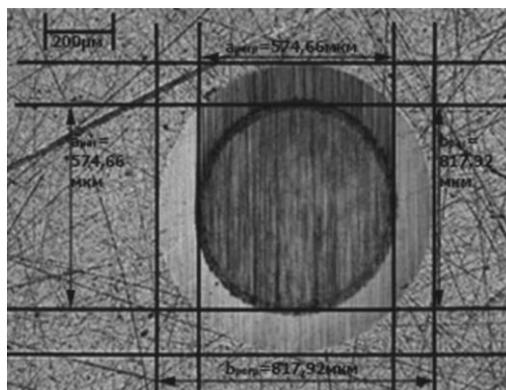


Рис. 7 - Микрофотография одного из отпечатков покрытия TiN на стали Р6М5 после испытаний на микроабразивное изнашивание

Анализ проведенных исследований позволяет сделать следующие выводы:

- объемный износ, интенсивность изнашивания и скорость изнашивания и, соответственно, коэффициент износа подложки – стали Р6М5 после нанесения покрытий MultiPateks и TiN снизился на 50% и 70%;

- коэффициент износа покрытия MultiPateks соответствует $6,9 \text{ м}^3\text{Н}^{-1}\text{м}^{-1}$, что меньше значения этого коэффициента для вакуумного покрытия TiN, равного $7,61 \text{ м}^3\text{Н}^{-1}\text{м}^{-1}$, при этом диапазон измеренного последнего коэффициента сравним с полученными ранее при аналогичных испытаниях [3];

- разработанное оборудование и методика проведения испытаний на микроабразивное изнашивание позволяет оценивать сравнительные трибологические характеристики поверхностных слоев материалов различных изделий, работающих в условиях трения и износа.

Библиографический список:

1. **Тополянский П.А., Тополянский А.П., Ермаков С.А., Дунаев А.В., Поджарая К.С.** Аттестация трибологических свойств упрочняющих тонкопленочных покрытий. Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 8, С. 20-29
2. **Горленко А.О., Тополянский П.А., Тополянский А.П.** Трибологические возможности финишного плазменного упрочнения для повышения ресурса металлорежущего инструмента. Металлообработка. - 2016. - № 3, - С. 33-41
3. **Rutherford K.L., Hutchings I.M.** A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems. Surface and Coatings Technology. - 79 (1996). - 231-239

Bibliography:

1. **Topolianskii P.A., Topolianskii A.P. Ermakov S.A., Dunaev A.V., Podgaray K.S.** Certification of the tribological properties coatings. Friction and lubrication in machinery. 2014. № 8, С. 20-29
2. **Gorlenko A.O., Topolianskii P.A., Topolianskii A.P.** Tribological possible finishing plasma hardening to increase the resource of cutting tools. Metalloobrabotka. - 2016. - № 3, - С. 33-41
3. **Rutherford K.L., Hutchings I.M.** A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems. Surface and Coatings Technology. - 79 (1996). - 231-239

УДК 539.62

МАСШТАБНЫЙ ФАКТОР В ПРОЧНОСТНЫХ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В МИКРО- И НАНОШКАЛЕ*

А.И. Тюрин, Т.С. Пирожкова

*Научно-образовательный центр «Нанотехнологии и наноматериалы»
ТГУ имени Г.Р. Державина, г. Тамбов, Россия*

Хорошо известно, что физико-механические свойства твердых тел зависят от характерного размера образца, элементов его микроструктуры или области локального нагружения [1-6]. Такие проявления обычно называют влиянием масштабного фактора в прочности и пластичности твердых тел или размерными эффектами. Благодаря им физико-механические свойства могут существенно изменяться, чаще всего возрастать, в области микро-, субмикро- и наноразмеров и во много раз превосходить макроскопические аналоги. Однако этому росту есть естественный предел, определяемый теоретической прочностью материала. В ряде случаев после достижения максимума эти характеристики начинают падать с уменьшением характерного размера области деформирования, усложняя тем самым характер размерных зависимостей.

Кроме того, несмотря на огромный опыт эксплуатации готовых изделий, имеющих подвижные взаимодействующие части, и большое количество публикаций по вопросам исследования трения и износа, до сих пор остаются дискуссионными и вызывают большой интерес вопросы, связанные с изучением кинетики процессов трения и износа, а также механизмов возникающей при этом локальной деформации и изнашивания на микро- и наноуровне [7 – 14].

* Исследование упругих, пластических и прочностных свойств выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-19-00181). Исследование трибологических свойств выполнено при поддержке гранта РФФИ (проект № 16-38-50252)

Это обусловлено тем, что само взаимодействие сопрягающихся поверхностей при трении даже макротел происходит на микро- и наноуровне, путем множественных локальных быстротечных контактов, возникающих на неровностях с характерными размерами, достигающими сотен и даже десятков нанометров и отсутствием достаточно хорошо аттестованных методик и оборудования, способного исследовать и характеризовать эти множественные контакты. Вместе с тем развитие нанотехнологий, современного материаловедения и наноматериаловедения, а также применение наноматериалов для различных применений стимулирует исследование вопросов, связанных с природой трения особенно в микро- и наномасштабе.

Поэтому изучение кинетики и микромеханизмов пластической деформации материала, а также определение прочностных и трибологических свойств в микро- и наномасштабах при действии высоких локальных напряжений приобретает все большую актуальность. Это связано со стремлением к лучшему пониманию и изучению природы размерных и скоростных эффектов при переходе на нанометровый уровень размеров, существующих и новых наноструктурированных материалов, сделанных из них отдельных частей и готовых изделий. Такой интерес к изучению вопросов поведения материала на наноуровне обусловлен развитием и применением нанотехнологий, современного материаловедения и наноматериаловедения, особенно при разработке и использовании современных наноструктурированных материалов, а также миниатюризацией многих устройств и изделий (например, устройства НЭМС, МЭМС и др.).

Для моделирования процессов, происходящих при локальной деформации и определения прочностных свойств материала без разрушения всего образца, обычно применяют методы микро- и наноиндентирования [1-3, 15-23]. Так, например, упругие, прочностные и пластические свойства материала при индентировании чаще всего характеризуется такими величинами, как твердость H , модуль Юнга E , коэффициент вязкости разрушения K_{IC} , поверхностная энергия разрушения G , параметр Палмквиста α , микрохрупкость γ и др. Величины H , E , K_{IC} , G , α и γ зависят от типа исследуемого материала, величины приложенной нагрузки P , глубины отпечатка h , типа применяемого индентора, температуры и т. д.

Однако, несмотря на достаточно большое количество публикаций по применению методов индентирования для определения упругих, пластических и прочностных свойств различных материалов [1–3, 15-23], в литературе до сих пор остаются дискуссионными вопросы исследования кинетики процесса формирования отпечатка на стадии перехода от чисто упругой к упруго-пластической деформации, выявлении микромеханизмов пластической деформации начальных стадий пластичности, четко установленных зависимостей размерных эффектов в прочностных [1-3] и трибологических свойствах [7-12]. Кроме того отсутствуют четко установленные значения критических нагрузок P_{cr} и глубин отпечатка h_{cr} , при которых для конкретных материалов, с использованием различных типов инденторов, можно корректно применять расчетные модели разрушения и соответствующие им расчетные значения величин, характеризующих локальные прочностные свойства (K_{IC} , G , α , γ и др.).

Поэтому целью работы явилось изучение влияния масштабного фактора на прочностные и трибологические свойства твердых тел в микро- и наномасштабе.

Для исследования применяли метод динамического индентирования, который позволяет прикладывать к индентору только нормальную нагрузку P_N или одновременно и нормальную и латеральную P_L нагрузки и вести запись кинетически происходящих при этом процессов. Непрерывная регистрация P_N и h , или в совокупности P_N , P_L , нормальной и латеральной составляющих смещений (h_N и h_L) реализуемых при индентировании позволяет в максимально контролируемых условиях создавать локальные взаимодействия на микро- и наноуровне [15 – 23], а также воспроизводить условия возникающие в динамических трибоконтактах [7-12, 24-26] и определять упругие, пластические, прочностные и трибологические свойства в микро- и наномасштабе.

Эти методики были применены для определения локальных физико-механических свойств (твердости H , модуля Юнга E , коэффициента трения k и др.) ряда материалов различных классов (керамики, полимеры, ионные и ковалентные кристаллы, металлы и металлические сплавы и др.); влияния масштабного фактора в изменении этих свойств; определены активационные и энергетические параметры (активационный объем – γ и др.) формирования отпечатка и предложены доминирующие микромеханизмы массопереноса при локальном деформировании в микро- и наношкале.

Полученные данные показывают, что локальная деформация начинается чисто упруго, а затем сменяется упруго-пластической. Числовые значения определенных активационных и энергетических параметров на начальной стадии упруго-пластической деформации исследованных материалов характерны для моноатомных микромеханизмов, а при больших глубинах в несколько сотен нм для мягких материалов (LiF, Al) становятся сопоставимыми с дислокационными механизмами. В ряде других материалов (ZrO₂, Si и плавленый кварц) – остаются характерными для моно- или малоатомных микромеханизмов. В интервале от нескольких десятков до нескольких сотен нм (в зависимости от типа исследуемого материала) числовые значения для LiF и Al характерны для малоатомных микромеханизмов пластичности (например, краудионы, малоатомные кластеры, сложные комплексы точечных дефектов и др.) или одновременного действия моноатомных и дислокационных микромеханизмов пластичности.

Исследования числовых значений трибологических свойств в микро- и наношкале показывают, что, например, для пар трения керамика (наноструктурированная керамика на основе ZrO₂) – материал контртела (керамика на основе ZrO₂, ПММА, Al, LiF и др.) k остается постоянным и практически не зависит от пройденного расстояния, направления движения и повторного прохождения индентора по одному и тому же месту образца при обратном ходе индентора.

Кроме того полученные данные показывают на наличие размерных эффектов в коэффициенте трения для всех исследованных материалов, которые выражаются в том, что с ростом нагрузки, а следовательно и размера зоны контакта взаимодействующих тел, коэффициент трения вначале достаточно резко падает с ростом нормальной нагрузки, вплоть до некоторого значения $P_{\text{Норт}}$, а затем начинает расти с ростом P_N . Типичные зависимости $k(P_N)$ для ряда исследованных пар трения (керамика – фторопласт и керамика – монокристалл LiF) показаны на рис. 1.

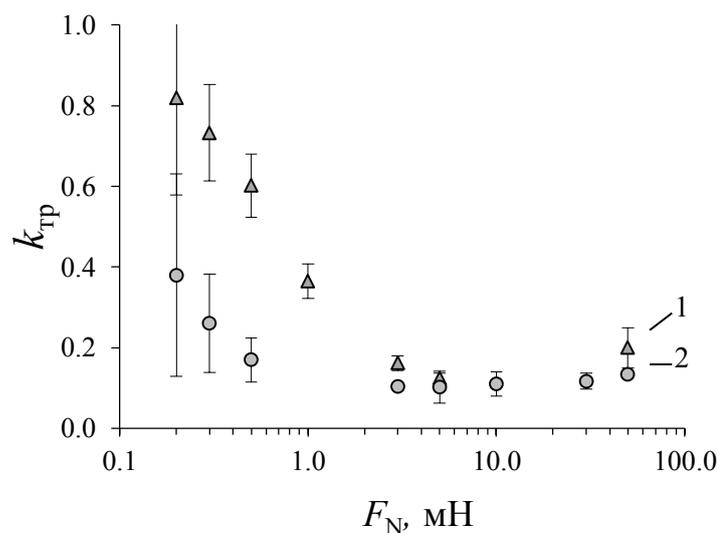


Рис. 1. Экспериментальная зависимость коэффициента трения k от величины нормальной нагрузки P_N для ряда исследованных материалов (1 – фторопласт, 2 – LiF).

Величина $P_{\text{Норт}}$ зависит от типа исследованного материала и пары трения. Так, например, для пары трения наноструктурированная TZP керамика на основе бадделита –

фторопласт величина $P_{\text{Nopt}} = 10$ мН; для пары трения наноструктурированная TZP керамика на основе бадделеита – Ge, $P_{\text{Nopt}} = 5$ мН; для пары трения наноструктурированная TZP керамика на основе бадделеита – LiF, $P_{\text{Nopt}} = 2$ мН. Таким образом исследование влияние масштабного фактора на числовые значения k , показывают, что зависимости $k(P_N)$ для всех исследованных пар трения имеют характерный и достаточно ярко выраженный минимум, соответствующий некоторому оптимальному значению нормальной силы P_{Nopt} . Сопоставление полученных экспериментальных данных с ходом теоретической зависимости коэффициента трения от нормальной нагрузки, полученной в ряде работ [11, 12] показывает на их хорошее качественное соответствие для всех исследованных материалов.

Таким образом в работе смоделированы процессы, возникающие при локальном деформировании, трении и износе в микро- и наномасштабе для широкого класса материалов (керамики, ковалентные и ионные монокристаллы, металлы и металлические сплавы, полимеры и др.). Для всех исследуемых материалов выявлена кинетика процессов деформирования и трения, определены числовые значения и установлено влияние масштабного фактора на упругие, пластические, прочностные и трибологические свойства. Для всех материалов и пар трения, в исследованном диапазоне нормальных нагрузок, показано хорошее качественное соответствие хода теоретических и экспериментальных зависимостей коэффициента трения от P_N .

Библиографический список:

1. **Bhushan B.** Springer Handbook of Nanotechnology. Berlin: Springer. 2010. 1968 p.
2. **Fischer-Cripps A.C.** Nanoindentation. New York: Springer. 2011. 280 p.
3. **Головин Ю.И.** Наноиндентирование и его возможности. М.: Машиностроение. 2009. 312 с.
4. **Zhou X., Zhou H., Li X., Chen Ch.** Size effects on tensile and compressive strengths in metallic glass nanowires// Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2015. V. 84. P. 130 -144.
5. **Nadgorny E. M., Dimiduk D. M., Uchic M. D.** Size effects in LiF micron-scale single crystals of low dislocation density// Journal of Materials Research. 2008. V. 23. No. 11. P. 2829-2835. Dimiduk D. M., Uchic M. D., Parthasarathy T. A. Size-affected single-slip behavior of pure nickel microcrystals // Acta Materialia. 2005. V. 53. No. 15. P. 4065-4077.
6. **Bhushan B.** Introduction to tribology. John Wiley & Sons, Ltd. New York. 2013. 714 p.
7. **Lyubimov D., Dolgoplov K., Pinchuk L.** Micromechanisms of Friction and Wear: Introduction to Relativistic Tribology. – Springer Science & Business Media. 2013. 218 p.
8. **Дедков Г.В.** Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели// Успехи физических наук. 2000, Т. 170. № 6. С. 586–618.
9. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / под ред А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение. 2001. 664 с.
10. **Мышкин Н.К., Петроковец М.И.** Трение, смазка, износ: физические основы и технические приложения трибологии. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2007. 370 с.
11. **Пенкин Н.С., Пенкин А.Н., Сербин В.М.** Основы трибологии и триботехники. М: Машиностроение, 2008. 206 с.
12. **Kumar A., Staedler T., Jiang X.** Beilstein journal of nanotechnology// Beilstein journal of nanotechnology. 2013. V. 4. №. 1. P. 66–71.
13. **Bora M. O., Coban O., Sinmazcelik T.** et al. Instrumented indentation and scratch testing evaluation of tribological properties of tin-based bearing materials// Materials & Design. 2010. V. 31. №. 6. P. 2707–2715.
14. **Головин Ю.И., Тюрин А.И.** Динамика и микромеханизмы ранних стадий внедрения жесткого индентора при микроиндентировании ионных кристаллов// Кристаллография. 1995. Т. 40. № 5. С. 884.

15. Головин Ю.И., Тюрин А.И. Динамика начальной стадии микроиндентирования ионных кристаллов// Известия Российской академии наук. Серия физическая. 1995. Т. 59. № 10. С. 49.
16. Головин Ю.И., Тюрин А.И. Современные проблемы нано-и микротвердости твердых тел// Материаловедение. 2001. № 1. С. 14.
17. Головин Ю.И., Иволгин В.И., Коренков В.В., Тюрин А.И. Определение времязависимых пластических свойств твердых тел посредством динамического наноиндентирования// Письма в Журнал технической физики. 1997. Т. 23. № 16. С. 15-19.
18. Головин Ю.И., Иволгин В.И., Тюрин А.И., Хоник В.А. Скачкообразная деформация объемного аморфного сплава Pd40Cu30Ni10P20 в процессе наноиндентирования// Физика твердого тела. 2003. Т. 45. № 7. С. 1209-1212.
19. Головин Ю.И., Шибков А.А., Боярская Ю.С., Кац М.С., Тюрин А.И. Импульсная поляризация ионного кристалла при динамическом индентировании// Физика твердого тела. 1988. № 11. С. 3491.
20. Головин Ю.И., Тюрин А.И., Хлебников В.В. Влияние режимов динамического наноиндентирования на коэффициент скоростной чувствительности твердости тел различной структуры// Журнал технической физики. 2005. Т. 75. № 4. С. 91–95.
21. Акчурин М.Ш., Гайнутдинов Р.В., Гарибин Е.А., Головин Ю.И., Демиденко А.А., Дукельский К.В., Кузнецов С.В., Миронов И.А., Осико В.В., Смирнов А.Н., Табачкова Н.Ю., Тюрин А.И., Федоров П.П., Шиндяпин В.В. Наноструктура оптической фторидной керамики// Перспективные материалы. 2010. № 5. С. 5–12.
22. Surmeneva M.A., Surmenev R.A., Mukhametkaliyev T.M., Oehr C., Tyurin A.I., Pirozhkova T.S., Shuvarin I.A., Teresov A.D., Koval N.N. Comparative study of the radio-frequency magnetron sputter deposited cap films fabricated onto acid-etched or pulsed electron beam-treated titanium// Thin Solid Films. 2014. V. 571. № 1. P. 218–224.
23. Ivanova A.A., Surmeneva M.A., Tyurin A.I., Pirozhkova T., Shuvarin I.A., Prymak O., Epple M., Chaikind M.V., Surmenev R.A. Fabrication and physico-mechanical properties of thin magnetron sputter deposited silver-containing hydroxyapatite films// Applied Surface Science. 2016. T. 360. C. 929.
24. Surmeneva M.A., Mukhametkaliyev T.M., Surmenev R.A., Tyurin A.I., Pirozhkova T.S., Shuvarin I.A., Shuklinov A.V., Zhigachev A.O., Teresov A.D., Koval N.N., Oehr C. Effect of silicate doping on the structure and mechanical properties of thin nanostructured rf magnetron sputter-deposited hydroxyapatite films // Surface and Coatings Technology. 2015. T. 275. C. 176-184.
25. Тюрин А.И., Пирожкова Т.С., Шуварин И.А. Исследование процессов трения и износа твердых тел в микро- и наномасштабе / Материалы VI Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», Москва, 10-13 ноября 2015 г. / Москва. Сборник материалов. М.: ИМЕТ РАН. 2015. С. 757–759.
26. Тюрин А.И., Коренков В.В., Пирожкова Т.С., Шуварин И.А. Исследование кинетики и механизмов деформирования, трения и износа однородных и неоднородных твердых тел в наномасштабе методами динамического микро- и наноиндентирования / Сборник материалов III Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Ю.Н. Работнова «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций», г. Новосибирск, 26 – 30 мая 2014 / Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. С. 108.
27. Тюрин А.И., Пирожкова Т.С. Исследование процессов трения и износа твердых тел в микро- и наномасштабе // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2016. Т. 21. № 3. С. 1375-1380.
28. Тюрин А.И., Пирожкова Т.С., Шуварин И.А. Моделирование процессов трения и износа в микро- и наномасштабе / Труды XIV Международной научной конференции «Трибология и надежность» 17-19 сентября 2014 г. / С.-Пб.: НИУ ИТМО. С. 243 – 251.

Bibliography:

1. **Bhushan B.** Springer Handbook of Nanotechnology. Berlin: Springer. 2010. 1968 p.
2. **Fischer-Cripps A.C.** Nanoindentation. New York: Springer. 2011. 280 p.
3. **Golovin Yu.I.** Nanoindentation and its possibilities. M.: Mashinostroenie. 2009. 312p.
4. **Zhou X., Zhou H., Li X., Chen Ch.** Size effects on tensile and compressive strengths in metallic glass nanowires// Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2015. V. 84. P. 130 -144.
5. **Nadgorny E. M., Dimiduk D. M., Uchic M. D.** Size effects in LiF micron-scale single crystals of low dislocation density// Journal of Materials Research. 2008. V. 23. No. 11. P. 2829-2835. Dimiduk D. M., Uchic M. D., Parthasarathy T. A. Size-affected single-slip behavior of pure nickel microcrystals // Acta Materialia. 2005. V. 53. No. 15. P. 4065-4077.
6. **Bhushan B.** Introduction to tribology. John Wiley & Sons, Ltd. New York. 2013. 714p.
7. **Lyubimov D., Dolgoplov K., Pinchuk L.** Micromechanisms of Friction and Wear: Introduction to Relativistic Tribology. – Springer Science & Business Media. 2013. 218 p.
8. **Dedkov G.V.** Nanotribology: experimental facts and theoretical models // Uspechy Physichesci nauk. 2000, V. 170. № 6. P. 586–618.
9. Fundamentals of tribology (friction, wear and lubrication) / ed. A.V. Chichinadze. M.: Mashinostroenie. 2001. 664 p.
10. **Mychkin N.K., Petrocovetc M.I.** Friction, lubrication, wear: the physical basis and engineering applications of tribology. M.: FIZMATLIT. 2007. 370 p.
11. **Penkin N.C., Penkin A.N., Serbin V.M.** Fundamentals of Tribology and tribotechnology. M: Mashinostroenie, 2008. 206 p.
12. **Kumar A., Staedler T., Jiang X.** Beilstein journal of nanotechnology// Beilstein journal of nanotechnology. 2013. V. 4. №. 1. P. 66–71.
13. **Bora M. O., Coban O., Sinmazcelik T.** et al. Instrumented indentation and scratch testing evaluation of tribological properties of tin-based bearing materials// Materials & Design. 2010. V. 31. №. 6. P. 2707–2715.
14. **Golovin Yu.I., Tyurin A.I.** Dynamics and micromechanisms early stages of implementation with a hard indenter microindentation ionic crystals // Crystallography Reports. 1995. V. 40. P. 818.
15. **Golovin Yu.I., Tyurin A.I.** The dynamics of the initial stage Microindentation ionic crystals // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 1995. V. 59. № 10. P. 49.
16. **Golovin Yu.I., Tyurin A.I.** Modern problems of nano- and micro-hardness of solids // Journal of Materials Science. 2001. No 1. P. 14.
17. **Golovin Yu.I., Ivolgin V.I., Korenkov V.V., Tyurin A.I.** Determination of the time-dependent plastic properties of solids by dynamic nanoindentation// Technical Physics Letters. 1997. V. 23. No 8. P. 621-623.
18. **Golovin Yu.I., Ivolgin V.I., Tyurin A.I., Khonik V.A.** Serrated deformation of a Pd40Cu30Ni10P20 bulk amorphous alloy during nanoindentation // Physics of the Solid State. 2003. V. 45. No 7. P. 1267–1271.
19. **Golovin Yu.I., Shibkov A.A., Boyarskaya Yu.S., Katz M.S., Tyurin A.I.** Pulse polarization of an ionic crystal with dynamic indentation Physics of the Solid State. 1988. No 11. P. 3491.
20. **Golovin Yu.I., Tyurin A.I., Khlebnikov V.V.** Effect of the conditions of dynamic nanoindentation on the strain-rate sensitivity of hardness for solids with different structures// Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 2005. V. 50. No 4. P. 479-483.
21. **Akchurin M.Sh., Gainutdinov R.V., Garibin E.A., Demidenko A.A., Golovin Yu.I., Tyurin A.I., Shindyapin V.V., Dukelskii K.V., Mironov I.A., Smirnov A.N., Kuznetsov**

S.V., Osiko V.V., Fedorov P.P., Tabachkova N.Yu. Nanostructure of optical fluoride ceramics // Inorganic Materials: Applied Research. 2011. V. 2. No 2. P. 97-103.

22. Surmeneva M.A., Surmenev R.A., Mukhametkaliyev T.M., Oehr C., Tyurin A.I., Pirozhkova T.S., Shuvarin I.A., Teresov A.D., Koval N.N. Comparative study of the radio-frequency magnetron sputter deposited cap films fabricated onto acid-etched or pulsed electron beam-treated titanium// Thin Solid Films. 2014. V. 571. № 1. P. 218–224.

23. Ivanova A.A., Surmeneva M.A., Tyurin A.I., Pirozhkova T., Shuvarin I.A., Prymak O., Epple M., Chaikind M.V., Surmenev R.A. Fabrication and physico-mechanical properties of thin magnetron sputter deposited silver-containing hydroxyapatite films//Applied Surface Science. 2016. T. 360. C. 929.

24. Surmeneva M.A., Mukhametkaliyev T.M., Surmenev R.A., Tyurin A.I., Pirozhkova T.S., Shuvarin I.A., Shuklinov A.V., Zhigachev A.O., Teresov A.D., Koval N.N., Oehr C. Effect of silicate doping on the structure and mechanical properties of thin nanostructured rf magnetron sputter-deposited hydroxyapatite films // Surface and Coatings Technology. 2015. T. 275. C. 176-184.

25. Tyurin A.I., Pirozhkova T.S., Shuvarin I.A. The study of friction and wear processes of solids in the micro- and nanoscale / 4th International conference « Deformation and destruction of materials and nanomaterials», Moscow, 10-13 November 2015 / Moscow. Materials of conference . M.: IMET RAN. 2015. P. 757–759.

26. Tyurin A.I., Korenkov V.V., Pirozhkova T.S., Shuvarin I.A. The study of the kinetics and mechanisms of deformation, friction and wear of homogeneous and heterogeneous solids in the nanoscale using dynamic micro and nanoindentation / 3th Russian Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of Academician Yu.N. Rabotnova « Deformation and fracture of heterogeneous media and structures », Novosibirsk, 26 – 30 may 2014 / Novosibirsk: Publ. NGTU, 2014. P. 108.

27. Tyurin A.I., Pirozhkova T.S. Study of friction and wear solid in micro and nanoscale// Vestnic Tambovskogo universiteta. Series: Natural and Technical Sciences. 2016. V. 21. No 3. P. 1375–1380.

28. Tyurin A.I., Pirozhkova T.S., Shuvarin I.A. Modelling of processes of friction and wear in the micro and nano scale / 14th International Scientific Conference « Tribology and reliability » 17-19 September 2014 / S.-Pb.: NIU ITMO. P. 243 – 251.

УДК 544.18:539.4

СОВМЕСТИМОСТЬ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ГРАНИЦАХ ЗЕРЕН В СТАЛИ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА СТАЛИ*

Ю.Ф. Мигаль¹, В.И. Колесников²

¹ФГБУН «Южный научный центр РАН», г. Ростов-на-Дону, Россия

²ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»,
г. Ростов-на-Дону, Россия

Известно, что прочность поликристаллических материалов во многом определяется свойствами межкристаллитных поверхностей (границ зерен), толщина которых сопоставима с размерами атомов. Особенно важную роль границы зерен играют в процессах деформации и разрушения при повышенных температурах. Одной из причин понижения прочности поликристаллических материалов, часто указываемой в литературе, является зернограничная

* Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант №16-08-00264-а).

сегрегация. Это явление обусловлено выходом атомов примесных и легирующих элементов из объема зерен на границу между ними [1-4]. Другим вариантом появления примесных атомов на границах зерен является межзеренная диффузия. В результате подобных процессов может ослабляться связь между зёрнами, и механические свойства металлов могут ухудшаться.

До настоящего времени одними из наиболее значительных работ, посвященных роли зернограницной сегрегации в прочности металлов, остаются работы М. Сиха, опубликованные в 80-х годах прошлого века (см. [1, 2]). В этих работах с помощью простых оценок было показано, что способность сегрегированных атомов ослаблять или упрочнять границы зерен во многом определяется величиной энергии связи атомов, приходящейся на единицу площади. В этих оценках, которые в основном соответствуют известным экспериментальным фактам, использовались данные только об энтальпии сублимации и размерах атомов исследуемых элементов. Очевидно, в силу допущений, положенных в основу таких оценок, полученные выводы нуждаются в дополнительном экспериментальном и теоретическом изучении. При этом большую роль должны играть методы квантовой химии, поскольку процесс зернограницной сегрегации существенно зависит от таких характеристик межатомных связей, которые чрезвычайно трудно измерить экспериментально.

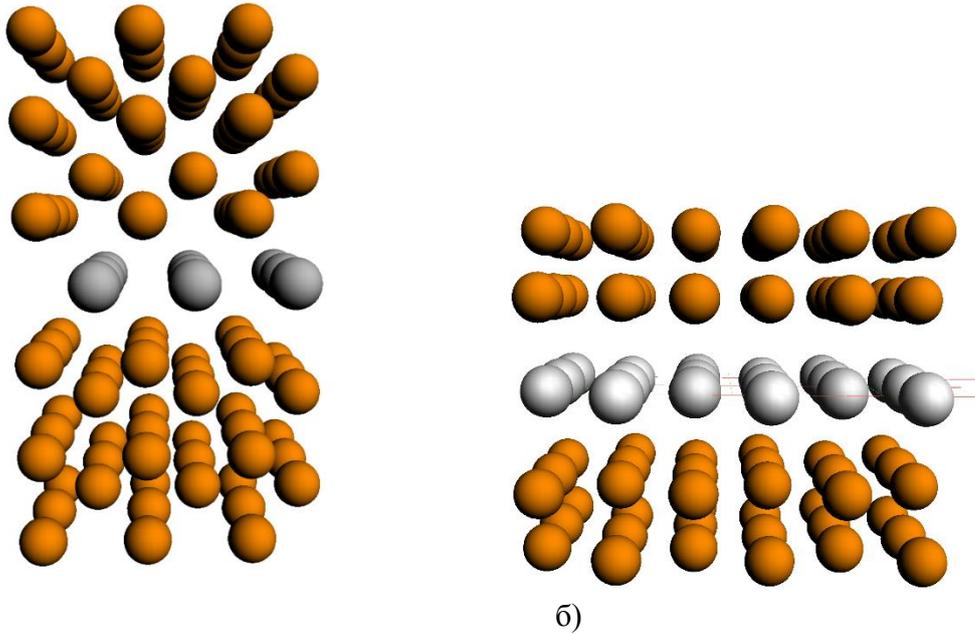
К сожалению, достаточно подробный теоретический анализ изменений химической связи в поликристаллах, обусловленных зернограницной сегрегацией, до настоящего времени, насколько известно авторам, не проводился. Подавляющее число публикаций последних десятилетий, посвященных проблеме сегрегации, - это работы экспериментального характера, в которых достигнуты значительные успехи в изучении свойств границ зерен (см., напр., [3-4]). Однако химическая связь и возможность целенаправленного формирования на границах между зёрнами каких-либо атомных структур в этих работах практически не изучались. Исследования, в которых квантово-химические методы применяются для установления связи между явлением зернограницной сегрегации и проблемой разрушения и износостойкости металлов, в мировой литературе в настоящее время довольно редки (см., напр., [5-8]).

Впервые в мировой литературе сравнительные исследования межатомных взаимодействий на границах зерен в железе с участием атомов целых периодов таблицы элементов Менделеева начаты в нашей группе [9-11]. С использованием различных моделей (кластерной модели и модели пластины) в рамках подхода DFT были проведены исследования химической связи атомов первых пяти периодов таблицы Менделеева с поверхностью зерен железа.

В данной работе сообщается о продолжении этих исследований – рассматриваются элементы шестого периода (за исключением лантаноидов).

Выбор модели и методов расчета

Для имитации границы зерна нами использована двупериодическая модель пластины, в которой граница имитируется набором параллельных моноатомных плоскостей, включающих несколько слоев атомов железа и один (промежуточный) слой атомов примесных элементов (рис. 1). В данной модели рассматривается участок границы с минимальной (одноатомной) толщиной примесного слоя. Такая модель, безусловно, не воспроизводит реальную границу зерна с ее существенно нерегулярным расположением атомов (см., напр., [12]). Тем не менее, в рамках этой модели удастся в какой-то степени отразить ближний порядок в расположении взаимодействующих атомов – различные виды взаимной координации атомов матрицы и примесных атомов. Дальний порядок, отсутствующий в реальности, но используемый в модели, позволяет учесть влияние далеко расположенных атомов с помощью эффективных методов твердотельных зонных расчетов.



а)

б)

Рис. 1 – Модель границы зерна с поверхностями (100) (а) и (110) (б). Верхняя и нижняя части модели состоят из атомов железа, средний слой - из примесных или легирующих атомов.

Основная цель модели – приблизительно оценить величину энергии химической связи $E_{\text{Fe-X}}$ между атомами железа и примесными атомами X на границе зерен и исследовать зависимость этой энергии от атомного номера элементов примеси. Поскольку, как показано в [2], энергия связи является величиной, существенно определяющей прочность границ, то в итоге, уточняя подход, использованный в [2], мы надеемся получить возможность провести более точную, чем в [2], классификацию химических элементов по степени упрочнения ими границ зерен.

Прочность границы оценивалась в работе следующим образом. Предполагалось, что при механическом воздействии общая модельная система (сегрегационный комплекс) распадается на две части, одна из которых состоит только из атомов железа (имитация поверхности зерна железа), а вторая включает также и примесные атомы (адсорбционный комплекс) (рис. 2). В наших предыдущих расчетах было показано, что такой вариант распада границы на ее *локальных* участках наиболее вероятен.

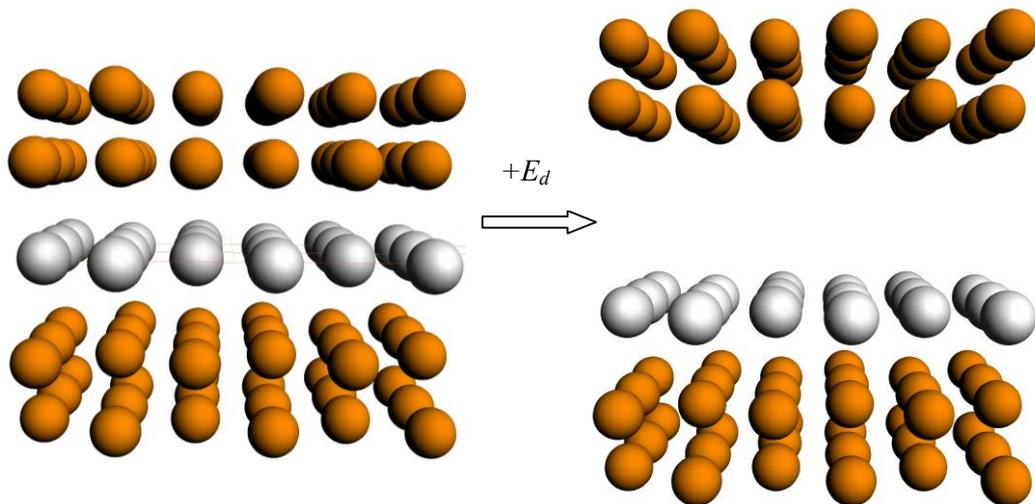


Рис. 2 – Распад модельного сегрегационного комплекса на две части.

Энергия E_d , необходимая для распада сегрегационного комплекса, в расчете на одну ячейку вычислялась по формуле

$$E_d = |E_s - E_g - E_a|,$$

где E_s – энергия связи сегрегационного комплекса, E_g и E_a – энергии связи его распадающихся частей. Все энергии вычислялись в расчете на ячейку (энергия всего бесконечно протяженного комплекса, очевидно, равна бесконечности.)

Результаты расчетов

Расчеты, проведенные с помощью пакета ADF [13], основанного на методе DFT, для сегрегационных и адсорбционных комплексов с поверхностью (110) дали следующие результаты (рис. 3).

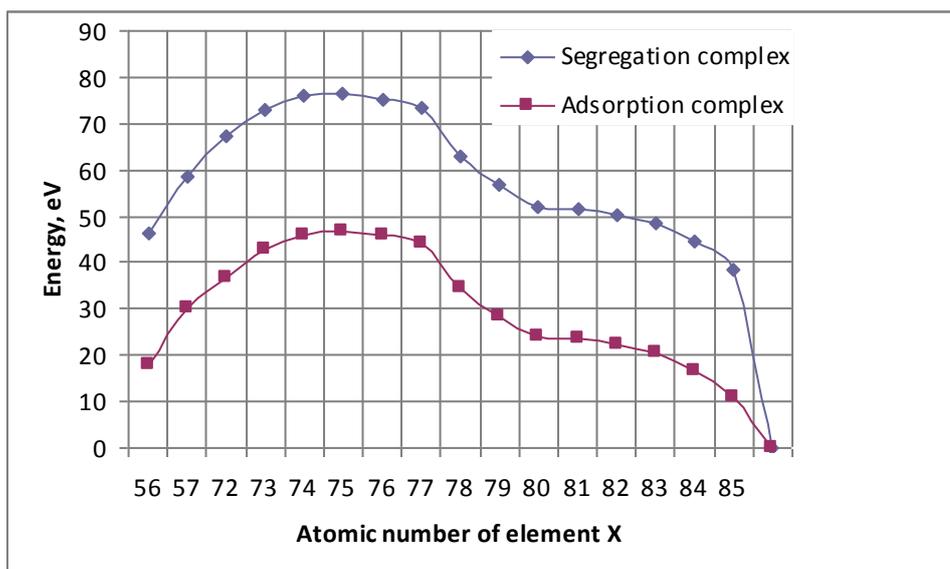


Рис. 3 – Энергия связи сегрегационных и адсорбционных комплексов с поверхностью (110).

Аналогичные зависимости имеют место и для комплексов с поверхностью (100).

На рис. 4 представлены данные об энергии распада сегрегационных комплексов. Сравнивая соответствующие кривые, также приходим к выводу, что эти зависимости подобны для разных поверхностей границ.

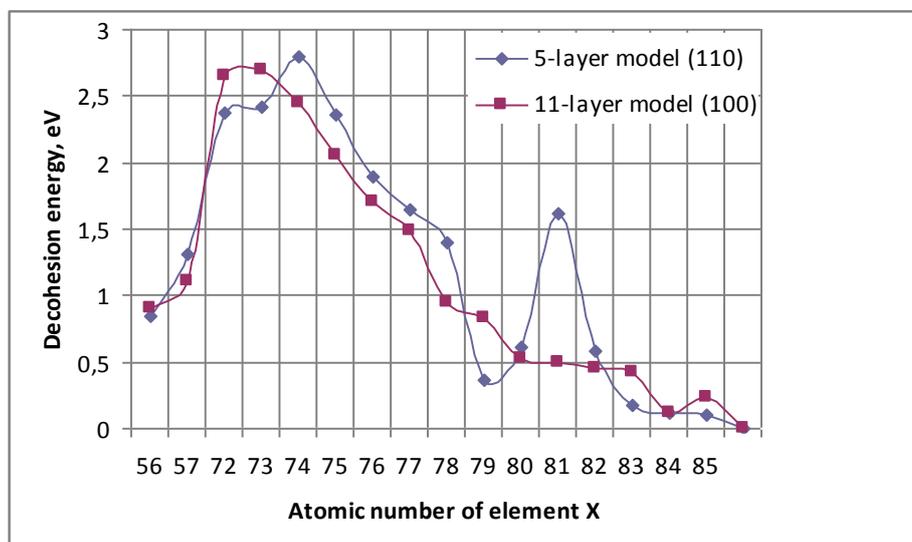


Рис. 4 – Энергия распада сегрегационных комплексов с поверхностями (100) и (110).

Ниже объединим полученные результаты с результатами более ранних расчетов [11], проведенных нами для примесных элементов из первых пяти периодов таблицы Менделеева.

Таблица 1. Энергия E_d (X) (в эВ), необходимая для распада сегрегационных комплексов с поверхностью (110)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			0
1	H 1.0										He 0
2	Li 1.6	Be 2.7	B 4.0	C 3.7	N 2.0	O 0.7	F 0.3				Ne 0
3	Na 1.4	Mg 1.8	Al 2.3	Si 2.1	P 0.8	S 0.0	Cl 0.0				Ar 0
4	K 1.7	Ca 2.6	Sc 2.8	Ti 3.2	V 3.4	Cr 3.3	Mn 2.9	Fe 2.6	Co 2.4	Ni 2.1	
	Cu 1.7	Zn 1.3	Ga 1.6	Ge 0.7	As 0.1	Se 0	Br 0				Kr 0
5	Rb 1.4	Sr 2.2	Y 2.5	Zr 2.7	Nb 2.8	Mo 2.6	Tc 2.3	Ru 2.0	Rh 1.8	Pd 1.3	
	Ag 1.1	Cd 0.8	In 0.7	Sn 0.4	Sb 0.1	Te 0.1	I 0.1				Xe 0
6	Cs ?	Ba 0.9	La 1.1	Hf 2.6	Ta 2.7	W 2.4	Re 2.1	Os 1.7	Ir 1.5	Pt 1.0	
	Au 0.8	Hg 0.5	Tl 0.5	Pb 0.4	Bi 0.4	Po 0.1	At 0.2				Rn 0.

Из представленных графика и таблицы со всей очевидностью вытекает периодическая зависимость энергии распада сегрегационных комплексов от атомного номера примесных элементов. Этот факт, безусловно, не является принципиально новым, так как он вытекает из Периодического закона Менделеева. Для нас важно, что наши результаты не противоречат известным общим принципам, и это может дополнительно свидетельствовать о правомерности нашего подхода.

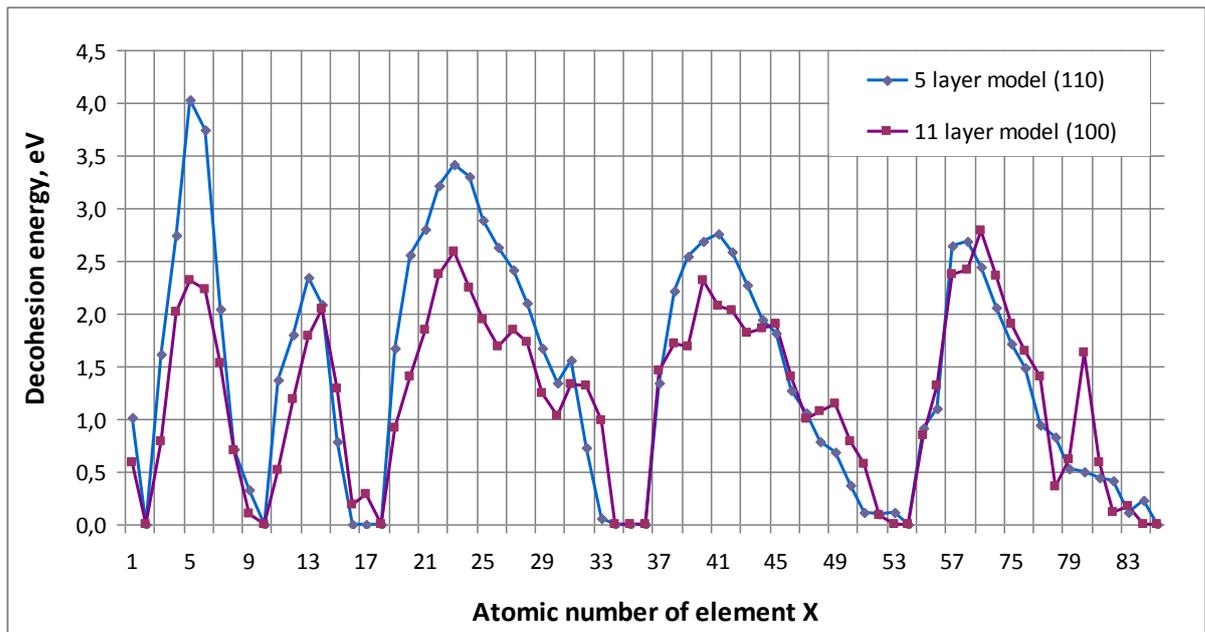


Рис. 5 – Энергия распада сегрегационных комплексов с поверхностями (100) и (110) для первых шести периодов таблицы Менделеева.

Новыми и принципиально важными здесь являются детали полученной зависимости. В частности, можно видеть, что при перемещении вдоль периода энергия распада сегрегационных комплексов вначале растет, а затем убывает. При перемещении вдоль группы эта величина, как правило, убывает.

На основе представленных данных можно выделить элементы, упрочняющие и разупрочняющие сталь. Упрочняющими можно считать те элементы, для которых энергия распада сегрегационных комплексов больше или сопоставима с энергией распада комплекса, состоящего из чистого железа. В частности, к упрочняющим элементам относятся бор, титан, ванадий, хром, марганец, ниобий, молибден. Особый интерес вызывает бор, который обладает малой растворимостью в стали, он концентрируется на границах зерен и его введение в сталь в незначительных количествах может приводить к упрочнению стали. К разупрочняющим элементам, энергия распада которых значительно меньше, чем энергия распада комплекса из чистого железа, относятся сера, фосфор, щелочные и другие элементы.

Эти теоретические результаты хорошо коррелируют с известными экспериментальными фактами. Мы полагаем, что данный подход можно рассматривать как некоторую теоретическую основу для анализа сопоставимости химических элементов на границах зерен в стали. Опираясь на полученные результаты, можно утверждать, что упрочняющие (или разупрочняющие) свойства элементов на границах зерен в стали в основном определяются энергией связи этих элементов с поверхностью железа.

Заключение. Проведенное исследование показало, что более точный квантово-химический анализ взаимодействий атомов примесных и легирующих элементов с поверхностью зерен в стали дал результаты, близкие к тем, которые получены М. Сихом в рамках простейших приближений.

Библиографический список/Bibliography:

1. Briggs, D. Practical surface analysis by Auger and X-ray photoelectron spectroscopy / D. Briggs, M.P. Seah. – John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 1990.
2. Seah, M.P. Adsorption-induced interface decohesion / M.P. Seah. // *Acta Metallurgica* – 1980. – № 28. – P. 955-962.
3. Herbig, M. Atomic-scale quantification of grain boundary segregation in nanocrystalline material / M. Herbig, D. Raabe, Y. J. Li, P. Choi, S. Zaeferrer, S. Goto // *Phys. Rev. Lett.* – 2014. – № 112. – P.126103.
4. Lejcek, P. Grain boundary segregation in metals / P. Lejcek. – Springer series in materials science, book 136. – Springer, 2010.
5. Painter, G.S. Effects of segregation on grain-boundary cohesion: A density-functional cluster model of boron and sulfur in nickel / G.S. Painter, F.W. Averill // *Phys. Rev. Lett.* – 1987 – № 58. – P.234–237.
6. Yang, R. The effects of 3d alloying elements on grain boundary cohesion in gamma-iron: a first principles study on interface embrittlement due to the segregation / R. Yang, R.Z. Huang, Y.M. Wang, H.Q. Ye., C.Y. Wang // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 2003. – №15. – P. 8339–8349.
7. Braithwaite, J. Spencer. Grain boundary impurities in iron / J. Spencer Braithwaite, Peter Rez / *Acta Materialia* – 2005. – № 53 – P.2715–2726.
8. Gesari, S.B. Effect of manganese on grain boundary segregation of sulfur in iron // S.B. Gesari., M.E. Pronsato, A. Juan // *Applied Surface Science.* – 2007– № 253 – P. 5939–5942.
9. Kolesnikov V.I. Study of friction and wear in the wheel-rail system by X-ray electron and auger-electron spectroscopy and quantum chemistry / V.I. Kolesnikov, A.T. Kozakov, Yu.F. Migal. // *Journal of Friction and Wear* – 2010. – № 31. – P.11-22.
10. Migal, Yu.F. Compatibility of chemical elements on grain boundaries and its influence on wear resistance of polycrystalline materials/ Yu.F. Migal, V.I. Kolesnikov, E.S. Novikov // In book “Advanced Nano- and Piezoelectric Materials and their Applications”. Editor: Ivan A. Parinov. – Nova Science Publishers, Hauppauge, NY, USA, 2014. – P. 1-18.

-
11. Migal, Yu.F. Impurity and alloying elements on grain surface in iron: Periodic dependence of binding energy on atomic number and influence on wear resistance / Yu.F. Migal, V.I. Kolesnikov, I.V. Kolesnikov// *Computational Materials Science* – 2016. – № 111. – P. 503–512.
 12. Priester, L. Grain boundaries from theory to engineering /L. Priester. – Springer series in materials science, book 172. – Springer, 2013.
 13. te Velde, G. Chemistry with ADF/ G. te Velde, F.M. Bickelhaupt, S.J.A. van Gisbergen, C.F. Guerra, E.J. Baerends, J.G. Snijders, T. Ziegler // *J. Comp. Chem.* – 2001. –.№ 22. – P. 931.

СЕКЦИЯ 7
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
ТРАНСПОРТНЫХ ТРИБОСИСТЕМ

УДК 652.2:504 + 06

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ

Борисова А.В.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»
г. Ростов-на-Дону, Россия*

Стремительное развитие транспортно-технологической инфраструктуры страны неизбежно сопровождается усилением антропогенного воздействия на окружающую среду (ОС). Железнодорожный транспорт является одним из наиболее экологичных видов транспорта по сравнению с другими типами перевозок, однако его вклад в загрязнение ОС остается достаточно высоким.

Вопросам экологической безопасности со стороны ОАО «Российские железные дороги» уделяется повышенное внимание. В достижении основных стратегических ориентиров экологической политики компании, а именно: снижение негативного воздействия производственных и транспортных объектов на окружающую среду, повышение экологической безопасности и социальной ответственности, приоритетным направлением является совершенствование системы экологического контроля и мониторинга, формирование единой информационно-аналитической системы в сфере охраны окружающей среды.

Сбор первичной информации о состоянии ОС осуществляется стационарными и передвижными экологическими лабораториями. При этом одним из факторов, влияющих на оперативность и достоверность получения экоинформации, является оптимальный выбор приборного оборудования.

Учитывая специфику железнодорожной отрасли, совершенствование системы экологического мониторинга направлено в первую очередь на развитие потенциала передвижных лабораторий на базе пассажирских вагонов. Однако при отсутствии комплексного подхода к выбору приборной техники при комплектации лаборатории возникают издержки, связанные с неоправданными финансовыми затратами и возможной неполной функциональностью приобретенного оборудования.

Следует отметить, что решению этого вопроса посвящено не слишком много работ. В одних обсуждается сравнение различных методов по двум-трем параметрам, в других применяются обобщенные критерии с рекомендациями, носящими весьма общий характер [1].

Наибольший интерес в этой области представляют три подхода. В основу первого положена универсальная система химического анализа (УСХА), суть которой заключается в определении химико-аналитических признаков веществ, дающих возможность оптимизировать химический анализ за счет сокращения требуемой номенклатуры приборно-методического обеспечения [2]. Следует отметить, что данный подход сложен в практической реализации применительно к объектам экологического контроля.

Альтернативным решением поставленной задачи является выбор измерительного оборудования по одному единичному параметру, учитывая, что остальные показатели не должны являться ограничивающими. Данный подход изложен в работе [3]. Проблемой

данного подхода является недостаточное обеспечение ранжирования параметров, т.е. систему необходимо исследовать, изменяя поочередно один из показателей в определенных пределах в целях определения реакции его на систему.

Третий подход к рациональному выбору приборов для оснащения аналитических лабораторий в рамках прикладной квалиметрии описан в работе [4]. Суть метода сводится к составлению квалиметрических таблиц и последующему вычислению некоторого обобщенного показателя качества аппаратуры. Данный метод позволяет оперировать максимально объективными фактами. При этом остается вероятность влияния субъективных параметров при выборе существенных характеристик приборов и составлении исходных квалиметрических таблиц.

Анализ существующих теорий показывает трудоемкость и сложность их применения на практике, в связи с этим ниже предлагается упрощенная методика выбора экоаналитического оборудования, которая объединяет достижения фундаментальной аналитической химии и практический опыт экоаналитических лабораторий [5].

На первых этапах определяется массив экоаналитических задач лаборатории, то есть перечень загрязняющих веществ и факторов (рисунок 1). Если рассматривать мониторинг объектов железнодорожного транспорта, то в данном случае перечень загрязняющих веществ определяется по статистическим данным, технической документации.

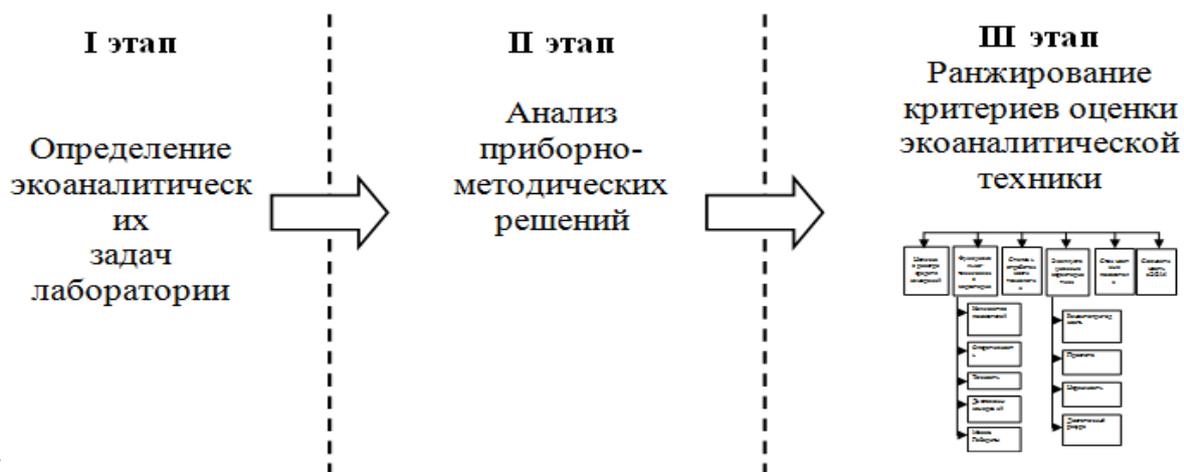


Рис. 1 Методика выбора экоаналитической техники

Далее, на втором этапе, осуществляется анализ существующих приборно-методических вариантов, то есть на данном этапе проводится оценка преимуществ и недостатков всех существующих приборно-методических решений. Этот этап включает в себя формулировку перечня критериев оценки приборов, из которых выбираются наиболее важные (определяющие). При этом критерии определяются таким образом, чтобы они могли быть так или иначе формализованы и описаны математически, допуская тем самым количественную оценку приборов по совокупности критериев.

Также следует сказать, что для определения значений критериев (показателей) применяются субъективные и объективные методы. В число объективных методов входят: измерительный, расчетный и регистрационный (основан на обнаружении и подсчете количества некоторых событий). К числу субъективных относятся экспертный и социологический (основан на сборе мнений возможных потребителей) методы.

На следующем тапе осуществляется ранжирование критериев оценки экоаналитической техники и анализ количественных характеристик сравниваемых приборов. В данном случае были использованы два подхода: метод ранговой корреляции и метод экспертных оценок.

При оценке и выборе приборов следует учитывать следующие критерии: функционально-технические (количество измеряемых показателей, диапазон и точность измерений, габариты и масса прибора), эксплуатационные (ремонтпригодность, надежность и простота обслуживания, безопасность, достаточный ресурс), опыт эксплуатации, наличие в реестре средств измерений, экономические показатели, совместимость с ЭВМ.

Лимитирующим показателем является наличие в реестре средств измерений. Очевидно, что если прибор не входит в реестр средств измерений на территории России, то он не может быть использован в эколаборатории, поэтому этот критерий был исключён из перечня критериев при проведении экспертных процедур.

Принимая во внимание, что критерии оценки оборудования, разнонаправленные – одни требуют максимизации, другие минимизации, для удобства формулировки их следует унифицировать, приведя к одному виду, например, требованиям максимизации показателей. Решение данной проблемы изложено в работе [6], заключается в построении максиминной стратегии, в соответствии с которой для каждого показателя находится критический вариант.

В целях реализации экспертного метода проведены исследования по определению пригодности использования в передвижных условиях экологического вагона-лаборатории группы приборов для оценки физических и химических факторов. В число оцениваемых приборов входят: измеритель акустический многофункциональный «ЭКОФИЗИКА», измеритель напряженности электрических и магнитных полей ПЗ-80 ЕН 500, измеритель электростатических полей ПЗ-80-Е, термоанемометр ТТМ-2-04-DIN, измеритель микроклимата «ЭкоТерма-1», анемометр АМ-70, газоанализатор ДАГ-510, газоанализатор ГАНК-4 (А).

Для автоматизации расчетов при выполнении ранговой корреляции и удобства представления итоговых данных, процесс ранжирования критериев выбора приборов представлен в виде программы в формате MS Excel.

На рисунках 2 и 3 представлены скриншоты экспертной и расчетной частей программы для ранжирования критериев выбора приборов.

1	2	3											13
		4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	Наименование организации/ФИО, должность эксперта	Класс-во показателей	Оперативность получения данных	Точность	Диапазон измерений	Масса габариты	Степень обработанности теплотопии	Простота использования (удобный интерфейс)	Надежность	Ремонт-пригодность	Стоимостные показатели	Совместимость с ЭВМ	Сумма
2		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂
3	ООО «Центр Качества», лаборатория исследований условий труда и окружающей среды г.Саратов	2	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	105
4	Начальник лаборатории Сорочинский Е.А.	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	105
5	ООО «Диалар», лаборатория исследований условий труда и окружающей среды г.Новосибирск	2	10	10	10	9	10	9	9	8	6	8	91
6	Инженер-метролог Лих Б.К.	5	10	10	10	10	10	4	10	9	1	1	71
7	ООО «Атом-объектосфера» и «орана труда», лаборатория исследований условий труда и окружающей среды г.Новосибирск												
8	Руководитель лаборатории Бочарова И.И.	8	10	10	10	6	9	10	10	8	8	6	95
9	ООО «Центр качества», лаборатория исследований условий труда и окружающей среды г.Казань	10	10	10	10	10	10	8	10	9	10	6	103
10	Специалист по измерениям Петров А.А.	10	10	10	10	10	10	8	10	9	10	6	103
11	ООО «Аудит-природа», лаборатория исследований условий труда и окружающей среды г.Иркутск												
12	Руководитель испытательной лаборатории Иланов С.В.	6	5	8	7	4	9	3	10	5	7	3	67
13	Специалист-электрик Паньков С.Л.	10	10	5	10	5	5	5	10	10	10	2	82
14	ООО «Испытательный лабораторный Центр «Фактор», лаборатория исследований условий труда и окружающей среды г.Королев												
15	Эксперт Удальцова Т.Ю.	5	10	10	10	6	7	7	7	10	8	4	84
16	Эксперт Кузнецова А.Б.	5	10	10	10	5	7	7	7	9	5	5	80
17	Эксперт Романенко Ю.В.	5	5	8	8	10	3	5	10	2	5	4	65
18	Эксперт Удальцов М.В.	6	8	9	8	7	8	8	10	7	7	5	83
19	Руководитель испытательной лаборатории Белова И.А.	6	9	8	9	5	7	7	7	8	5	3	74
20	ООО «Лаборатория исследовательский центр», лаборатория исследований условий труда и окружающей среды, г.Ростов-на-Дону												
21	Директор департамента измерительной техники Гавриленко В.А.	8	4	10	5	1	0	3	9	4	7	2	53
22	Заместитель генерального директора по качеству – главный метролог Крайнев Д.В.	8	1	9	10	0	2	3	7	6	5	4	55

Рис. 2 Скриншот программы ранжирования критериев выбора приборов (экспертная часть)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
36	Начальник лаборатории Топоркова И.В.	10	8	10	10	7	10	9	10	9	6	8	97
37	Сумма рангов $\sum_{j=1}^m a_{ij}$	154	165	183	191	137	142	151	178	145	136	91	1673
38	$\bar{a} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k a_i$	152											
39	Отклонение от суммы рангов $\Delta_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} - \bar{a}$	2	13	31	39	-15	-10	-1	26	-7	-16	-61	0
40	Квадрат отклонений $S = \sum_{i=1}^k \Delta_i^2$	4	167	955	1514	228	102	1	671	50	259	3732	7683
41	Количество критериев, k	11											
42	Количество экспертов, m	21											
43	Коэффициент конкордации $W = \frac{12S}{m^2(k^2-k)}$	0,16											
44	Значимость коэффициента конкордации $\chi^2_{\alpha} = m(k-1)W - \frac{12S}{mk(k+1)} \geq \chi^2_{\alpha}$	33											
45	Табличное значение критерия Пирсона при числе степеней свободы f = k - 1 = 10 и уровне значимости $\alpha = 0,95$ χ^2_{α}	3,94											

Рис. 3 Скриншот программы ранжирования критериев выбора приборов (расчетная часть)

По результатам ранжирования критериев построена ступенчатая диаграмма, позволяющая визуализировать итоговые данные (рисунок 4).

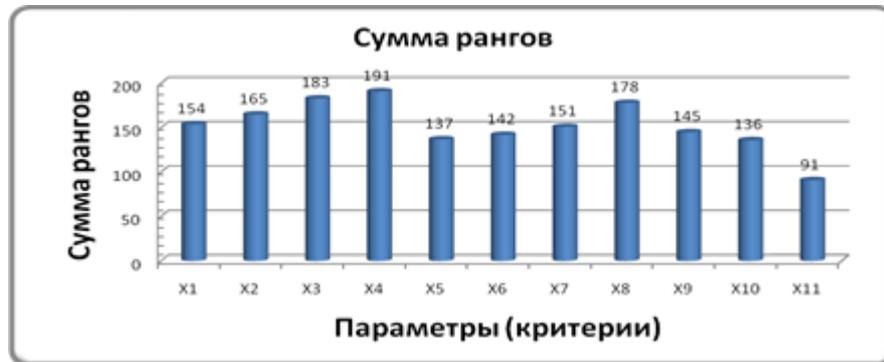


Рис. 4 Диаграмма ранжирования критериев выбора экоаналитического оборудования

На основании приведенной диаграммы определено, что при выборе прибора:

- к ведущим параметрам следует отнести диапазон измерений, точность прибора;
- к существенным – надежность, простота использования, оперативность получения данных, количество показателей;
- менее значимым – масса и габариты, ремонтпригодность, степень отработанности технологии, стоимостные показатели, совместимость с ЭВМ.

Опираясь на предложенную методику, с учетом полученных ведущих критериев выбора, модернизирована функциональная схема передвижного измерительно-вычислительного комплекса (ПВЭК) экологического вагона-лаборатории за счет замены ряда приборов, предназначенных для измерения физических факторов окружающей среды и химических загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, определяемых экспресс-методом (рисунок 5) [7].

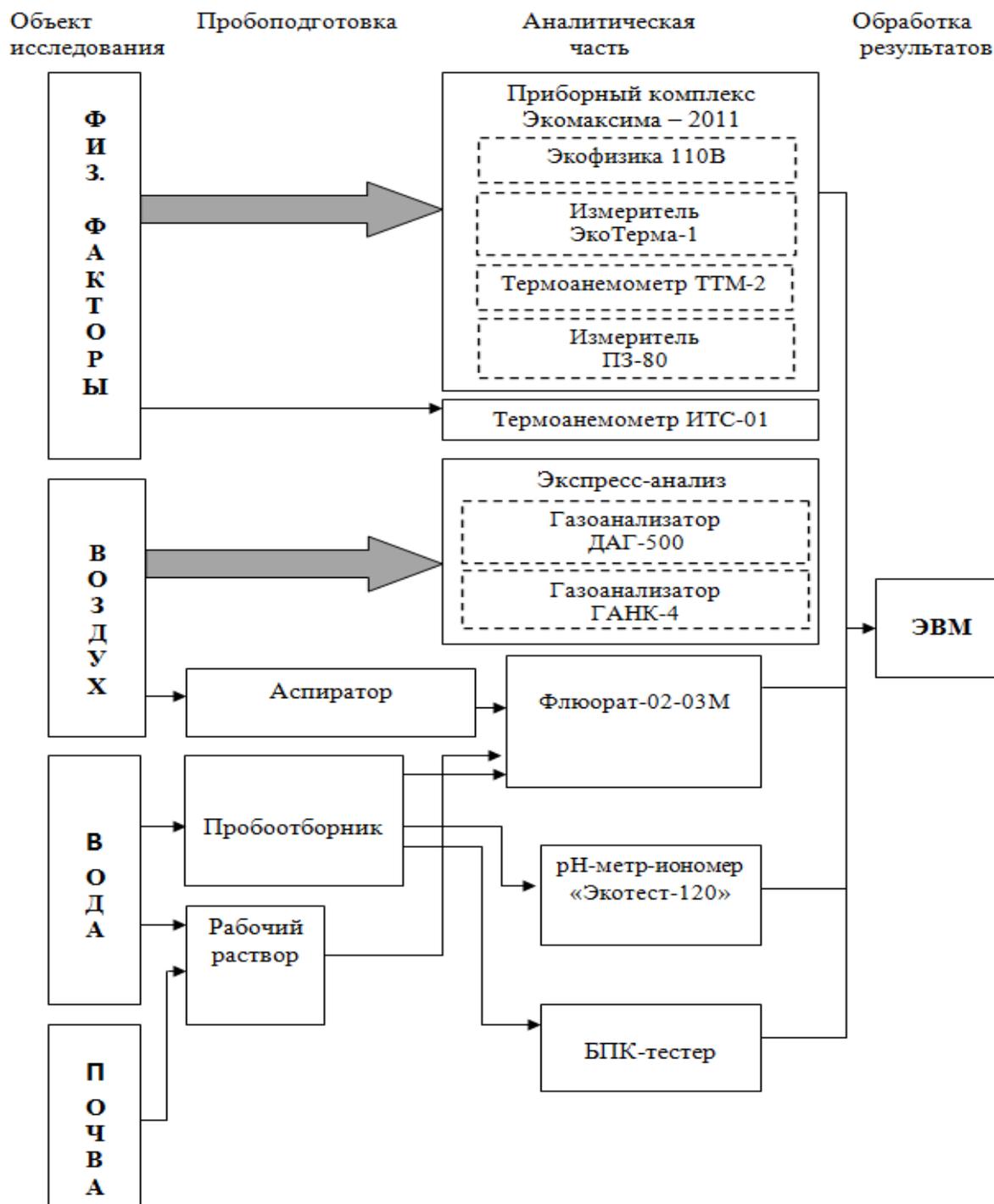


Рис. 5 Функциональная схема модернизированного ПИВЭК

Приборно-методический комплекс, представленный на рисунке 5, включает современные средства измерений и вспомогательное оборудование, которые отвечают высокому научно-техническому уровню, законодательным требованиям в сфере обеспечения единства измерений и полностью охватывают перечень показателей окружающей среды, контролируемых в процессе экологического контроля и мониторинга. Представленная комплектация ПИВЭК позволяет на месте проводить сложные анализы, значительно облегчает работы по отбору проб на самых удаленных участках железной дороги.

Библиографический список

1. **Борисова, А.В.** Теоретические основы методологии оптимального выбора приборного оборудования при комплектации экологических вагонов-лабораторий

[Электронный ресурс]/ А.В. Борисова// Инженерный вестник Дона. №1. – 2014.– Режим доступа [http:// ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2227/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2227/)(доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. Рус.

2. **Грибов, Л.А.** Универсальная система химического анализа [Текст]/ Л.А. Грибов, Ю.А. Золотов, В.И. Калмановский, Л.Л. Кунин, Ю.М. Лужков, А.А. Попов, В.С. Торопцов// Журнал аналитической химии. - №6 - т. XXXVII. - 1982. - С.1104 – 1121.

3. **Шаевич, А.Б.** Аналитическая служба как система [Текст]/ А.Б. Шаевич - М.: Химия, 1981. – 264 с. - ил. ; 22 см. - Библиогр.: с. 260-264 (153 назв.). - 9000 экз. – ISBN отсутствует.

4. **Федорович, Г.В.** Выбор аппаратуры для испытательных лабораторий [Текст]/ Г.В. Федорович// Мир измерений. - №9. - 2009. - С.32 – 40.

5. **Борисова, А.В.** Методология выбора экоаналитического оборудования при комплектации лабораторий на железнодорожном транспорте [Текст]/ А.В. Борисова// Труды Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2012». - Часть 2. Ростов н/Д: РГУПС. - 2012. - С. 235-237.

6. **Финоченко, В.А.** Методологические подходы к выбору экоаналитического оборудования для проведения мониторинга окружающей среды [Текст]/ В.А. Финоченко, А.В. Борисова. - М.: Экологические системы и приборы. - №11 – 2011. – С.47-50.

7. **Borisova, A.V.** Instrumentation and methodology support for the mobile laboratories the environmental control and monitoring of rail transport [Text]/ A.V. Borisova, V.A. Finochenko// Innovative Information Technologies: Materials of the International scientific – practical conference. Part 2./Ed. Uvaysov S.U. – М.: HSE, 2014, - P.629-633.

Bibliography:

1. **Borisova, A.V.** Theoretical basis of the methodology of the optimal choice of instrumentation equipment at environmental laboratories wagons [electronic resource] / A.V. Borisova// Engineering Gazette Don. №1. - 2014. - Access [http:// ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2227/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2227/)(доступ free) - Caps. screen. - Jaz. Eng.

2. **Gribov, L.A.** Universal system of the chemical analysis of [Text] / L.A. Gribov, Yu.A. Zolotov, V. I. Kalmanovsky, L.L. Kunin, Yu.M. Luzhkov, A.A. Popov, V. S. Toroptsov//Magazine of analytical chemistry. - No. 6 - t. XXXVII. - 1982. - Page 1104 – 1121.

3. **Shaevich, A.B.** Analytical service of the system [Text] / AB Shaevich - М.: Chemistry, 1981. - 264 p. - Ill. ; 22 cm. - Bibliogr. : p. 260-264 (153 titles.). - 9000 copies. - ISBN no.

4. **Fedorovich, G.V.** Selection of equipment for testing laboratories [Text] / G.V. Fedorovich // World measurements. - №9. - 2009. - P.32 - 40.

5. **Borisova, A.V.** Methodology for selection of eco-analytical equipment in the laboratory equipment on railway transport [Text] / A. V. Borisova // Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference "Transport 2012". - Part 2: Rostov n / D: RSTU. - 2012. - P. 235-237.

6. **Finochenko, V.A.** Methodological approaches to the selection of eco-analytical equipment for environmental monitoring [Text] // VA Finochenko, AV Borisov. - М.: Ecological systems and devices. - №11 - 2011. - S.47-50.

7. **Borisova, A.V.** Instrumentation and methodology support for the mobile laboratories the environmental control and monitoring of rail transport [Text]/ A.V. Borisova, V.A. Finochenko// Innovative Information Technologies: Materials of the International scientific – practical conference. Part 2./Ed. Uvaysov S.U. – М.: HSE, 2014, - P.629-633.

УДК. 536.24/658.51

СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ДИОКСИДА АЗОТА И САЖИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРЕВПРЫСКА В ДВИГАТЕЛЯХ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН.

Д. В. Деундяк

ФГБОУ ВО РГУПС, Деканат ф-та «Электромеханический»

Введение

Ужесточение нормативов выбросов от двигателей транспортных средств (ТС), особенно в отношении выбросов твердых частиц сажи и смеси оксидов азота NO_x воздействующих как на человека в среде его жизнедеятельности и риски профессиональных заболеваний ставит все более новые задачи перед производителями двигателей при создании новых конструктивов и модернизации существующих типов.

В связи с глобальным потеплением климата необходимо снижать расход топлива, при этом сохраняя эффективную мощность ТС. Снижение расхода топлива напрямую влияет на объемы выбросов диоксида углерода CO_2 , а также позволит уменьшить существенный недостаток дизельных агрегатов – повышенные концентрации оксидов азота NO_x , а также повышенное содержание твердых частиц сажи, с налипающими на их поверхности бенз- α -пирен, с производные $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$, при сгорании дизельного топлива в таких двигателях [11].

Сгорание в обычных дизельных двигателях происходит в локальных зонах с $\lambda \ll 1$ и при соотношении воздух/топливо $\lambda = 1$.

При этих условиях горения из гетерогенной смеси образуется копоть, насыщенная твердыми частицами сажи и NO_x . Происходит это в следствии высоких температур в камере сгорания (КС), этот механизм образования описывается в трудах Зельдовича [1].

Трудность заключается в том, что в настоящее время ни один из методов не дает возможности снизить выбросы этих компонентов без существенной потери мощности двигателя, и в этом случае необходим, так называемый «сажево-оксидоазотный компромисс» [2].

Кроме того, в связи со снижением количества добываемых и ограниченных ресурсов ископаемых видов топлив необходимо выделить в приоритет разработку и использование передовых технологий в двигателестроении, особенно учитывать технологии позволяющее снизить расход потребляемого топлива, что позволит сэкономить и топливные резервы, но также улучшит экологическую обстановку [3].

Следовательно, все меры по дальнейшему сокращению выбросов вредных веществ следует рассматривать с позиции технических решений по снижению выбросов без существенных потерь в мощности агрегатных установок ТС. Два возможных пути для значительного снижения вредных веществ непосредственно при сгорании в цилиндре КС:

- регулирование опережения впрыска топлива для оптимизации процесса сгорания;
- использование улучшенных видов топлива или использование водо-топливных эмульсий.

1. Процесс горения в КС.

В основе механизма образования сажи лежит процесс горения топлива в условиях воздействия насыщенной топливно-воздушной смеси или даже жидкой фазы с кислородом.

Данный процесс горения в двигателях с непосредственным впрыском, где впрыск мелкодисперстной фракции топливной смеси происходит до начала основного впрыска – превпрыск.

После возгорания превпрысковой смеси топлива, смесь, подаваемая при основном впрыске, уже взаимодействует с пламенем, т.е. насыщенная топливно-воздушная смесь (или жидкая фаза топлива) подается через форсунки в камеру сгорания к уже горячей зоне в цилиндре, что уменьшает количество топлива (снижает расход), но при этом увеличивает образование большого количества сажи [4].

При небольшом количестве впрыскиваемого топлива до основного впрыска наблюдается сокращение процесса горения, снижается уровень шума и выбросов NO_x , которые отсутствуют у двигателей без предварительного впрыска топлива. Повышение температуры при использовании превпрыска топлива уменьшает задержку зажигания для основного впрыска, а и снижает разницу с диффузионным горением уменьшается. Следовательно, достигается максимальный градиент давления и пиковой температуры горения топлива и именно за счет этого и происходит снижение шума двигателя, и снижает образование содержание окислов азота в выхлопе. К сожалению, большая часть диффузионного сгорания приводит к непропорциональному увеличению выбросов сажи.

Кроме, диффузного горения топлива на увеличение концентрации сажи влияют также и другие параметры, такие как: соотношения количества воздуха к количеству топлива, степень сжатия и другие.

Кроме того, непосредственный контакт нагнетаемого воздуха и жидкого топлива еще горящими остатками топлива от превпрыска может привести к интенсивному образованию сажи, как показано на рис.1, но при этом большим недостатком является значительное увеличение выбросов сажи [5, 6].



Рис. 1: Зависимость давления в цилиндре с превпрыском и без предварительного впрыска от угла опережения впрыска.

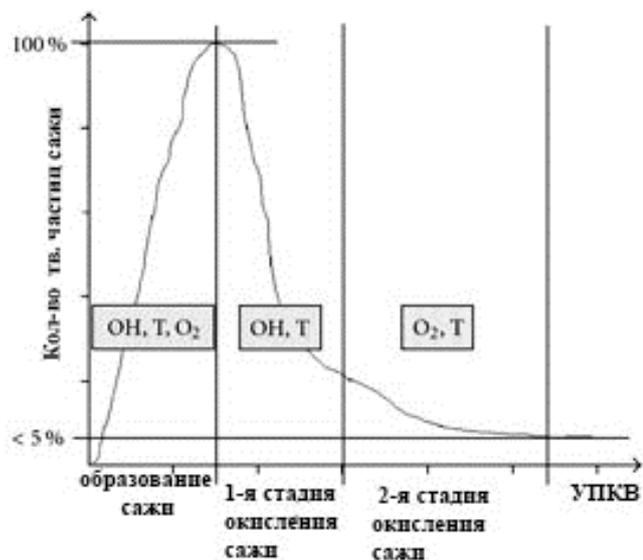


Рисунок 2: Качественная характеристика процесса формирования и окисления сажи.

На рисунке 2 показана зависимость характерного увеличения концентрации сажи в цилиндре в процессе сгорания дизельного топлива [7, 8]. Процесс образования и окисления

сажевых частиц описывается имитационными моделями, которые учитывают тип и качество топлива, конструктив двигателей с непосредственным впрыском топлива [9]. Этот процесс разделен на несколько фазовых стадий: фазу образования сажи с увеличением концентрации сажевых частиц в цилиндре, и двухэтапную фазу окисления с уменьшением ее концентрации в цилиндре. Происходят обе эти фазы с учетом основных параметров работы двигателя, описываемых в [10].

2. Выбросы сажи.

На рисунках 3 и 4 показаны выбросы сажи как для обычных, так и пространственно-разделенных систем впрыска без системы рециркуляции отработавших газов (ОГ) и 35% рециркуляции ОГ с момента подачи топлива на стадии основного впрыска. Как и следовало ожидать, в обоих случаях, выбросы сажи растут с задержкой от момента подачи топлива в КС при обычной системе впрыска. Без системы рециркуляции отработавших газов, выбросы сажи незначительно уменьшается при более позднем впрыске. Данный результат вероятно можно объяснить образованием менее качественной топливно-воздушной смеси, связанной с конструктивом КС двигателя, в частности, с нижним положением поршня при раннем по времени впрыске [11].

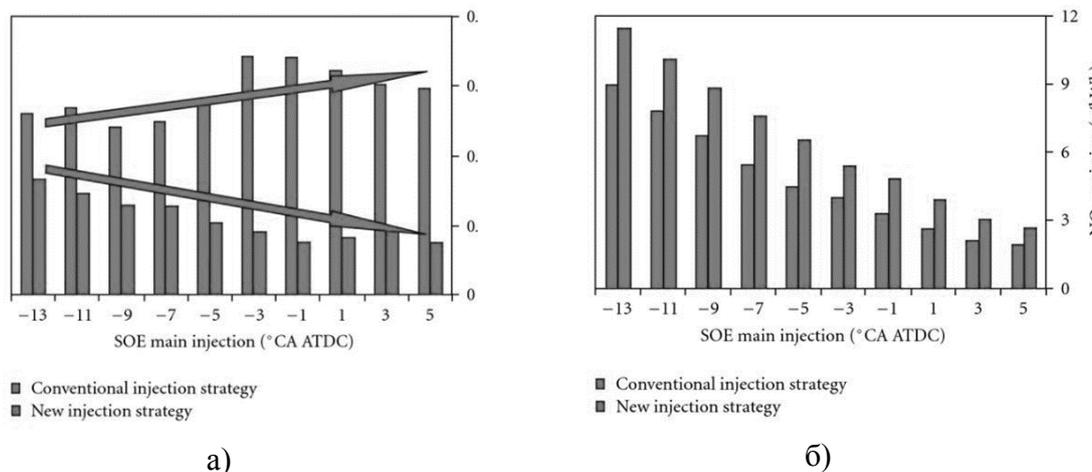


Рис. 3 Количество сажи и выбросы NOx с: а) изменением временного сдвига впрыска и б) 0% рециркуляции отработанных газов.

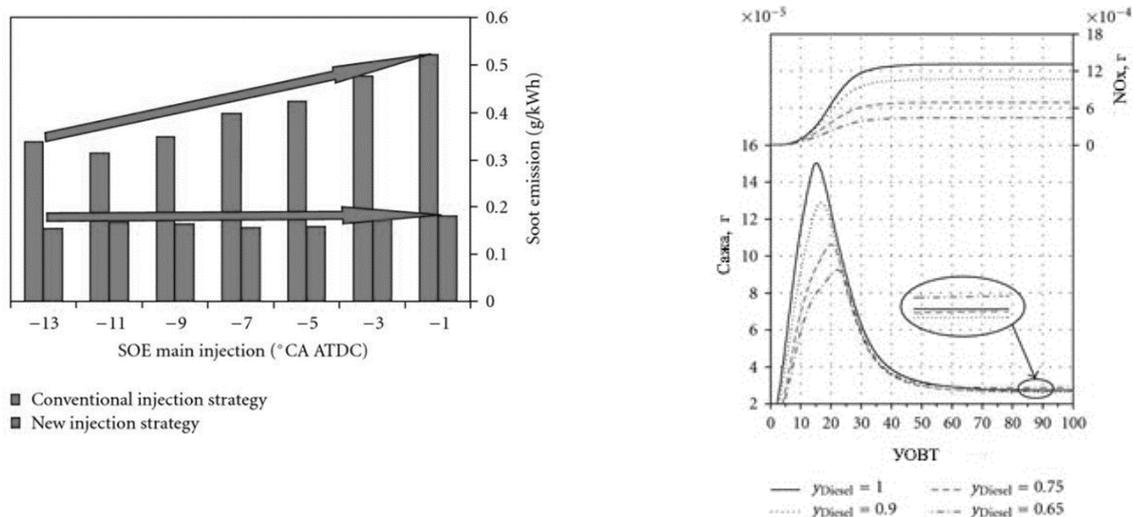


Рис. 4. Выбросы сажи с изменением во временном сдвиге впрыске и при 35% рециркуляции отработавших газов.

Рис.5. Динамика изменения концентрации сажи и NOx от угла опережения впрыска топлива для различных видов топлива.

На рисунке 5 показаны в динамике изменения концентрации оксидов азота и твердых частиц сажи, по которому видно, что образование этих компонентов отработавших газов двигателей транспортных средств резко уменьшается с увеличением содержания воды в топливной смеси.

Библиографический список:

1. **G. Stiesch and G. P. Merker**, Technische Verbrennung, Motorische Verbrennung, B. G. Teubner, Stuttgart, Germany, 1999.

2. **J. Schlütter**, “Saubere Luft macht Forschern Sorge,” Internetartikel des Spiegel-Magazins, 2005.

3. **H. Bockhorn, Soot Formation in Combustion: Mechanisms and Models**, Springer Series in Chemical Physics, Springer, Heidelberg, Germany, 1994.

4. **M. Badami, F. Millo, F. Mallamo, and E. E. Rossi**, “Influence of multiple injection strategies on emissions, combustion noise and BSFC of a DI common-rail diesel engine,” SAE paper 2002-01-0503, 2002.

5. **H. Kubach**, Ionenstrom als Sensorsignal der dieselmotorischen Verbrennung, dissertation, Logos, Universität Karlsruhe (TH), Berlin, Germany, 2004.

6. **A. Velji**, “Stand der Technik: Rußbildung und –oxidation,” in Proceedings of the FVV Workshop Ruß- und Schadstoffentstehung sowie Abgaskatalyse in Modernen Verbrennungsmotoren, Frankfurt, Germany, 2005.

7. **M. Houben and G. Lepperhoff**, “Soot formation in local zones of fuel/burned gas-mixture in diesel engines,” in Proceedings of the 19th International Congress on Combustion Engines, Florence, Italy, 1991.

8. **K. Mayer**, Pyrometrische Untersuchung der Verbrennung in Motoren mit Common-Rail-Direkteinspritzung mittels einer erweiterten Zwei-Farben-Methode, dissertation, Logos, Universität Karlsruhe (TH), Berlin, Germany, 2000.

9. **M. Hopp**, Untersuchung der Rußoxidation unter dieselmotorischen Randbedingungen, dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH), Aachen, Germany, 2001.

10. **E. Müller, T. Raatz, and A. Groenendijk**, “Homogene dieselerverbrennung - die Lösung des NO_x-partikel-problems?” in Proceedings of the 4th Dresdner Motorenkolloquium, Dresden, Germany, May-June 2001.

11. **Деундяк Д.В., Белушкина Г.В.** Инструментальный контроль за эмиссией сажи в рабочую зону автотранспортных предприятий Техносферная безопасность. 15-й Выпуск. Международная научно-практическая конференция. Ростов-на-Дону, РГСУ, 2013г.

Bibliography:

1. **G. Stiesch and G. P. Merker**, Technische Verbrennung, Motorische Verbrennung, B. G. Teubner, Stuttgart, Germany, 1999.

2. **J. Schlütter**, “Saubere Luft macht Forschern Sorge,” Internetartikel des Spiegel-Magazins, 2005.

3. **H. Bockhorn, Soot Formation in Combustion: Mechanisms and Models**, Springer Series in Chemical Physics, Springer, Heidelberg, Germany, 1994.

4. **M. Badami, F. Millo, F. Mallamo, and E. E. Rossi**, “Influence of multiple injection strategies on emissions, combustion noise and BSFC of a DI common-rail diesel engine,” SAE paper 2002-01-0503, 2002.

5. **H. Kubach**, Ionenstrom als Sensorsignal der dieselmotorischen Verbrennung, dissertation, Logos, Universität Karlsruhe (TH), Berlin, Germany, 2004.

6. **A. Velji**, “Stand der Technik: Rußbildung und –oxidation,” in Proceedings of the FVV Workshop Ruß- und Schadstoffentstehung sowie Abgaskatalyse in Modernen Verbrennungsmotoren, Frankfurt, Germany, 2005.

7. **M. Houben and G. Lepperhoff**, “Soot formation in local zones of fuel/burned gas-mixture in diesel engines,” in Proceedings of the 19th International Congress on Combustion Engines, Florence, Italy, 1991.

8. **K. Mayer**, Pyrometrische Untersuchung der Verbrennung in Motoren mit Common-Rail

9. Direkteinspritzung mittels einer erweiterten Zwei-Farben-Methode, dissertation, Logos, Universität Karlsruhe (TH), Berlin, Germany, 2000.

10. **M. Hopp**, Untersuchung der Rußoxidation unter dieselmotorischen Randbedingungen, dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH), Aachen, Germany, 2001.

11. **E. Müller, T. Raatz, and A. Groenendijk**, “Homogene dieselverbrennung - die Lösung des NO_x-partikel-problems?” in Proceedings of the 4th Dresdner Motorenkolloquium, Dresden, Germany, May-June 2001.

12. **D Deundyak, G Belushkina**, Instrumental control of the emission of soot into the working area of road transport enterprises Technosphere safety. 15th Edition. International scientific-practical conference. Rostov-on-Don, RGSU, 2013.

УДК 628.517.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УРОВНЕЙ УСКОРЕНИЙ НА КОЖУХАХ ТЯГОВЫХ ПЕРЕДАЧ И БУКСАХ ЭЛЕКТРОВЗОВ

С.Д. Сарыев¹, Д.С. Голубничая¹

¹ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», г. Ростов-на-Дону, Россия

Объект испытаний – двенадцатиосный магистральный электровоз переменного тока серии ЗЭС5К с осевой формулой $3(2_0 - 2_0)$ и конструкционной скоростью 110 км/ч. В первой ступени рессорного подвешивания установлены цилиндрические винтовые пружины сжатия. Во второй ступени рессорного подвешивания установлены опоры типа «флексикойл» (по 4 опоры на каждой тележке). Каждая ступень рессорного подвешивания оборудована гидравлическими демпферами. Для передачи тяговых и тормозных усилий от тележек к кузову применены цельные наклонные тяги. На тележках электровоза применены опорно-осевые колесно-моторные блоки с передаточным отношением зубчатой передачи $i = 4,19$ (88:21). Нагрузка от колесной пары на рельсы, в соответствии с ИДМБ 661142.009ТУ (ЗТС.001.012ТУ) составляет 235 ± 5 кН.

Целью испытаний являлось проведение измерений вертикальных и горизонтальных поперечных ускорений кожухов зубчатых передач и букс пары колесной с электродвигателем. Для оборудования акселерометрами была выбрана первая по ходу (направляющая) колесная пара электровоза.

Испытания проводились по программе ДП-04-2013, согласованной с ООО «ПК «НЭВЗ» и утвержденной в ОАО «ВЭлНИИ». При составлении программы испытаний был использован стандарт системы сертификации на федеральном железнодорожном транспорте СТ ССФЖТ ЦТ 15-98 «Тяговый подвижной состав. Типовая методика динамико-прочностных испытаний локомотивов».

Подготовительные работы по оборудованию узлов ходовой части испытуемого электровоза акселерометрами проводились на производственных площадях ремонтного депо Вихоревка. Поездка с проведением измерений проводилась на эксплуатационных участках железнодорожного пути Восточно – Сибирской железной дороги по маршруту: ст. Вихоревка – ст. Лена – ст. Северобайкальск – ст. Таксимо протяженностью около 1200 км.

Установка акселерометров производилась на буксу первой колесной пары, на кожух зубчатой передачи (КЗП) и на буксу моторно-осевого подшипника (МОП). На КЗП

акселерометры были установлены в двух местах: на боковине под осью колесной пары (для измерения вертикальных и горизонтальных поперечных ускорений) и в торце под шестерней (для измерения вертикальных и горизонтальных поперечных ускорений). На буксе МОП был установлен один акселерометр под осью колесной пары для измерения вертикальных ускорений. Для измерения вертикальных ускорений на буксе колесной пары акселерометр был установлен на верхней части крышки. Всего для испытаний использовалось 6 акселерометров. Схема расположения акселерометров показана на Рис. 1, 2.

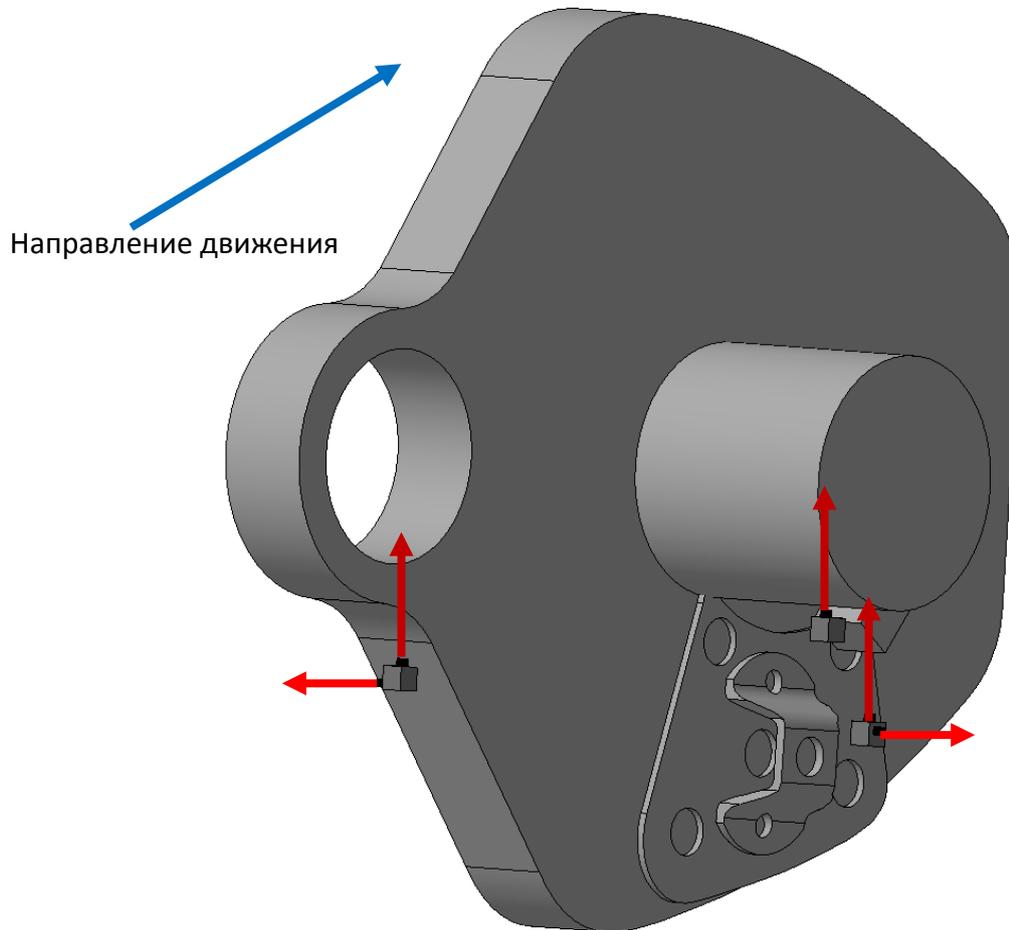


Рис. 1 – Расположение акселерометров на кожухе зубчатой передачи и буксе моторно-осевого подшипника

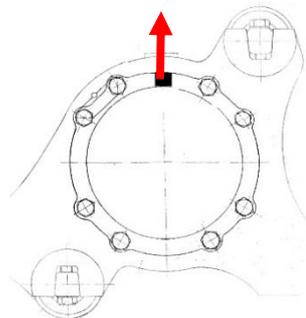


Рис. 2 – Расположение акселерометра на буксе

Сведения о средствах испытаний, применяемых при выполнении измерений, приведены в таблице 1. Средства измерений, используемые при проведении испытаний, поверены в соответствии с ПР 50.2.006 «Порядок поведения поверки средств измерений».

Таблица 1 – Средства испытаний

Наименование показателя, определяемые характеристики	Наименование, марка испытательного оборудования и средств измерений
Ускорения на буксах и кожухе зубчатой передачи	Измерительно-вычислительный комплекс МИС-036 с модулями МС-212. Акселерометры TML моделей ARF-100А (диапазон измерения от минус 100 до плюс 100 м/с ² , на частотах от 0 до 180 Гц), ARF-200А (диапазон измерения от минус 200 до плюс 200 м/с ² , на частотах от 0 до 310 Гц) и ARE-1000А (диапазон измерения от минус 1000 до плюс 1000 м/с ² , на частотах от 0 до 1300 Гц). Все модели акселерометров выдерживают перегрузку в трехкратном размере.

Регистрация динамических процессов при ходовых испытаниях производилась со скорости 30 км/ч до максимальной скорости, разрешенной на эксплуатационных участках (80 км/ч) с шагом 10 км/ч. Поезд для проведения испытаний состоял из электровоза ЗЭС5К-160, пассажирского вагона и вагона-путеизмерителя типа КВЛ-П1МП, принадлежащего Восточно-Сибирской железной дороге – филиалу ОАО «РЖД». Причем от ст. Вихоревка до ст. Лена электровоз ЗЭС5К-160 следовал одиночно, после чего к нему были присоединены два указанных выше вагона. Схема поезда приведена на рисунке 3.

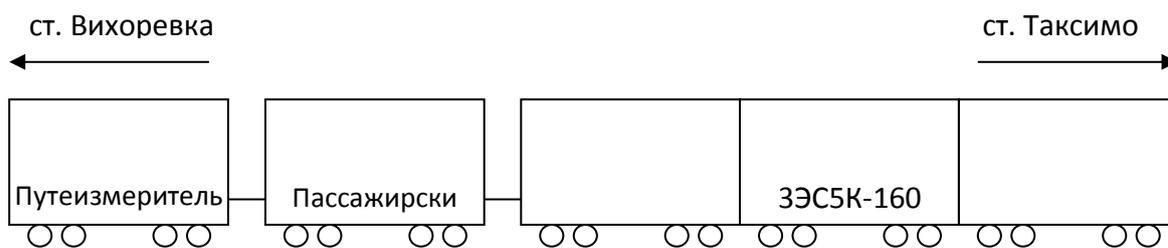


Рис. 3 – Схема поезда

Во время экспериментальной поездки было выполнено несколько остановок (на 745, 746, 764, 794, 1335, 1416 и 1459 километрах) для осмотра состояния пути. На рисунках 4–10 представлены фотографии, демонстрирующие состояние рельсовых стыков. Данные по стыкам сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Зазоры между рельсами

Участок пути	Километр	Зазоры в стыке, мм	Температура окружающего воздуха, °С
Лена – Северобайкальск	745	12, 0, 12, 8, 3, 0, 0, 22, 20	0
	746	17, 20	
	764	7, 14, 3, 0, 0, 10, 10	
	794	14, 7, 9, 17, 9, 7, 17, 8, 10, 10, 7, 13, 19	
Северобайкальск – Таксимо	1335	4, 0, 3, 0, 23, 5, 4	0
	1416	1, 13, 9, 21, 2, 10, 16, 0, 1, 0, 0, 12, 20, 0, 6, 13, 23, 3	
	1459	15, 9, 12, 14, 0, 13, 25, 4, 12, 14, 9, 9, 8	

При обработке зарегистрированных данных весь пройденный в опытной поездке путь был разбит на 5 участков, основываясь на качественном состоянии пути. Характеристика и особенности состояния пути сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Характеристики участков пути

№ п/п	Участок пути	Протяженность, км	Оценка состояния пути по данным вагона-путьеизмерителя типа КВЛ-П1МП
1	ст. Вихоревка – ст. Лена	450	–
2	ст. Лена – ст. Северобайкальск	340	«хорошо», «отлично»
3	ст. Северобайкальск – ст. Таксимо	380	«хорошо», «отлично»
4	Мосты, туннели и плотина	–	–
5	Бесстыковой путь (на выходе ст. Северобайкальск)	45	–

Примечание: На участках под номерами 1, 4 и 5 замеры вагоном-путьеизмерителем не проводились.

На мостах, туннелях, а также на участке с бесстыковым путем, состояние пути было значительно лучше.

Типичная запись процессов показана на рисунке 11. Здесь приведен пример записи процессов на скорости 60 км/ч. Пиковые значения на приведенных процессах возникают через каждые 1,5 секунды. Учитывая скорость движения и длину рельсов на эксплуатационном участке (25 м), можно сделать вывод, что импульсы ускорений – это результат воздействия на экипаж рельсовых стыков. Таким образом, напряженное состояние КЗП формируется в результате воздействия со стороны пути на стыковых неровностях.

В ходе обработки данных была произведена фильтрация процессов, основываясь на частотных характеристиках используемых акселерометров. В качестве оценочных значений брались пиковые значения процессов, полученные на отрезках пути протяженностью 50 м. Разбиение записей на отрезки происходило путем задания временного интервала, на котором выбирался максимум, основываясь на скорости движения поезда.

Максимальные значения ускорений в местах установки акселерометров, зарегистрированные на различных участках, приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Максимальные значения ускорений

Участок	Значения ускорений, м/с ²					
	Букса	МОП	Вертикальн ые на кожухе под осью	Горизонталь ные на кожухе под осью	Вертикальн ые на кожухе под шестерней	Горизонталь ные на кожухе под шестерней
Вихоревка – Лена	596,2	428,0	269,0	195,1	304,0	101,3
Лена – Северобайкальск	496,7	454,7	298,3	210,8	406,8	119,4
Северобайкальск – Таксимо	521,4	351,8	233,0	176,1	256,9	125,8
Мосты, туннели, плотина	351,5	329,8	215,2	182,2	238,7	88,7
Бесстыковой путь	192,0	166,3	78,3	70,6	82,5	33,2

По таблице видно, что на мостах, туннелях и участке с бесстыковым путем, уровень ускорений был заметно ниже.

Характер записей показал, что на стыках получен высокий уровень ускорений, т.е. основным воздействующим фактором на КЗП является воздействие рельсовых стыков.

Уровень полученных при испытаниях ускорений превышает максимально допустимый уровень виброускорений (150 м/с^2) для группы механического исполнения М27 в соответствии с ГОСТ 17516.1–90 «Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам».

Результаты обработки экспериментальных данных представлены на рисунке 4.

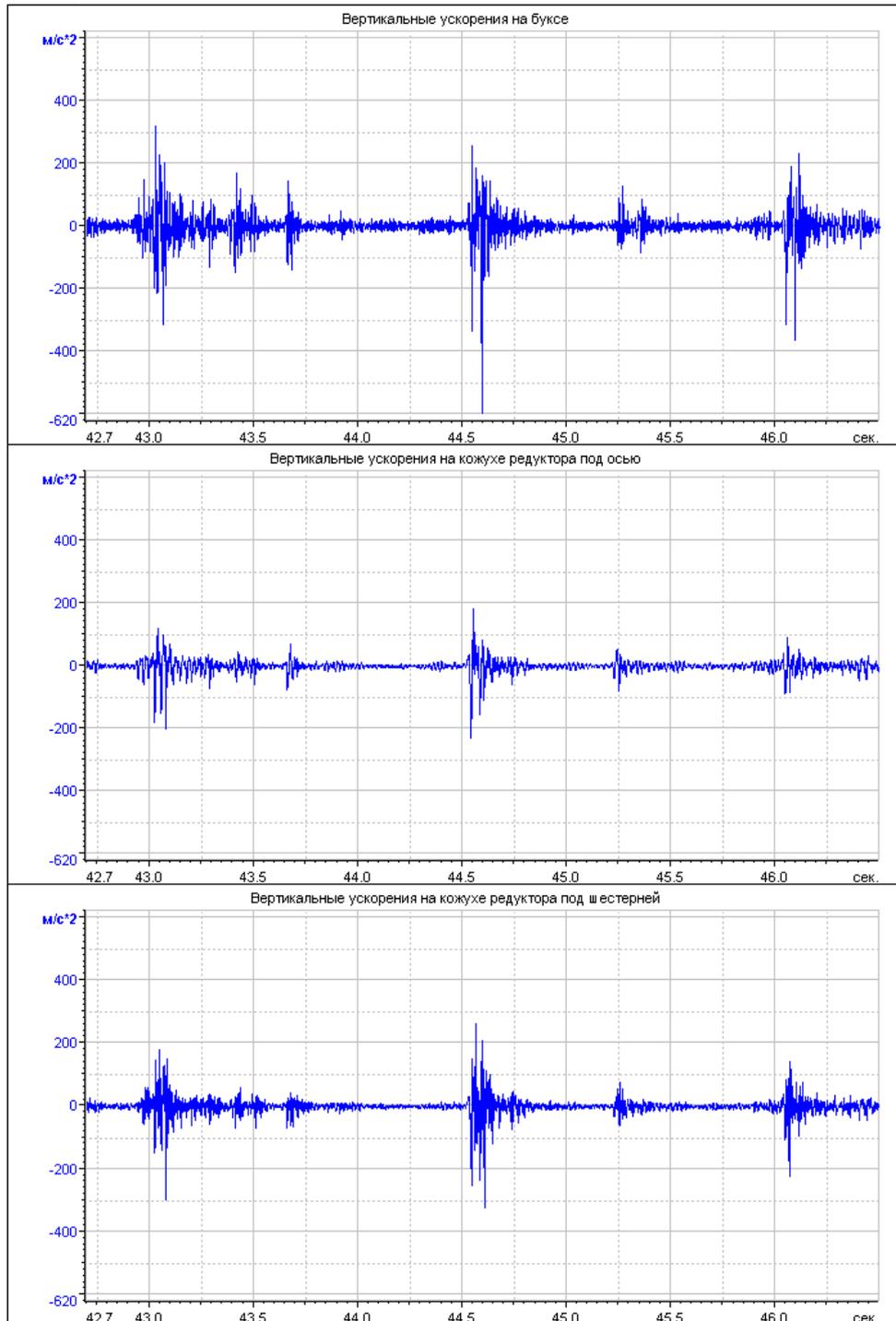


Рис. 4 – Пример записи процессов

УДК 621.9-113.1

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ СИСТЕМ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ УПРОЧНЕНИЯ КОЛЕСНЫХ ПАР И ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ СВЕРЛИЛЬНОЙ ГРУППЫ

Н.И. Стуженко¹, М.В. Ермолов²¹ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, Россия²ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», г. Ростов-на-Дону, Россия

Несмотря на различия технологических процессов шарико-стержневого упрочнения и при сверлильных операциях параметры систем безопасности операторов могут быть выполнены с единых позиций.

В настоящее время обработка поверхностей катания узлов колесных пар выполняется на специальных колесотокарных станках. Технологический процесс ШСУ является намного более эффективным, т.к. обеспечивает не только повышение производительности обработки, но и повышает износостойкость катания.

Несмотря на то, что экспериментальные исследования шума при упрочнении осей колесных пар выполнялись на базе специального осетокарного станка, эта технологическая операция может быть реализована и на колесотокарном станке.

В ряде случаев оборудование упрочняющих технологий, таких как виброударное, центробежно-ротационный наклон и шарико-стержневое упрочнение располагают в отдельных производственных помещениях (рис. 1).

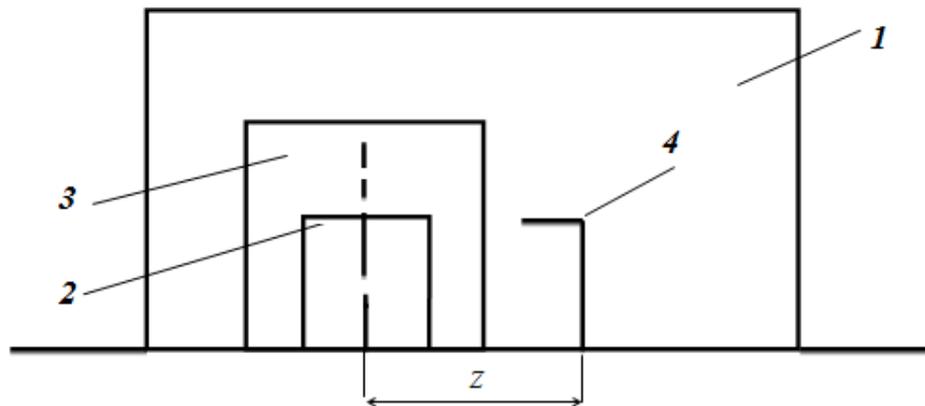


Рис. 1. Расчетная схема уровней звукового давления: 1 – производственное помещение; 2 – технологическое оборудование; 3 – система звукоизоляции; 4 – рабочее место

Определение уровней звукового давления в производственном помещении (в особенности соразмерном) основано на данных работ [1, 2]

$$L = L_M + 10 \lg \left(\frac{\chi_o}{S_{об}} + \frac{4\Psi_{об}}{B_{об}} \right) - 3И + 10 \lg \frac{S_{об}}{\chi_{об}} + 10 \lg \left(\frac{\chi_{об}}{S_{об}} + \frac{4\Psi_{П}}{B_{П}} \right), \quad (1)$$

где $\Psi_{П}$ и $\Psi_{об}$ – коэффициенты диффузности производственного помещения и звукоизолирующей оболочки;

$B_{об}$ и $B_{П}$ – постоянные пространства под звукоизолирующей оболочкой и производственного помещения;

$\chi_{об}$ и χ_o – коэффициенты искажения поля оболочки и поправка на ближнее поле между оборудованием и звукоизолирующей оболочкой.

Индексы o , $об$ и $П$ – относятся к оборудованию, звукоизолирующей оболочке и производственному помещению (соответственно) учитывая соотношения расстояния до расчетной точки и размеры оборудования по данным работы [1] принято $\chi_{П} = 4$; $\psi_{П} = 1 - 0,3 \frac{B}{S}$ для производственного помещения и $\chi_{об} = 4$; $\psi_{об} = 0,55$ для звукоизолирующей оболочки.

Учитывая, что в производственном помещении должны быть выполнены санитарные нормы, а также известные соотношения между уровнями звуковой мощности и звукового давления, выражение (1) приведено к следующему виду:

$$L_C = L_P - 10 \lg z + 10 \lg \frac{1,2 + \alpha_{об}}{\alpha_{об}} + 10 \lg \frac{S_{об}(1 - \alpha_{П})}{\alpha_{П} S_{П}} + 10 \lg k - 3И - 3$$

где L_C – октавные предельно-допустимые уровни звукового давления, дБ; L_P – уровни звукового давления источника, дБ; $3И$ – звукоизоляция системы шумозащиты, дБ; k – количество станков на участке.

Из данного выражения и определяется звукоизоляция системы шумозащиты

$$3И = L_P - L_C - 10 \lg z + 10 \lg \frac{1,2 + \alpha_{об}}{\alpha_{об}} + 10 \lg \frac{S_{об}(1 - \alpha_{П})}{\alpha_{П} S_{П}} + 10 \lg k - 3$$

Конструкция системы шумозащиты основана на следующих требованиях:

- звукоизолирующая конструкция не должна мешать удобству в эксплуатации станка и контролю за технологическим процессом шарико-стержневого упрочнения;
- конструктивные и физико-механические параметры системы шумозащиты должны обеспечить санитарные нормы звукового давления в рабочей зоне операторов;
- конструкция должна быть технологичной в изготовлении, сборке, монтаже на колесотокарном станке и затраты на его изготовление должны быть незначительными в сравнении со стоимостью узла колесной пары;
- звуковое излучение системы шумозащиты должно быть меньше предельно-допустимых уровней звукового давления.

Применительно к объекту исследования вышеуказанные положения сводятся к следующему. Учитывая, что уровни звукового давления несущей системы станка существенно ниже санитарных норм, звукоизолирующая конструкция должна снизить уровни шума самого упрочняемого изделия, упрочнителя и компрессора. Система шумозащиты должна обладать высокой степенью герметизации. Предпочтение отдается отечественным материалам. Поскольку известен частотный диапазон, в котором уровни звукового давления превышают нормативные величины и величины превышений, то достижение в рабочей зоне санитарных норм практически обеспечивается толщиной стенок системы шумозащиты. Для визуального контроля за технологическим процессом в звукоизолирующей конструкции предусматриваются смотровые окна. В этом случае фактическая звукоизоляция оценивается по известной формуле [3]:

$$3И = 3И_{П} - \Delta 3И_{П},$$

где

$$\Delta 3И_{П} = 10 \lg S_{П} + \sum_{i=1}^k S_i \cdot 10^{0,1(3И_{П} - 3И_i)}$$

здесь $S_{П}$ и $3И_{П}$ – суммарная площадь основной конструкции (m^2) и ее звукоизоляция, дБ; S_i и $3И_i$ – площадь элементов (m^2) с пониженной звукоизоляцией и величина звукоизоляции (дБ) этих участков; k – количество элементов с пониженной звукоизоляцией.

$$S = S_{II} + \sum_{i=1}^k S_i$$

Звуковое излучение самой системы шумозащиты создается одновременным воздействием воздушной и структурной составляющими шума. Первая составляющая определяется воздействием звукового поля под звукоизолирующей конструкцией и возбуждается звуковым излучением самого источника. Вторая составляющая – неизбежной передачей вибраций от упрочняемого изделия и несущей системы станка. Поэтому для основной конструкции предусматриваются вибропоглощающие и звукопоглощающие материалы.

Отметим, что система шумозащиты колесотокарного станка, подробно рассмотренная в работе [4] и основанная в большей степени на эффекте вибропоглощения, не обеспечила выполнение санитарных норм шума в рабочей зоне при обточке поверхностей катания колесных пар. Поэтому дополнительно предлагается акустический экран и акустическая облицовка потолка производственного помещения.

Поскольку уровни звукового давления при шарико-стержневом упрочнении существенно выше, чем при токарной обработке, в особенности в высокочастотной части спектра, то разработанная система шумозащиты в общей степени выполняет функцию звукоизоляции, но имеет и вибропоглощающие элементы.

Основное отличие в опасных и вредных факторах в рабочей зоне операторов станков сверлильной группы заключается в том, что помимо превышений уровней звукового давления значительно превышаются предельно-допустимые концентрации пыли. Кроме этого у станков сверлильной группы количество шпинделей достигает 12. Частоты вращения составляют 2800 об/мин у станков 3-12 шпиндельных, а у одношпиндельных – 4500 об/мин. Поэтому уровни звукового давления над нормативными величинами превышают на 20-22 дБ в высокочастотной части спектра. Концентрации же пыли составляют 12-24 мг/м³ при нормативе 4 мг/м³. Таким образом, концентрации пыли превышают предельно-допустимые в 3-6 раз. Сама компоновка станка ограничивает вариативность конструкций безопасности труда и фактически сводит к ограждениям зоны обработки со значительной степенью герметизации, что и позволяет снизить концентрации пыли в рабочей зоне операторов.

Расчет же звукоизоляции и выбор материалов может быть выполнен согласно зависимостям, приведенным выше, что фактически и определяет универсальность акустического расчета систем снижения шума для оборудования шарико-стержневого упрочнения и деревообрабатывающих сверлильных станков.

Библиографический список:

1. **Борисов Л.П., Гужас Д.Р.** Звукоизоляция в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1990. – 250 с.
2. **Чукарин А.Н.** Теория и методы акустических расчетов и проектирования технологических машин для механической обработки // А.Н. Чукарин. – Ростов н/Д: Изд. центр ДГТУ, 2005. – 152 с.
3. **Иванов Н.И.** Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник. – М.: Университетская книга, Логос, 2008. – 424 с.
4. **Кучеренко А.П.** Модель виброакустической динамики резца при точении крупногабаритных заготовок / А.П. Кучеренко, А.Н. Чукарин // Вестник РГУПС. – 2010. – №1. – С. 39-43.

Bibliography:

1. **Borisov L.P., Guzhas D.R.** Soundproofing in mechanical engineering. Moscow: Engineering, 1990. - 250 p.
2. **Chukarin A.N.** Theory and methods of acoustic calculations and design of technological machines for machining // A.N. Chukarin. Rostov-on-Don: Ed. Center DSTU, 2005. – 152 p.

3. **Ivanov N.I.** Engineering acoustics. Theory and practice of noise control: a textbook. Moscow: University Book, Logos, 2008. – 424 p.

4. **Kucherenko A.P.** Model vibro-acoustic dynamics tool for turning large workpieces / A.P. Kucherenko, A.N. Chukarin // Herald RSTU. 2010. №1. pp. 39-43.

УДК 621.9:628.517.2

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДАВЛЕНИЯ ШУМА НА СОРТИРОВОЧНЫХ КОМПЛЕКСАХ

М.М. Шестаков, Р.А. Корниенко, А.С. Сидельников
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей
сообщения» г. Ростов-на-Дону, Россия

Обеспечение экологической чистоты машин и механизмов в частности снижения уровней шума и вибраций до и ниже уровней санитарно-эпидемиологических норм и требований на данный момент является одним из наиболее важных вопросов, стоящих на сегодняшний день.

Ученые проанализировали влияние звуков, которые издают летательные аппараты, на человеческое здоровье. Исследование проводилось под руководством коллектива специалистов Бостонского университета и Гарвардской школы общественного здравоохранения. Местом для эксперимента выбран лондонский аэропорт Хитроу, а объектами – лондонцы, которые проживают в непосредственной близости к нему.

В результате выяснились такие закономерности: каждые 10 децибел шума прибавляют 4% риска к подверженности сердечно-сосудистым заболеваниям. А если учитывать, что некоторые люди ежедневно вынуждены слышать шумы около 55-64 децибел, то и уровень госпитализации среди них был, соответственно, выше.

Так, например, в процессе работы сортировочных горок сети ОАО «РЖД» при взаимодействии рабочих органов фрикционных замедлителей типа ВЗПГ с колесами сортируемых грузовых вагонов возникают интенсивные фрикционные автоколебания.

В связи с тем, что в спектре частот фрикционных автоколебаний преобладают узкополосные шумы – частоты которых находятся в наиболее чувствительном для человеческого уха диапазоне необходимо разработать эффективные мероприятия по снижению интенсивности выше названных шумов до значений не превышающих санитарных норм. Для решения данной трибологической задачи на базе методов физико-математического моделирования были выполнены модельные исследования по созданию и оптимизации рецептур ряда шумоподавляющих модификаторов трения (МПТ-Ф). На базе комплексного долеоктавного анализа данных эксплуатационных испытаний по спектрам фрикционных автоколебаний и упруго-диссипативным составляющим трибоспектров были выбраны шумоподавляющие композиции, обладающие максимальным шумоподавляющим эффектом на проблемных диапазонах частот шумового воздействия.

Ключевые слова: фрикционные автоколебания, уровень шума, трение, вибрация, сортировочные горки, физико-математическое моделирование.

Keywords: friction oscillations, noise, friction, vibration, sorting slides, physical and mathematical modeling.

Была разработана технология подавления шума которая коренным образом отличается от технологий монополиста в области создания технологий и технического оборудования по подавлению шума BREMEX – ANNSYS. Их мультиактивные рельсозащитные системы основаны на технологии WONROS™ (Wear Out and Noise

Reduction On Source – Уменьшение износа и шума на источнике), которая позволяет уменьшить:

- шум, возникающий при контакте между рельсами и колесами;
- износ рельсов и реборды колеса;
- GCC (образование трещин на внутренней боковой поверхности рельсов);
- RCF (образование внутренних контактно-усталостных дефектов в металле);
- волнообразный износ рельсов (образование выбоин)

Противошумовая система для рельсовых тормозов BREMEX ANNSYS – это запатентованная система, которая может применяться на сортировочных горках, сортировочных станциях и маневровых стрелках.

Система BREMEX-ANNSYS может быть использована с фрикционными замедлителями пневматического или гидравлического типа.

В отличие от выше названной технологии с учетом того, что контакт тормозных шин балочных замедлителей с боковыми поверхностями колес грузовых вагонов является открытым узлом трения, были выбраны соответствующие смазочные материалы наиболее эффективные для открытых узлов трения – твердые смазочные покрытия.

Наиболее распространенными способами для нанесения смазочных покрытий был выбран ротопринтно – контактный. Твердые смазочные покрытия обладают максимальным уровнем диссипации энергии, а наносимый слой измеряется десятками долями микрона, при этом обеспечивает минимальный расход смазочного материала при максимальном эффекте шумоподавления.

Технология ротопринтно – контактного способа нанесения обеспечивает нанесение строго расчетного объема материала на рабочую поверхность, исключает замазывание подвижного состава и элементов верхнего строения пути. Были разработаны ряд вариантов шумоподавления композиций, которые обеспечивают эффективное шумоподавление при обеспечении коэффициента трения не менее 0,1, что обеспечивает работу балочных замедлителей в штатном режиме.

Данные материалы прошли испытание по схеме ручного модифицирования.

Модифицирования боковых поверхностей колес вагонов в «ручном» режиме.

1. Реализуется три схемы
 - а. Нанесение шумоподавляющего материала на внешнюю боковую поверхность колеса (колес) вагона.
 - б. Нанесение шумоподавляющего материала на внутреннюю боковую поверхность колеса (колес) вагона.
 - в. Нанесение шумоподавляющего материала на внешнюю и внутреннюю боковую поверхности колеса (колес) вагона.
2. Вид обработанной поверхности.



Рис. 1 – ручное модифицирование колес вагонов

3. Схема ручного модифицирования боковых поверхностей колес вагонов.

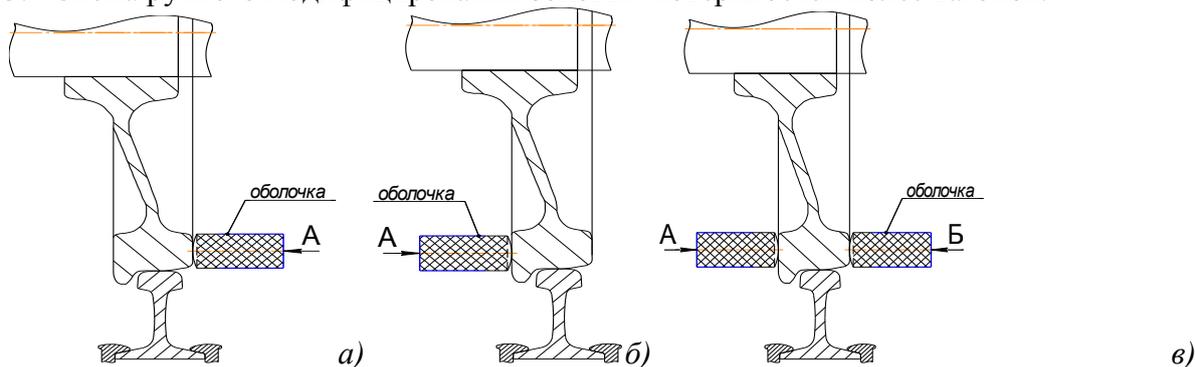


Рис. 2 - Схема ручного модифицирования боковых поверхностей колес вагонов

В результате выполненной работы мы получили следующие данные:

Исследования по разработке технологического оборудования для подавления шума фрикционных автоколебаний при работе фрикционных замедлителей были проведены испытания по замеру уровня шума при роспуске вагонов на сортировочной станции города Батайск.

В результате проведенного 1/12-долеоктавного анализа шумов, возникающих при сортировке грузовых вагонов на механизированных сортировочных горках ст. Батайск Северо-Кавказской железной дороги, было установлено: высокий уровень шума наблюдается на частотах, выше 2000 Гц. На рисунке 3 представлены результаты измерений среднего значения уровня шума и его среднеквадратичного отклонения (СКО).



Рис. 3 – Результаты измерений среднего значения уровня шума и его среднеквадратичного отклонения.

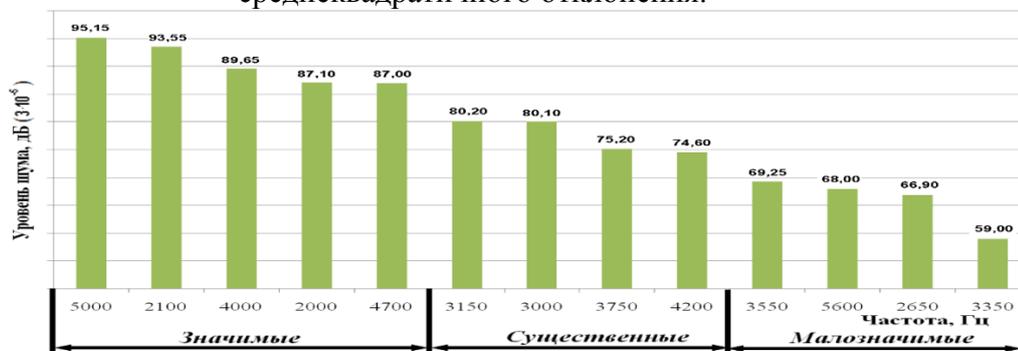


Рис. 4 – Ранжирование частот по уровню шумового воздействия на окружающую среду.

Используя метод ранговой корреляции выявлены значимые, существенные и малозначимые октавные частоты по уровню шумового воздействия на окружающую среду. Результаты представлены на рисунке 4.

Процессы трения колес вагона о рабочие органы вагонных замедлителей сопровождаются шумом и вибрацией с большими амплитудами и максимальной мощностью звука в диапазоне частот около 5000 Гц, что воспринимается как раздражающий скрежет. Измерения показали, что пиковая громкость звука достигает 150 дБ. Сопутствующее высокое звуковое давление может привести к травме органов слуха у людей, находящихся в непосредственной близости от тормозных рельсов (вагонных замедлителей), оказывая также раздражающее воздействие на окружающую среду.

Полученные измерения позволили сделать вывод, что уровень шума на значимых и существенных частотах, превышает предельно допустимые нормы и как следствие является опасным для человека.

Так же были проведены испытания с использованием электропривода о нем вы можете узнать в статье авторов В.В. Шаповалов, И.А. Майба, Р.М. Муртазаалиев, Р.А. Корниенко «Импортозамещающая технология подавления шума на сортировочных комплексах».

В связи с вышесказанным можно судить о том, что неразрывно существует связь между фрикционной динамической системой пары трения «колесо вагона - вагонный замедлитель» на сортировочных станциях и возникновением высокочастотного шумового эффекта, который необходимо понизить путем введения антифрикционных смазочных материалов в контакт для комфортного нахождения вблизи сортировочных станций. Для решения поставленной задачи учеными РГУПС проанализированы и созданы новое технологическое оборудование для снижения уровня шума и доведение его до и ниже уровней допустимых санитарных норм, в частности на сортировочных горках. На рисунке 5 представлена схема устройства для подавления шума с пневмоцилиндрами, возникающего при взаимодействии колес грузовых вагонов с рабочими органами (балками) фрикционных замедлителей вагонов типа ВЗПГ – рисунок 6.

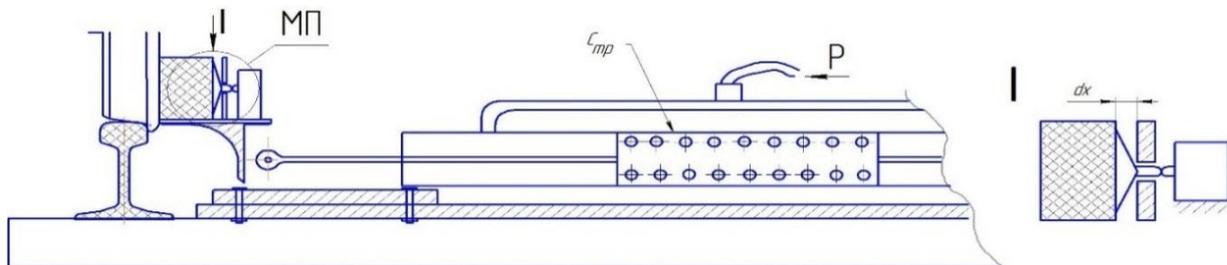


Рис. 5 – Пневматическое устройство для нанесения модификатора трения

$$P_1 - P_2 = P_3$$

$$P_1 = C_{\text{пр}} \cdot \Delta x - \text{Сила сжатия пружины}$$

$$P_2 = P_{\text{уд1}} \cdot S - \text{Сила пневмоцилиндра}$$

$$P_3 = P_{\text{уд2}} \cdot S - \text{Сила прижатия брикетов МПТ к торцу колеса}$$

Эксплуатационные испытания опытного образца устройства понижения уровня шума, возникающего при взаимодействии боковых поверхностей колёс грузовых вагонов с тормозными шинами вагонных замедлителей, проводились на Северной сортировочной горке ст. Батайск Северо-Кавказской железной дороги.

В результате взаимодействия колёсных пар грузовых вагонов с рабочими органами УНМТ зафиксирован выход фрикционного модификатора поверхности трения МПТ-Ф-03-02 из специальных брикетов на боковые грани колёсных пар, а также формирование модифицирующего покрытия на тормозных шинах ВЗПГ

Устройство для нанесения модификатора трения представляет собой сборную конструкцию, которая монтируется на рельсошпальную решетку по обе стороны рельсов и

прижимает модификатор трения, представляющий собой шину размером 3000x80x20 миллиметра, к боковым поверхностям колес проходящих вагонов. Оптимальная сила прижатия автоматически регулируется при помощи токового реле.

Эксплуатационные испытания опытного устройства для понижения шума на механизированных сортировочных горках по нанесению модификатора поверхности трения на боковые грани колёсных пар грузовых вагонов:

- порожних вагонов № 52264620, № 63641179, № 67632067, № 63864359; - гружёных вагонов № 56313711 массой 69 т., № 53259412 массой 71 т., № 59090084 массой 70,2 т.

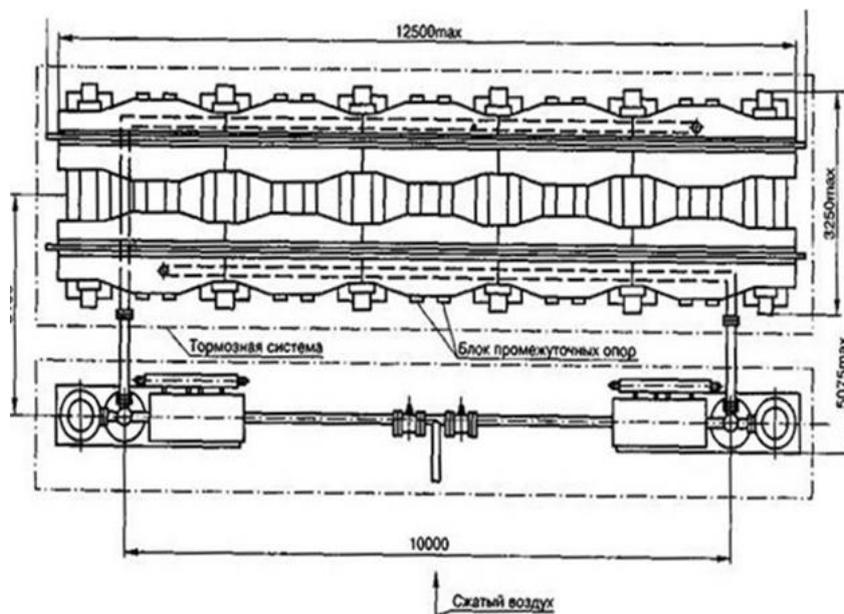


Рис. 6 – Вагонный замедлитель с пневмогидравлическим приводом (ВЗПГ)

Таблица 1 – Октавный анализ шумов, выполненный прибором ЭКОФИЗИКА - 110А при проведении мероприятий по снижению уровня акустических шумов

	Частота, Гц (среднее по 10 замерам)									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
На расстоянии 2 м	56,1	53,4	49,9	48,7	52,3	49,9	51,2	49,4	46,8	40,8
На расстоянии 7,5 м	41,9	44,3	42,8	47,7	52,7	44,6	40,4	41,9	44,3	42,8

Степень демпфирования системы после нанесения на боковую поверхность колес вагонов МПТ-Ф возрастает с 0,1 до 0,4–0,65. Это свидетельствует о значительном снижении амплитуд вибрационных колебаний и времени переходных процессов.

Установлено, что при пропуске исследуемого вагона, а всех трёх тормозных позиций механизированной сортировочной горки было выявлено подавление шума по всем частотным диапазонам до уровня, не превышающего СНИП 23-03-2003.

Аналогичные результаты были проведены и для устройств с электрическим и пневматическим приводом и результаты ты полученные в ходе испытаний полностью совпадали с результатами, представленными в таблице 1.

В результате анализа данных эксплуатационных испытаний были сделаны следующие выводы:

1. Опытная конструкция устройства обеспечивает нанесение необходимого объёма фрикционной композиции на боковую поверхность колёс вагонов, обеспечивая снижение возникающего шума при взаимодействии тормозных шин с боковыми поверхностями колес до величин, не превышающих допустимые нормы по СНИП-23-03-2003.

2. За счёт наличия приёмного устройства и отсутствия связей в горизонтальной плоскости конструкция комплекса хорошо адаптируется (ориентируется) относительно колёс грузового вагона, боковая поверхность которых модифицируется устройством УМПТ.

3. За счёт применения опытного устройства привода подачи МПТ-Ф перед первой тормозной позицией обеспечивается снижение уровней звукового давления и шума с 85...97 дБ до 40...52 дБ в октавных полосах частот до значений, регламентированных СНиП 23-03-2003.

4. Введение в контакт боковых поверхностей колёс грузовых вагонов МПТ-Ф полностью снижает уровень звукового давления и шума с 97...0 дБ на необходимых частотах.

5. Контактный способ нанесения МПТ-Ф обеспечивает надёжную и эффективную работу устройства в широком температурном диапазоне (от -50°C до $+60^{\circ}\text{C}$) и наличии ветровой нагрузки, обеспечивая при этом экологическую чистоту в результате отсутствия эффектов замасливания поверхностей рельсов и подвижного состава.

Библиографический список

1. **Дерягин Б.В., Пуш В. Э., Толстой Д.М.** Теория фрикционных автоколебаний с периодическими остановками. «Труды III Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах», т. II, М, Изд-во АН СССР, 1960, с. 132-152.

2. **Ишлинский А. Ю., Крагельский И.В.** О скачках при трении. ЖТФ т. XIV, вып. 4-5, 1944, с. 276-283.

3. **Демкин Н.Б., Рыжов Э.В.** Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981 г. 244 с.

4. **Крагельский И.В.** Трение и износ. Изд-во 2-е, перераб., М., «Машиностроение», 1968, с. 480

5. **Озябкин А.Л.** Теоретические основы динамического мониторинга фрикционных мобильных систем / А.Л. Озябкин // Трение и смазка в машинах и механизмах – 2011. - № 10. – с. 17-28.

6. **Озябкин, А.Л.** Динамический мониторинг трибосистемы «Подвижной состав – путь» /Озябкин, А.Л./ Вестник РГУПС. Ростов н/Д: РГУПС. – 2011. – № 2. – С. 35–47.

7. **Лубягов А.М.** Превращение энергии при стационарно сортировочных работах / Лубягов А.М., Корниенко Р.А., Шестаков М.М.// Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт-2014» - Ростов н/Д, Часть 2. 2014, с 95.

Bibliography:

1. **Deryagin B. V., Push V. E., and Tolstoy, D. M.**, Theory of friction auto-oscillations with periodic stops. "Proceedings of the III all-Union conference on friction and wear in machines", t. II, M, Izd-vo an SSSR, 1960, pp. 132-152.

2. **Ishlinskii, Kragelsky I. V.** About the races in friction. Russian J. T. XIV, vol. 4-5, 1944, p. 276-283.

3. **Demkin N. B., Ryzhov E. V.** surface Quality and contact of machine parts. M.: Mashinostroenie, 1981, 244 p.

4. **Kragelsky I. V.**, Friction and wear. Publishing house 2-e, Rev., M., "engineering", 1968, p. 480

5. **Oziabkin A. L.** the Theoretical basis of dynamic monitoring of friction mobile systems / A. L. Oziabkin // Friction and lubrication in machines and mechanisms – 2011. - No. 10. – p. 17-28.

6. **Oziabkin, A. L.** Dynamic monitoring of the tribological system "Rolling stock – path" /Oziabkin, A. L./ Vestnik RGUPS. Rostov n/D: RSTU. – 2011. – No. 2. – S. 35-47.

7. **Lubagov A. M.** The Transformation of energy at the station sorting / Lubagov A. M., Kornienko R. A., Shestakov M. M.// Proceedings of International scientific-practical conference "Transport-2014" - Rostov n/D, Part 2. 2014, 95.

АННОТАЦИИ

УДК 629.4.001.57+06

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОРМОЗНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГРУЗОВОМ ПОЕЗДЕ

Верескун Владимир Дмитриевич

Ростовский государственный университет путей сообщения

2, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, г. Ростов-на-Дону, Россия, 344038

Профессор, доктор технических наук

Тел.: (863) 2-450-613

E-mail: vvd@rgups.ru

Притыкин Дмитрий Евгеньевич

Ростовский государственный университет путей сообщения

2, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, г. Ростов-на-Дону, Россия, 344038

Доцент, кандидат технических наук

Тел.: +7 (918) 573-97-34

E-mail: maisvendoo@gmail.com

Рассматривается процесс торможения грузового поезда. Построена математическая модель механической части поезда совместно с описанием газодинамических процессов, происходящих при работе автоматического тормоза. Проведены вычислительные эксперименты для оценки адекватности точности моделирования тормозных процессов.

Ключевые слова: грузовой поезд, автоматический тормоз, тормозная магистраль, тормозной путь

BRAKING PROCESS SIMULATION OF CARGO TRAIN

Vereskun Vladimir Dmitrievich

Rostov State Transport University

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia 344038

Professor, Doctor of technical science

Phone: (863) 2-450-613

E-mail: vvd@rgups.ru

Pritykin Dmitry Evgenyevich

Rostov State Transport University

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia 344038

Dozent, Candidat of technical science

Phone: +7 (918) 573-97-34

E-mail: maisvendoo@gmail.com

The process of cargo train braking is consider. Mathematical model of train mechanics and brakes gas dynamics is created. Computational experiments are performed for verification and check

accuracy of mathematical model.

Keywords: cargo train, automatical brake, brakepipe, path of braking

УДК 53.08

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ СЛОЁВ ДВУХСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ НА ФУНКЦИЮ ЖЁСТКОСТИ ИНДЕНТИРОВАНИЯ

Айзикович Сергей Михайлович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет»,
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1,
Научно-образовательный центр «Материалы»,
Доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией «Функционально-градиентные и композиционные материалы»,
E-mail: saizikovich@gmail.com

Васильев Андрей Сергеевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского",
Научно-исследовательский институт механики,
603950, Россия, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23,
Научно-образовательный центр «Материалы»,
Кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник,
E-mail: andre.vasiliev@gmail.com

Садырин Евгений Валерьевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского",
Научно-исследовательский институт механики,
603950, Россия, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23,
Научно-образовательный центр «Материалы»,
Младший научный сотрудник,
E-mail: evgeniy.sadyrin@gmail.com

С помощью математического моделирования исследована взаимосвязь толщины слоёв двухслойного покрытия TiN-Al на однородной стальной подложке и функции жёсткости индентирования для различных осесимметричных инденторов. Работа выполнена с целью планирования корректного эксперимента по наноиндентированию образца подобной структуры.

Ключевые слова: наноиндентирование, двухслойное покрытие, толщина слоя, контактная задача, математическое моделирование.

INFLUENCE OF LAYER THICKNESS OF TWO-LAYER COATING ON THE INDENTATION STIFFNESS FUNCTION

Aizikovich Sergey Mikhailovich

Don State Technical University,

1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russia, 344000,
Research and Educational Center “Materials”,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Head of laboratory
“Functionally-graded and composite materials”,
E-mail: saizikovich@gmail.com

Vasiliev Andrey Sergeevich

University of Nizhni Novgorod,
23, Gagarin Ave., Nizhni Novgorod, Russia, 603950,
Research and Educational Center “Materials”,
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Junior Researcher,
E-mail: andre.vasiliev@gmail.com

Sadyrin Evgeniy Valeryevich

University of Nizhni Novgorod,
23, Gagarin Ave., Nizhni Novgorod, Russia, 603950,
Research and Educational Center “Materials”,
Research and Educational Center “Materials”,
Junior Researcher
E-mail: evgeniy.sadyrin@gmail.com

Using mathematical modeling the relationship between the layer thickness of the two-layer TiN-Al coating deposited on the homogeneous steel substrate and the indentation stiffness function for different axisymmetric indenters is investigated. The work is fulfilled in order to plan correct nanoindentation experiment on a sample of the similar structure.

Keywords: nanoindentation, two-layer coating, layer thickness, contact problem, mathematical modeling.

УДК 539.3

О МЕТОДЕ БЛОЧНОГО ЭЛЕМЕНТА В ТЕОРИИ СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Бабешко Ольга Мефодиевна

Главный научный сотрудник Кубанского госуниверситета;
Главный научный сотрудник Южного научного центра РАН
350000, Краснодар, ул. Ставропольская, 149;
Доктор физико-математических наук, профессор
Телефон: (861) 219-95-46;
E-mail: babeshko@kubsu.ru

В телах с покрытиями развивается теория дефектов, типа трещин, плоскости которых перпендикулярны границам трещин. Они сложны для обнаружения средствами дефектоскопии и радиационными методами, поэтому называются скрытыми. Метод блочного элемента позволяет изучить особенности влияния таких дефектов на прочностные свойства тел с дефектными покрытиями.

Ключевые слова: скрытые дефекты, горизонтальное гармоническое воздействие, метод блочного элемента, топологический метод, факторизационный подход, алгоритм внешнего анализа.

METHOD BLOCK ELEMENT IN THE THEORY OF HIDDEN OR LATENT DEFECTS IN THE HORIZONTAL HARMONIC ACTION**Babeshko Olga Mefodievna**

Chief Scientist of Kuban State University;
Chief Scientist of the Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences
149, Stavropol Str., Krasnodar, 350000,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Phone: (861) 219-95-46;
E-mail: babeshko@kubsu.ru

The bodies with coatings developed theory of defects, such as cracks in planes perpendicular to the boundaries of the cracks. They are difficult to detect by means of inspection and radiation techniques, so called hidden. block element method allows to study features of the impact of such defects on the mechanical properties of bodies with defective coatings.

Keywords: latent defects, horizontal harmonic effects, method of block-level element, topological method, factorization approach, external analysis algorithm

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНО ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**Белянкова Татьяна Ивановна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Южный научный центр Российской академии наук,
344006, Россия, г. Ростов-на-Дону, пр.Чехова, 41,
ФГБУН «Южный научный центр РАН», г. Ростов-на-Дону, Россия
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»,
344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42,
Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича,
Кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник,
E-mail: tbelen415@mail.ru

Калинчук Валерий Владимирович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Южный научный центр Российской академии наук,
344006, Россия, г. Ростов-на-Дону, пр.Чехова, 41,
ФГБУН «Южный научный центр РАН», г. Ростов-на-Дону, Россия
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»,
344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42,
Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича,
Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом, заместитель председателя ЮНЦ РАН,
E-mail: kalin@ssc-ras.ru

Исследовано влияние характера, интенсивности и локализации изменения физических параметров материала покрытия на особенности распространения поверхностных волн.

Ключевые слова: неоднородное покрытие, функционально градиентный материал, гармонические колебания, сдвиговые горизонтально-поляризованные волны, поверхностные акустические волны (ПАВ).

MODELING OF INHOMOGENEOUS COATINGS OF FUNCTIONALLY GRADIENT MATERIALS

Belyankova Tatyana Ivanovna

Southern Federal University,
105/42, Bolshaya Sadovaya Str., Rostov-on-Don, Russia, 344006,
Institute of mathematics, mechanics and computer sciences I.I. Vorovich,
Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences,
41, Chehova Str, Rostov-on-Don, Russia, 344006
Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Ass. Professor,
E-mail: tbelen415@mail.ru

Kalinchuk Valery Vladimirovich

Southern Federal University,
105/42, Bolshaya Sadovaya Str., Rostov-on-Don, Russia, 344006,
Institute of mathematics, mechanics and computer sciences I.I. Vorovich,
Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences,
41, Chehova Str, Rostov-on-Don, Russia, 344006,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
E-mail: kalin@ssc-ras.ru

The influence of the character, intensity and localization of the change of the material physical parameters on the peculiarities of surface wave propagation is investigated.

Keywords: inhomogeneous coating, functionally graded material, harmonic oscillations, shear horizontally polarized waves, surface acoustic waves (SAW).

УДК 539.3

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОИСТЫХ И ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ватульян Александр Ованесович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение «Южный федеральный университет»,
344006, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42,
Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича,
Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой,
Телефон: 89185896075,
E-mail: vatulyan@math.rsu.ru

Нестеров Сергей Анатольевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение «Южный федеральный университет»,
344006, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42,
Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича,
Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник,

Телефон: 89185073340,
E-mail: 1079@list.ru

Рассмотрена обратная задача идентификации термомеханических характеристик неоднородного слоя. Двумерная задача для термоупругого слоя на основе процедуры осреднения сводится к двум одномерным. Прямые задачи решаются на основе аппарата интегральных уравнений Фредгольма 2-го рода. Обратная задача решается на основе итерационного процесса, на каждом этапе которого решается интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода. Проведен ряд вычислительных экспериментов по восстановлению термомеханических характеристик слоя.

Ключевые слова: функционально-градиентный материал, слоистый материал, идентификация, термоупругость.

IDENTIFICATION OF TERMOMECHANICAL CHARACTERISTIC OF LAYERED AND FUNCTIONALLY-GRADIENT MATERIALS

Vatulyan Alexander Ovanesovich

Southern Federal University.

105/42, Bolshaya Sadovaya Str., Rostov-on-Don, Russia, 344006,

The Institute of mathematics, mechanics and computer sciences,

Doctor physics and mathematical sciences, professor, head of department,

Phone: 89185896075,

E-mail: vatulyan@math.rsu.ru

Nesterov Sergey Anatolievich

Southern Federal University,

105/42, Bolshaya Sadovaya Str., Rostov-on-Don, Russia, 344006,

The Institute of mathematics, mechanics and computer sciences,

Candidate physics and mathematical sciences, researcher,

Phone: 89185073340,

E-mail: 1079@list.ru

The inverse problem of identification of thermomechanical characteristics of inhomogeneous layer is considered. On the basis of averaging procedure, the two-dimensional problem for thermoelastic layer can be reduced to two one-dimensional. The direct problems are solved on the basis of the device of Fredholm integral equations of the 2nd kind. The inverse problem is solved by an iterative process, each stage of which is solved Fredholm integral equation of the first kind. Some numerical experiments of identification thermal physical characteristics of layer are presented.

Keywords: functionally-gradient material, layered material, identification, thermoelasticity.

УДК 539.3

К ПРОБЛЕМЕ КОНСТРУИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ С ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОЙ ПОЛОСОВОЙ АРМАТУРОЙ

Евдокимова Ольга Владимировна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный университет»

350000, Россия, г. Краснодар, Ставропольская 149,

Доктор ф.-м. наук, главный научный сотрудник

Телефон: 89282034988
E-mail: babeshko49@mail.ru

THE PROBLEM OF DESIGNING THE MATERIALS WITH LONGITUDINAL-TRANSVERSE STRIP REINFORCEMENT

Evdokimova Ol'ga Vladimirovna

Federal state budgetary educational institution of higher professional education "Kuban state University"

149, Stavropolskaya, Krasnodar, Russia, 350000

Doctor of physico-mathematical Sciences, chief researcher

Phone: 89282034988

E-mail: babeshko49@mail.ru

УДК 539.3

НЕСООТВЕТСТВИЯ КЛАССИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ ФОРМАМ КАНОНИЧЕСКИХ И РЕАЛЬНЫХ ТЕЛ

Журавлев Герман Александрович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»,

344006, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42,

Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича,

344090, Россия, Ростов-на-Дону, Проспект Стачки, 200,

Кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник,

Телефон: 8-918-5546596

E-mail: zhur.okp@yandex.ru

Показано несоответствие классических решений контактных задач Герца-Беляева форме контактирующих тел, для которых их соответствие считается общепризнанным. Аналитическим (для канонических тел) и приближенно-аналитическим (для тел сложной формы) бесконтактными методами получены взаимосвязи основных факторов контакта, количественно определяющие ограничения применимости классических решений (по разным условиям размера области контакта, зависящим от формы тел и от кривизны их контактных элементов) и даны объяснения противоречиям теории и практики контактных расчетов.

Ключевые слова: канонические тела, кривизна контактных элементов, контактные напряжения, бесконтактный метод, малость области контакта.

INCONSISTENCIES OF CLASSICAL SOLUTIONS OF CONTACT PROBLEMS TO GEOMETRIC SHAPES OF CANONICAL AND REAL BODIES

Zhuravlev German Aleksandrovich

Southern Federal University,

105/42, Bolyshaya Sadovaya str. , Rostov-on-Don, Russia, 344006,

Institute of mathematics, mechanics and computer sciences I.I. Vorovich,

200, Stachki ave., Rostov-on-Don, Russia, 344090,

Candidate of the technical sciences, senior researcher,

Phone: 8-918-5546596,

E-mail: zhur.okp@yandex.ru

The paper reveals contradiction between classical solutions for the Hertz-Belyaev contact problems and geometric forms of bodies in contact. Relationships between essential contact factors are explored with an analytical (for bodies of canonical shapes) and an approximate-analytical (for complexly shaped bodies) non-contact methods. These factors quantify limits for applicability of the classical solutions with respect to various conditions on a contact area, which are dependent on the forms of bodies in contact and curvature of their contact elements. Interpretation of contradictions between theory and practice of contact calculations is provided.

Keywords: canonical shapes, curvature of contact elements, contact stress, non-contact method, smallness of contact area.

УДК 539.375.6: 531.4: 536.212

ВЛИЯНИЕ РАЗОГРЕВА ОТ ТРЕНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ ПОКРЫТИЙ

Зеленцов Владимир Борисович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет,
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1,
Научно-образовательный центр «Материалы»,
Руководитель ресурсного центра коллективного пользования,
Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,
Телефон: 8 863 273-863-34,
E-mail: vbzelen@gmail.com

Митрин Борис Игоревич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет,
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1,
Научно-образовательный центр «Материалы»,
Младший научный сотрудник,
Кандидат физико-математических наук,
Телефон: 8 952 573-23-96,
E-mail: boris.mitrin@gmail.com

Лубягин Игорь Анатольевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет,
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1,
Научно-образовательный центр «Материалы»,
Техник,
Телефон: 8 863 273-863-34,
E-mail: hammavet@gmail.com

Для исследования износостойкости покрытий при трении и разогреве от трения рассматривается задача об износе упругого покрытия жёстким телом, скользящим по поверхности покрытия, разогревая его за счёт трения на контакте. Решение контактной задачи в квазистатической постановке получено в виде рядов по собственным числам. В пространстве трёх безразмерных параметров установлена граница области неустойчивых решений задачи, которая характеризуется галопирующим ростом температуры и напряжений на контакте.

Подробно изучается влияние температуры разогрева на контакте от трения на износостойкость материала покрытия.

Ключевые слова: скольжение, квазистатика, трение, износ, термоупругая неустойчивость, износостойкость, покрытие.

INFLUENCE OF FRICTIONAL HEATING ON WEAR RESISTANCE OF COATINGS MATERIALS

Zelentsov Vladimir Borisovich

Don State Technical University,
1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, Russia, 344000,
Research and Education Center “Materials”,
Head of Scientific Equipment Joint Use Center,
Candidate of physical and mathematical sciences, senior researcher,
E-mail: vbzelen@gmail.com

Mitrin Boris Igorevich

Don State Technical University,
1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, Russia, 344000,
Research and Education Center “Materials”,
Junior Researcher,
Candidate of physical and mathematical sciences,
E-mail: vbzelen@gmail.com

Lubyagin Igor Anatolyevich

Don State Technical University,
1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, Russia, 344000,
Research and Education Center “Materials”,
Technician,
E-mail: hammavet@gmail.com.

We consider problem on wear of an elastic coating by a rigid body sliding over the coating surface and heating it due to contact friction. Solution of the quasi-static problem is constructed in form of series over eigenvalues. Area of unstable solutions of the problem, where thermoelastic instability of sliding contact takes place, is determined in dimensionless parameters space. Wear resistance of the coating is studied for different kinds of materials, depending on the following parameters: relative sliding velocity of contact surfaces, indentation speed, the coating thickness, and others, with account for temperature and stresses developing at the contact interface.

Keywords: sliding, quasi-static, friction, wear, thermoelastic instability, wear resistance, coating.

УДК 620.22

РАЗРАБОТКА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫХ ЭПОКСИДНЫХ СМОЛ

Кудина Елена Федоровна

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси,
246050, Беларусь, г.Гомель, ул.Кирова, 32А,

Доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник,
Телефон: +375(232)774626,
E-mail: kudina_mpri@tut.by

Винидиктова Наталья Сергеевна

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси,
246050, Беларусь, г.Гомель, ул.Кирова, 32А,
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Телефон: +375(232)775207,
E-mail: vns_ins@mail.ru

Гольдаде Виктор Антонович

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси,
246050, Беларусь, г.Гомель, ул.Кирова, 32А,
Доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник,
Телефон: +375(232)774656,
E-mail: victor.goldade@gmail.com

Ермолович Ольга Анатольевна

Белорусский государственный университет транспорта,
246653, Беларусь, г.Гомель, ул. Кирова, д. 34,
Кафедра «Физика и химия»,
Кандидат технических наук, доцент

Разработан материал покрытий на основе эпоксидного связующего функционализированного фенолсодержащим компонентом. Исследовано влияние ценосфер, использованных в качестве наполнителя, на физико-механические свойства материалов, получаемых на основе исходной и функционализированной матриц. Установлено, что функционализация эпоксидного связующего приводит к увеличению адгезионной прочности соединения покрытие/металл и микротвердости. Показано, что введение ценосфер позволяет получить градиентные покрытия.

Ключевые слова: эпоксидная смола, функционализированная матрица, фенолфодержащий компонент, ценосферы, микротвердость, градиентные покрытия

DEVELOPMENT OF COATINGS BASED ON FUNCTIONALIZED EPOXIDE RESINS

Kudina Elina Fedorovna

V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus
32A, Kirova st., Gomel, 246050, Belarus
Doctor of the technical sciences, Docent, Leading researcher
E-mail: kudina_mpri@tut.by

Vinidiktova Natalia Sergeevna

V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus,
32A, Kirova st., Gomel, Belarus, 246050,
Candidate of the technical sciences, Senior researcher,
E-mail: vns_ins@mail.ru

Goldade Viktor Antonovich

V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus,

32A, Kirova st., Gomel, Belarus, 246050,
Doctor of the technical sciences, Professor, Leading researcher,
E-mail: victor.goldade@gmail.com

Ermolovich Olga Anatolevna

Belarussian State University of Transport,
34, Kirova st., Gomel, Belarus, 246050,
Candidate of the technical sciences, Docent, Docent,
E-mail: Ermolovich@yandex.ru

A coating material has been developed on the base of the epoxide binder functionalized by the phenol-containing component. The effect of cenospheres used for filling on physicomechanical properties of the materials based on the initial and functionalized matrices has been studied. It was established that the functionalization of the epoxide binder was leading to increased adhesive strength coating/metal and microhardness. It is shown that introduction of cenospheres makes base for obtaining gradient coatings.

Keywords: epoxy resin, functionalized matrix, phenol-containing component, cenospheres, microhardness, gradient coatings.

УДК: 539.3

**О КОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ В ЭЛЕКТРОМАГНИТОУПРУГИХ
ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ**

Леви Михаил Олегович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Южный научный центр
Российской академии наук;
344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, .41.
Научный сотрудник.
Email: mlevi@mindonline.ru

Леви Галина Юрьевна

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Южный научный центр
Российской академии наук;
344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, .41.
Младший научный сотрудник.
Email: galias@yandex.ru

Татарков Дмитрий Александрович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Южный научный центр
Российской академии наук;
344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, .41.
Инженер–исследователь.
Email: moderx@mail.ru

Построение модели электромагнитоупругой модели многослойной гетероструктуры. Решение контактной задачи методом фиктивного поглощения. Построена динамическая емкость многоэлектродной структуры.

Ключевые слова: гетероструктуры, электромагнитоупругость, метод фиктивного поглощения, контактная задача

ABOUT CONTACT INTERACTIONS IN ELECTRO–MAGNETO–ELASTIC HETEROSTRUCTURES.**Levi Mikhail Olegovich**

Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;
41, Chehova str., Rostov-on-Don, Russia, 344006

Researcher..

Email: mlevi@mindonline.ru

Levi Galina Yurevna

Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;
41, Chehova str., Rostov-on-Don, Russia, 344006

Junior Researcher.

Email: galias@yandex.ru

Tatarkov Dmitry Aleksandrovich

Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;
41, Chehova str., Rostov-on-Don, Russia, 344006

Research Engineer..

Email: moderx@mail.ru

Construction of the model electromagnetoelastic model multilayer heterostructure is considered. The solution of the contact problem by fictitious absorption is provided. Dynamic capacity of multi-electrode structure was discovered.

Keywords: heterostructure electromagnetoelastic, fictitious absorption method, contact problem

УДК 539.3

МНОЖЕСТВЕННЫЙ КОНТАКТ ТЕЛ С ПОКРЫТИЯМИ С УЧЕТОМ ИЗНОСА**Манжиров Александр Владимирович;**

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН;
119526, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1;

Заместитель директора по научной работе;

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана;
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1;

Заведующий филиалом кафедры;

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»;
115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31;

Профессор;

Московский технологический университет;
119454, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78;

Профессор

Доктор физико-математических наук, профессор.

E-mail: manzh@inbox.ru

Казаков Кирилл Евгеньевич

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН;
119526, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1;

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана;
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1;
Кандидат физико-математических наук, доцент.
E-mail: kazakov-ke@yandex.ru

В статье рассматриваются плоские износоконтактные задачи для систем жестких штампов и упругих оснований с тонкими неоднородными покрытиями. Предполагается, что система штампов регулярна, то есть расстояния между соседними штампами одинаковые, а длины штампов равны друг другу. Задача решена в аналитическом виде в рядах. Получены выражения для контактных давлений под штампами, осадок и углов поворотов штампов. В выражениях для контактных давлений функция неоднородности покрытия выделена в явном виде.

Ключевые слова: износоконтактная задача, модифицированное покрытие, упругость, поверхностная неоднородность

MULTIBODY CONTACT PROBLEM WITH WEAR FOR COATED SOLIDS

Manzhirov Alexander Vladimirovich;

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences;
101, Vernadskogo ave., Moscow, Russia, 119526;
Deputy Director for Research
Bauman Moscow State Technical University;
5, 2-ya Baumanskaya, Moscow, Russia, 105005;
The Head of a Branch of the Department;
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute);
31, Kashirskoe highway, Moscow, Russia, 115409;
Professor;
Moscow Technological University (MIREA);
78, Vernadskogo ave., Moscow, Russia, 119454;
Professor;
Doctor of mathematical and physical sciences, professor.
E-mail: manzh@inbox.ru

Kazakov Kirill Evgenievich

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences;
101, Vernadskogo ave., Moscow, Russia, 119526;
Researcher;
Bauman Moscow State Technical University;
5, 2-ya Baumanskaya, Moscow, Russia, 105005;
Associate professor;
Candidate of mathematical and physical sciences, associate professor.
E-mail: kazakov-ke@yandex.ru

We have considered contact problem with wear for a system of rigid punches and an elastic foundation with a thin nonuniform coating. We assume that the system of punches is regular, i.e. distances between neighboring punches are identical as well as their dimensions. We have solved the problem in analytical form in series and obtained expressions for contact stresses under the punches and punches settlements and tilt angles. The rapidly changing stiffness function of the nonuniform coating has been explicitly isolated in the expression for the contact stresses.

Keywords: wear contact problem, modified coating, elasticity, surface inhomogeneity

УДК 621.643.414.6

ВИБРАЦИОННОЕ САМОРАСКРУЧИВАНИЕ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Неверов Александр Николаевич

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
125319, Москва, Ленинградский проспект, 64,
К.т.н., доцент, доцент
Телефон: +7(910)4612556
E-mail: neverov_an@mail.ru

Исследован механизм самораскручивания резьбовых соединений при воздействии продольных ультразвуковых колебаний. Показано, что координата сопряжения болта и гайки стремится к перемещению по винтовой поверхности в сторону узла механических деформаций. Аналитические соотношения подтверждаются экспериментальными результатами.

Ключевые слова: резьба, коэффициент трения, ультразвук, продольные колебания

VIBRATING SAMARASEKERA THREADED CONNECTIONS

Neverov Alexander

Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)
64, Leningradskiy prospect, Moscow, 125319
Ph. D., docent, associate professor
Phone: +7(910)4612556
E-mail: neverov_an@mail.ru

Is investigated the mechanism of auto-unwinding threaded connection under the influence of longitudinal ultrasonic vibrations. It is shown that the coordinate of joining bolt and nut is approached displacement over the helical surface to the side of the unit of mechanical deformations. Analytical relationships are confirmed by experimental results.

Keywords: thread, the coefficient of friction, ultrasound, the longitudinal vibrations

УДК 531.8; 621.891

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЯЗКОУПРУГОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ КОНТАКТИРУЮЩИХ ТЕЛ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ

Усов Павел Павлович

Национальный исследовательский Университет «Московский институт электронной техники»;
124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: usovp@mail.ru

Проведен численный анализ влияния вязкоупругости поверхностных слоев контактирующих тел на толщину смазочного слоя и распределение давления в нем. В качестве

модели вязкоупругой среды принимается одномерная модель Кельвина. Рассматриваются случаи ньютоновской и неньютоновской смазки.

Ключевые слова: вязкоупругий слой, смазываемый контакт, неньютоновская смазка.

A NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECTS OF VISCOELASTIC SURFACE LAYERS OF CONTACTING BODIES ON CHARACTERISTICS OF LAYER OF LUBRICANT

Usov Pavel Pavlovich

National Research University of Electronic Technology
1, Shokina sq., Moscow, Zelenograd, Russia, 124498,
Phd, Assistant Professor
E-mail: usovp@mail.ru

The numerical analysis of influence of viscoelastic surface layers of contacting bodies on film thickness and pressure distribution of a lubricant layer is carried out. The Kelvin model is used to describe the mechanical properties of the layers. The Newtonian and non-Newtonian lubricant is considered.

Keywords: viscoelastic layer, lubricated contact, non-Newtonian lubricant.

УДК 539.3

К ТЕОРИИ КАНАТОВ. ЗАДАЧА РАСТЯЖЕНИЯ-КРУЧЕНИЯ

Устинов Юрий Анатольевич

Южный федеральный университет
344090, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова 8а, Институт математики, механики
и компьютерных наук им. И.И. Воровича (ИММиКН)
д.ф.-м.н., профессор
E-mail: ustinov_rsu@mail.ru

Дается краткое описание построения новой теории каната, опирающейся на спектральную теорию операторов. Получены новые формулы для расчета матрицы жесткостей в широком диапазоне изменения их параметров.

Ключевые слова: теория канатов, матрица жесткостей, задача растяжения-кручения

TO THE THEORY OF ROPES. THE OBJECTIVE OF THE TENSION-TORSION

Ustinov Yuri Anatolyevich

Southern Federal University
8A, Milchakova str., Rostov-on-don, Russia, 344090, Institute of mathematics, mechanics and
computer Sciences. I. I. Vorovich (Imin)
D. SC.M. D., Professor
E-mail: ustinov_rsu@mail.ru

A brief description of how to build new theories of the rope, based on the spectral theory of operators. The obtained new formula for the calculation of matrix stiffness in a wide range of parameter values.

Keywords: theory of ropes, the matrix stiffness, the problem of tension-torsion

УДК 539.3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА НЕОДНОРОДНЫХ ОСНОВАНИЙ

Чебаков Михаил Иванович

Южный федеральный университет,
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, д. 200/1,
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Телефон +7 (863) 297-52-55,
E-mail: chebakov@math.sfedu.ru

Ростовский государственный университет путей сообщения
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения,
д. 2,
ведущий научный сотрудник
Телефон +7 (863) 272-63-49.

Данильченко Сергей Александрович

Южный федеральный университет,
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, д. 200/1,
инженер - проектировщик,
телефон +7 (863) 297-52-55,
E-mail: sergey.a.danilchenko@gmail.com

Ростовский государственный университет путей сообщения
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения,
д. 2,
ведущий инженер,
Телефон: +7 (863) 272-63-49.

Ляпин Александр Александрович

Южный федеральный университет,
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, д. 200/1,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Телефон +7 (863) 297-52-55,
E-mail: alexlpn@hotmail.com

Рассмотрена контактная задача об изнашивании упругого неоднородного основания под воздействием движущегося жесткого штампа. Представлены результаты расчетов величины износа для нескольких вариантов неоднородности. Проведено сравнение с аналитическим решением контактной задачи с учетом износа для относительно тонкого слоя.

Ключевые слова: неоднородные основания, износ, контактное давление, математическая модель, метод конечных элементов.

MATHEMATICAL MODELLING OF WEAR FOR HETEROGENEOUS BASES

Chebakov Mikhail Ivanovich

Southern Federal University,
200/1, Stachki av., Rostov-on-Don, 344090, Russia,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
Chief Researcher,

Phone +7 (863) 297-52-55,
E-mail: chebakov@math.sfedu.ru
Rostov State Transport University,
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia,
344038
Leading Researcher,
Phone +7 (863) 272-63-49.

Danilchenko Sergey Aleksandrovich

Southern Federal University,
200/1, Stachki av., Rostov-on-Don, 344090, Russia,
Designing Engineer,
phone +7 (863) 297-52-55,
E-mail: sergey.a.danilchenko@gmail.com
Rostov State Transport University,
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia,
344038
Leading Engineer
Phone +7 (863) 272-63-49

Lyapin Aleksandr Alexandrovich

Southern Federal University,
200/1, Stachki av., Rostov-on-Don, Russia, 344090
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Researcher,
Phone +7 (863) 297-52-55,
E-mail: alexlpn@hotmail.com

The problem of contact wear elastic heterogeneous base under the influence of a moving rigid stamp was considered. Results of calculations wear for several variants of heterogeneity were presented. The comparison with the analytical solution of the contact problem taking into account wear for a relatively thin layer was conducted.

Keywords: heterogeneous bases, wear, contact pressure, mathematical model, finite element method.

УДК 621.2.082.18

ИЗНАШИВАНИЕ НАНОНЕРОВНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

Суслов Анатолий Григорьевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»;
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1;
Доктор технических наук, профессор;
E-mail: mootechmash@mail.ru.

Шалыгин Михаил Геннадьевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования
«Брянский государственный технический университет»;
241035, г. Брянск, б-р 50-лет Октября, д. 7;

Кандидат технических наук, доцент;
E-mail: migshalygin@yandex.ru.

Предложена физическая картина взаимодействия поверхностей трения на уровне субшероховатости. Предложена модель расчета усталостного и адгезионного износа субшероховатости поверхностей трения.

Ключевые слова: нанонервности, субшероховатость, кристаллическая решетка, удельный износ

WEARING THE NANO ROUGHNESS OF THE FRICTION SURFACES

Suslov Anatoliy Grigor'evich

Bauman Moscow state technical University;
5, Second Bauman str., Moscow, Russia, 105005
Chair «Technology of the Machine Building»
Doctor of the technical sciences, Professor;
E-mail: mootechmash@mail.ru.

Shalygin Mikhail Gennad'evich

Bryansk State Technical University;
7, 50th-anniversary of October blvd., Bryansk, Russia, 241035,
Chair “Quality Management, Standardization and Metrology”;
Candidate of the technical sciences, Docent;
E-mail: migshalygin@yandex.ru.

Proposed the physical view on the interaction of the friction surfaces at the level of subroughness. Introduced the model for the calculation of the fatigue and adhesive wear of friction surfaces.

Keywords: nanoroughness, subroughness, the crystal lattice, the relative wear

УДК 539.3

УСТОЙЧИВОСТЬ УПРУГИХ ПЛИТ С ПОВЕРХНОСТНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

Шейдаков Денис Николаевич;

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Южный научный центр Российской академии наук;
344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41;
Лаборатория динамики неоднородных структур;
Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник.
Телефон: (863) 250-98-10
E-mail: sheidakov@mail.ru

Михайлова Ирина Борисовна;

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Южный научный центр Российской академии наук;
344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41;
Лаборатория динамики неоднородных структур;
Младший научный сотрудник.

Телефон: (863) 250-98-10
E-mail: michailova@ssc-ras.ru

Настоящая работа посвящена изучению влияния поверхностных напряжений на потерю устойчивости нелинейно-упругих тел. В рамках модели Герттина–Мердока исследована бифуркация равновесия прямоугольных плит при двухосном растяжении–сжатии. Получены уравнения нейтрального равновесия и сформулированы линейаризованные краевые задачи для случая произвольного изотропного материала.

Ключевые слова: нелинейная упругость, устойчивость деформируемых тел, поверхностные напряжения, модель Герттина–Мердока, прямоугольная плита

STABILITY OF ELASTIC PLATES WITH SURFACE STRESSES

Sheydaikov Denis Nikolaevich;

Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences;
41, Chekhov Ave., Rostov-on-Don, Russia, 344006;
Laboratory of inhomogeneous structures dynamics;
Candidate of physical and mathematical sciences, leading researcher.
Phone: (863) 250-98-10
E-mail: sheidaikov@mail.ru

Mikhailova Irina Borisovna;

Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences;
41, Chekhov Ave., Rostov-on-Don, Russia, 344006;
Laboratory of inhomogeneous structures dynamics;
Junior researcher.
Phone: (863) 250-98-10
E-mail: michailova@ssc-ras.ru

This paper studies the effect of surface stresses on the loss of stability of nonlinearly elastic bodies. In the framework of Gurtin–Murdoch model, we have investigated the equilibrium bifurcation for rectangular plates under biaxial tension–compression. For an arbitrary isotropic material the neutral equilibrium equations are derived and the linearized boundary value problems are formulated.

Keywords: nonlinear elasticity, stability of deformable bodies, surface stresses, Gurtin–Murdoch model, rectangular plate

УДК 531/534

ОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕОДНОРОДНОГО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ В УПРУГИХ И ЭЛЕКТРОУПРУГИХ ТЕЛАХ

Ватulyян Александр Ованесович

Южный федеральный университет, Владикавказский научный центр РАН
344090 Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова 8а,
Д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой теории упругости ИММиКН
Телефон: +79185896075
E-mail: vatulyan@math.rsu.ru

Недин Ростислав Дмитриевич

Южный федеральный университет, Владикавказский научный центр РАН

344090 Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова 8а,
К.ф.-м.н., старший научный сотрудник ИММиКН
Телефон: +79045015331
E-mail: rdn90@bk.ru

В работе приведен обзор теоретических моделей предварительно напряженных упругих и электроупругих тел. Представлены постановки задач о колебаниях преднапряженных стержней и пластин. Предложены эффективные методики идентификации неоднородных ПН в телах на основе измерения поверхностных перемещений в некотором наборе точек под вибрирующей нагрузкой.

Ключевые слова: идентификация, предварительные напряжения, неоднородность, акустический метод, упругость, электроупругость, стержень, пластина

IDENTIFICATION OF PRIOR STATE IN HETEROGENEOUS ELASTIC BODIES AND ELECTROELASTICITY

Vatulyan Alexander Ovanesovich

Southern Federal University, Vladikavkaz Scientific Center of RAS
8a, Milchakova Str, Rostov-on-Don, Russia, 344090
Institute of mathematics, mechanics and computer sciences named after I.I. Vorovich,
Doctor of physical-mathematical sciences, Prof., Head of department
Phone: +79185896075
E-mail: vatulyan@math.rsu.ru

Nedin Rostislav Dmitrievich

Southern Federal University, Vladikavkaz Scientific Center of RAS
8a, Milchakova Str, Rostov-on-Don, Russia, 344090
Institute of mathematics, mechanics and computer sciences named after I.I. Vorovich,
PhD, Senior Researcher,
Phone: +79045015331
E-mail: rdn90@bk.ru

The paper provides an overview of theoretical models of prestressed elastic and electroelastic bodies. Presented tasking of the vibrations of prestressed rods and plates. We propose effective methods of identification of inhomogeneous GON by measuring the bodies of surface displacements in a set of points under a vibrating load.

Keywords: identification, pre-stress, heterogeneity, acoustic method, elasticity, electroelasticity, rod, plate

УДК 621. 762:678.546

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОРИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТРИЦ НА ОСНОВЕ НА-КМЦ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПОРОШКАМИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ АНТИФРИКЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ

Антонова Наталья Михайловна;

Каменский институт (филиал) Южно-Российского государственного технического университета (Новочеркасского политехнического института) им. М.И. Платова;
347800, Ростовская обл, г. Каменск-Шахтинский, пр-т К. Маркса, 23;

Кандидат технических наук, доцент;
E-mail: melnik1@rambler.ru

Бабичев Анатолий Прокофьевич;

Донской государственный технический университет;
344000, г.Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.
Доктор технических наук, профессор;
E-mail: vibrotech@mail.ru;

Разработаны новые высокопористые материалы на основе полимера Na – КМЦ с порошком Al и наночастицами бемита. Методами электронной микроскопии, рентгенофазового анализа и инфракрасной спектроскопии исследованы морфология и фазовый состав материалов. Показана возможность использования пористых композитов для создания антифрикционных покрытий путем наполнения пор-ячеек твердыми смазками.

Ключевые слова: антифрикционный материал, пористость, алюминий, натрий - карбоксиметилцеллюлоза, дисульфид молибдена, трение.

THE POTENCIAL OF USING POROUS COMPOSITE MATRICES BASED ON NA-CMC METAL POWDERS FOR FORMING COATINGS WITH ADJUSTABLE ANTIFRICTION PROPERTIES

Antonova Natalia Michailovna;

Kamensky Institute (branch) Platov South-Russian State Polytechnic University (Novocherkassk Polytechnic Institute) named after M.I. Platov;
23, Karl Marx ave., Kamensk-Shakhtinsky, Rostov District, 347800;
Candidate of the technical sciences, assistant professor;
E-mail: melnik1@rambler.ru

Бабичев Анатолий Прокофьевич;

Don State Technical University;
1, Gagarina sq., Rostov-on-don, 344000;
Doctor of the technical sciences, Professor.
E-mail: vibrotech@mail.ru;

Elaborated a new highly porous materials based on polymer Na-CMC powder with the Al and boehmite nanoparticles. The morphology and phase composition of materials were studied by the methods of electron microscopy, x-ray phase analysis and infrared spectroscopy. There are shown the possibility of using porous composites for creating antifricion coatings by filling the pore-cells with solid lubricants.

Keywords: anti-friction material, porosity, aluminum, sodium-carboximethylcellulose, molybdenum disulphide, friction

УДК 656+06

ПРИНЦИП ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЛОКА СОГЛАСОВАНИЯ ГИБРИДНОГО ПРИВОДА ЛОКОМОТИВА

Вагонов Роман Андреевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»,

344038, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2,
Кафедра «Электрические машины и аппараты»,
Магистр машиностроения, аспирант,
Телефон: 8 (904)44-65-701;
E-mail: vagonov-ro@mail.ru

С увеличением объемов грузооборота на железнодорожном транспорте остро встала тема экономии топливно-энергетических ресурсов, а также методов проектирования приборов и аппаратов, удовлетворяющих требованиям современности.

Ключевые слова: IGBT-транзистор, снаббер, преобразователь напряжения, аккумулятор, диод, тяговый электродвигатель.

DESIGN PRINCIPLE OF BLOCK MATCHING HYBRID DRIVE LOCOMOTIVE

Vagonov Roman Andreevich;

Rostov State Transport University,
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia,
344038,
Master of engineering; postgraduate student,
Phone: 8 (904)44-65-701,
E-mail: vagonov-ro@mail.ru

With the increase in turnover in rail freight transport there was a subject of economy of fuel and energy resources, as well as methods of designing devices to meet the requirements of modern times.

Key words: IGBT-transistor, snubber, voltage Converter, battery, diode, traction motor.

УДК 621.793

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПАР ТРЕНИЯ СОЧЕТАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ГИПЕРЗВУКОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ И ТРИБОМОДИФИЦИРОВАНИЯ

Белоцерковский Марат Артемович

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Зав. лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин
Доктор технических наук
Телефон: +375-172-842-863
E-mail: mbelotser@gmail.com

Жорник Виктор Иванович

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Заместитель заведующего отделением технологий машиностроения и металлургии
Доктор технических наук
Телефон: + 375-172-842-518
E-mail: zhornikv@gmail.com

Ялович Александр Петрович

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Аспирант

В работе рассмотрены результаты исследований использования композиционных смазок с наномодификаторами при приработке покрытий, полученных гиперзвуковой металлизацией.

Ключевые слова: гиперзвуковая металлизация, приработка покрытий, композиционные смазки.

INCREASING OF OPERABILITY OF FRICTION COUPLES BY COMBINED HYPERSONIC METALLIZATION AND TRIBOMODIFICATION TECHNOLOGIES

Belotserkovsky Marat Artemovich

Head of laboratory “Gas-thermal methods of hardening of machine parts”

The Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus

Doctor of Technical Sciences

Phone: + 375-172-842-863

E-mail: mbelotser@gmail.com

Zhornik Viktor Ivanovich

Deputy head of the department of mechanical engineering and metallurgy

The Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus

Doctor of Technical Sciences

Phone: + 375-172-842-518

E-mail: zhornikv@gmail.com

Yalovik Alexander Petrovich

Graduate student

The Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus

УДК 620.178.169

ВЛИЯНИЕ ВОЛОКНА ОКСАЛОН НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРГАНОПЛАСТИКОВ

Буря Александр Иванович

Днепропетровский государственный технический университет (ДГТУ),

51918, г. Камянское, Днепропетровская область, Украина, ул. Днепропетровская д.2,

кафедра «Физики конденсированного состояния»,

профессор, канд. техн. наук, Академик Украинской Технологической Академии,

заслуженный изобретатель Украины,

Телефон: +38(050)452-58-95,

E-mail: ol.burya@gmail.com.

Томина Анна-Мария Вадимовна

Донской государственный технический университет;

344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.

кафедра «Физики конденсированного состояния», аспирант

Телефон: +380975089241,

E-mail: tomina91@gmail.com

Колесников Владимир Иванович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д.
2,
профессор, президент РГУПС, доктор технических наук, академик РАН,
Телефон: 7(863) 245-49-29,
E-mail: kvi@rgups.ru

Мясникова Нина Алексеевна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д.
2,
кандидат физ.-мат. наук, доцент РГУПС,
Телефон: 7(863) 272-64-97
E-mail: myasnikova@rgups.ru

Доброва Людмила Викторовна

Донской государственный технический университет;
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.
кафедра «Физики конденсированного состояния»,
младший научный сотрудник
E-mail: lyuda_dobrova@mail.ua

Исследовано влияние содержания волокна оксалон на физико-механические, теплофизические и трибологические свойства органопластиков на основе ароматического полиамида фенилон С – 1. Испытания разработанных органопластиков показали, что армирование фенилона С – 1 термостойким волокном оксалон, позволяет создать новые композиционные материалы конструкционного назначения, которые могут быть рекомендованы для установки их в узлах трения машин и механизмов, а также деталей ответственного назначения.

Ключевые слова: органическое волокно, органопластики, фенилон, оксалон

THE INFLUENCE OF FIBER OKSALON ON THE PERFORMANCE OF ORGANIC PLASTICS**Burya Aleksandr Ivanovoch**

Dniprovsk State Technical University (DSTU)
2, Dniprostroevska st., c. Kamenskoe, Dnieper region, Ukraine, 51918
Chair "Physics of condensed matter"
Professor, PhD, Academician of Ukrainian Technological Academy, honored inventor of Ukraine,
Phone: +38(050)452-58-95,
E-mail: ol.burya@gmail.com.

Tomina Anna-Mariia Vadimovna

Federal State Educational Institution of Higher Education "Don State Technical University"
1, pl. Gagarina, Rostov-on-Don, Russia, 344010,
Chair "Physics of condensed matter", postgraduate
Phone: +380975083241,
E-mail: tomina91@gmail.com

Kolesnikov Vladimir Ivanovich

Rostov State Transport University,

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia, 344038

professor, Doctor of Technical Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences,
Phone: 7(863) 245-49-29,

E-mail: kvi@rgups.ru

Mjasnikova Nina Alekseevna,

Rostov State Transport University,

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia, 344038

PhD, Professor,

Phone: 8(863)272-64-97,

E-mail: myasnikova@rgups.ru

Dobrova Ludmila Victorovna,

Federal State Educational Institution of Higher Education "Don State Technical University"

1, pl. Gagarina, Rostov-on-Don, Russia, 344010,

Chair "Physics of condensed matter" junior researcher

E-mail: lyuda_dobrova@mail.ua

The effect of fiber content oksalon on the physical and mechanical, thermal and tribological properties of organic plastics based on aromatic polyamide phenylone C - 1. The tests developed by organic plastics have shown that reinforcement phenylone C - 1 oksalon heat-resistant fiber, to create new composite material construction purposes, which can be recommended to install them in the friction units of machines and mechanisms, as well as details of responsible destination.

Keywords: organic fiber, organoplastics, phenylone, oksalon

УДК: 620.193.8:621.893

КОМПОЗИЦИОННЫЙ АНТИФРИКЦИОННЫЙ ПОЛИМЕРНЫЙ МАТЕРИАЛ**Дерлугян Петр Дмитриевич**

Акционерное общество «Особое конструкторско-технологическое бюро «Орион»

346428, Россия, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Михайловская 150А

К.т.н., доцент, генеральный директор

Телефон: (8635)22-24-45

E-mail: dpd-orion@yandex.ru

Данюшина Галина Алексеевна

Акционерное общество «Особое конструкторско-технологическое бюро «Орион»

346428, Россия, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Михайловская 150А

К.т.н., начальник отдела

Телефон: (8635)22-24-45

E-mail: dpd-orion@yandex.ru

Шишка Василий Григорьевич

Акционерное общество «Особое конструкторско-технологическое бюро «Орион»

346428, Россия, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Михайловская 150А

К.т.н., доцент, главный инженер
Телефон: (8635)22-23-98
E-mail: dpd-orion@yandex.ru

Бережной Юрий Михайлович

Акционерное общество «Особое конструкторско-технологическое бюро «Орион»
346428, Россия, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Михайловская 150А
К.т.н., начальник отдела
Телефон: (8635)22-23-98
E-mail: dpd-orion@yandex.ru

Шишка Никита Васильевич

Акционерное общество «Особое конструкторско-технологическое бюро «Орион»
346428, Россия, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Михайловская 150А
Техник
Телефон: (8635)22-23-98
E-mail: dpd-orion@yandex.ru

В статье приведены исследования по разработке композиционного антифрикционного полимерного материала с использованием в качестве наполнителей медно-полимерного комплекса полиакриламида и полититаната калия. Были использованы не термообработанный полититанат калия и термообработанный полититанат калия. Приведены данные по влиянию использованных добавок на коэффициент трения и твердость.

Ключевые слова: композиционный антифрикционный полимерный материал, полититанат калия, медный поликомплекс полиакриламида, полиэтилен

ANTIFRICTION COMPOSITE POLYMER MATERIAL

Derlugyan Peter

"Special Design and Technology Bureau "Orion"
150A, Michaylovskaja str., Novocherkassk, Rostov region. Russia. 346428
Ph.D., Associate Professor, Director General
Phone: (8635) 22-24-45
E-mail: dpd-orion@yandex.ru

Danyushina Galina

"Special Design and Technology Bureau "Orion"
150A, Michaylovskaja str., Novocherkassk, Rostov region. Russia. 346428
Ph.D., Head of Department
Phone:(8635) 22-24-45
E-mail: dpd-orion@yandex.ru

Shishka Vasily

"Special Design and Technology Bureau "Orion"
150A, Michaylovskaja str., Novocherkassk, Rostov region. Russia. 346428
Ph.D., Associate Professor, Chief Engineer
Phone: (8635) 22-23-98
E-mail: dpd-orion@yandex.ru

Berezhnoy Yuri

"Special Design and Technology Bureau "Orion"
150A, Michaylovskaja str., Novocherkassk, Rostov region. Russia. 346428

Ph.D., Head of Department
Phone: (8635) 22-23-98
E-mail: dpd-orion@yandex.ru

Shishka Nikita

"Special Design and Technology Bureau "Orion"
150A, Michaylovskaja str., Novocherkassk, Rostov region. Russia. 346428
Technician
Phone: (8635) 22-23-98
E-mail: dpd-orion@yandex.ru

The article describes research to develop an antifriction polymeric composite material using copper as filler-polymer complex polytitanate potassium and polyacrylamide. It was used heat-treated polytitanate potassium and without thermal treatment. The article considers the influence of additives on the coefficient of friction and hardness.

Keywords: the composite anti-friction polymer material, polytitanate potassium, copper polycomplex polyacrylamide, polyethylene

УДК 621.77.04

**ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВА АМГ5 ПОСЛЕ
ИНТЕНСИВНОГО ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ФРИКЦИОННОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ.**

Елисеев Александр Андреевич;

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук;
634055, г. Томск, проспект Академический, 2/4, ИФПМ СО РАН.
Лаборатория физики упрочнения поверхности; лаборатория контроля качества материалов и конструкций;
Аспирант, инженер.
E-mail: alan@ispms.ru.
Телефон: +7 (3822) 492 711.

Филиппов Андрей Владимирович;

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук;
634055, г. Томск, проспект Академический, 2/4, ИФПМ СО РАН.
Лаборатория физики упрочнения поверхности;
Кандидат технических наук, младший научный сотрудник.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, проспект Ленина, 30
Кафедра технологии машиностроения
Старший преподаватель.
E-mail: avf@ispms.tsc.ru.
Телефон: +7 (3822) 492 711.

Рубцов Валерий Евгеньевич;

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук;

634055, г. Томск, проспект Академический, 2/4, ИФПМ СО РАН.
Лаборатория физики упрочнения поверхности;
Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, проспект Ленина, 30.
Инженер.
E-mail: rvy@ispms.ru.
Телефон: +7 (3822) 492 711.

Чумаевский Андрей Валерьевич;

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук;
634055, г. Томск, проспект Академический, 2/4, ИФПМ СО РАН.
Лаборатория контроля качества материалов и конструкций;
Кандидат технических наук, младший научный.
E-mail: tch7av@gmail.ru.
Телефон: +7 (3822) 492 711.

Колубаев Александр Викторович;

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук;
634055, г. Томск, проспект Академический, 2/4, ИФПМ СО РАН.
Лаборатория физики упрочнения поверхности;
Доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией.
E-mail: kav@ispms.ru.
Телефон: +7 (3822) 492 711.

Колубаев Евгений Александрович;

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук;
634055, г. Томск, проспект Академический, 2/4, ИФПМ СО РАН.
Лаборатория физики упрочнения поверхности; лаборатория контроля качества материалов и конструкций;
Кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, проспект Ленина, 30.
Институт физики высоких технологий;
Заместитель директора по развитию.
E-mail: eak@ispms.ru.
Тел. +7 (3822) 492 711.

В работе приведены результаты исследования прочностных характеристик алюминиевого сплава АМг5 после интенсивного термомеханического фрикционного воздействия методом трения с перемешиванием. Показана последовательность подготовки образцов для проведения механических испытаний. Приведены диаграммы растяжения исследованных образцов. Рассмотрена фрактография поверхностей разрушенных образцов. Показана возможность достижения более высокой прочности для образцов после фрикционного воздействия по сравнению с прочностью исходного материала.

Ключевые слова: обработка трением с перемешиванием, интенсивная пластическая деформация, прерывистая текучесть, алюминиевый сплав.

STRENGTH PROPERTIES OF AMG5 ALLOY (AA5056) AFTER SEVERE PLASTIC DEFORMATION BY FRICTION STIR.**Eliseev Alexander Andreevich**

Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian branch of Russian Academy of Sciences

2/4, Academichesky ave., Tomsk, Russia, 634055,

Laboratory of Physics of Surface Hardening, Laboratory for quality control in materials and structures;

Postgraduate, engineer.

E-mail: alan@ispms.ru.

Filippov Andrey Vladimirovich

Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian branch of Russian Academy of Sciences

2/4, Academichesky ave., Tomsk, Russia, 634055,

Laboratory of Physics of Surface Hardening;

Ph.D, Junior research staff.

National Research Tomsk Polytechnic University

30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia,

Department of engineering technology

Senior teacher.

E-mail: avf@ispms.tsc.ru.

Rubtsov Valery Evgenyevich

Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian branch of Russian Academy of Sciences

2/4, Academichesky ave., Tomsk, Russia, 634055,

Laboratory of Physics of Surface Hardening;

Ph.D, Senior research staff.

National Research Tomsk Polytechnic University

30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia,

Department of High Technology Physics in Mechanical Engineering;

Engineer.

E-mail: rvy@ispms.ru.

Chumaevskii Andrey Valeryevich

Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian branch of Russian Academy of Sciences

2/4, Academichesky ave., Tomsk, Russia, 634055,

Laboratory for quality control in materials and structures;

Ph.D., Junior research staff

E-mail: tch7av@gmail.ru.

Kolubaev Alexander Victorovich

Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian branch of Russian Academy of Sciences

2/4, Academichesky ave., Tomsk, Russia, 634055,

Laboratory of Physics of Surface Hardening;

Dr. Habil., Head of laboratory.

E-mail: kav@ispms.ru.

Kolubaev Evgeny Alexandrovich

Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian branch of Russian Academy of Sciences

2/4, Academicheskoy ave., Tomsk, Russia, 634055,

Laboratory for quality control in materials and structures;

Ph.D., Head of laboratory.

National Research Tomsk Polytechnic University

30, Lenin ave., Tomsk, Russia, 634050,

Institute of High Technology Physics;

Deputy Director.

E-mail: eak@ispms.ru.

This work contains results of AA5056 strength properties investigation after severe thermomechanical influence by friction stir method. Order of specimen preparation for mechanical testing is shown. Tensile diagrams of samples are reported. Fractography of fractured surface is undertaken. Possibility of higher strength achievement due to friction stir processing is demonstrated.

Keywords: friction stir processing, severe plastic deformation, discontinuous yielding, aluminum alloy.

УДК. 539.4: 669-175.2: 621.791.05: 66.669

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ УДАРНАЯ ОБРАБОТКА КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**Смирнова Анастасия Сергеевна;**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, дом 30

Институт физики высоких технологий, кафедра материаловедения в машиностроении

Аспирант

Телефон: 8-913-105-20-29

E-mail: nasO@mail2000.ru

Почивалов Юрий Иванович;

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4

В.н.с. лаборатории физической мезомеханики и неразрушающих методов контроля, к.ф.-м.н.

Телефон: 8-913-807-79-61

E-mail: pochiv@ispms.tsc.ru

Панин Виктор Евгеньевич;

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4

Академик РАН, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физической мезомеханики и неразрушающих методов контроля
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, дом 30

Институт физики высоких технологий, кафедра материаловедения в машиностроении, профессор

Телефон: (3822) 49-24-81

Email: paninve@ispms.tsc.ru

Применение термомеханической обработки, включающей ультразвуковую ковку поверхностных слоев, дает возможность существенно поднять усталостные и механические характеристики сварных соединений. На основании полученных данных обсуждаются механизмы повышения усталостных характеристик исследуемых сварных соединений титановых и алюминиевых сплавов после ультразвуковой обработки.

Ключевые слова: ультразвуковая механическая ковка, сварные соединения, титановые сплавы, алюминий-литиевые сплавы, высокопрочные стали, наноструктурирование

ULTRASONIC IMPACT TREATMENT AS WAY OF INCREASE IN FATIGUE LIFE WELDED JOINTS OF CONSTRUCTIONAL MATERIALS

Smirnova Anastasija Sergeevna:

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk Polytechnic University, TPU
30, Lenina ave., Tomsk, Russia, 634050,

Institute of High Technology Physics, Department of Material Science in Mechanical Engineering

Postgraduate

Phone: 8-913-105-20-29

Email: nasO@mail2000.ru

Pochivalov Yuriy Ivanovich:

Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (ISPMS SB RAS)

2/4, Akademicheskii ave., Tomsk, Russia, 634055,

laboratory of physical mesomechanics of materials and non-destructive testing

Ph.D. in Physics and Mathematical Sciences, Senior Researcher

Phone: 8-913-807-79-61

Email: pochiv@ispms.tsc.ru

Panin Viktor Evgenievich:

Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (ISPMS SB RAS)

2/4, Akademicheskii ave., Tomsk, Russia, 634055,

laboratory of physical mesomechanics of materials and non-destructive testing

Scientific Leader, D.Sc., Professor, Academician of RAS

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk Polytechnic University, TPU

30, Lenina ave., Tomsk, Russia, 634050,

Institute of High Technology Physics, Department of Material Science in Mechanical Engineering, professor

Phone: (3822) 49-24-81

Email: paninve@ispms.tsc.ru

The experimental tests have revealed that the fatigue life of the welded joints with thermomechanical treatment including ultrasonic mechanical forging provides a multiple increase in fatigue life as opposed to the untreated welded joints. According to the presented data, mechanisms of increase of fatigue characteristics of the welded joints titanium and aluminum alloys after ultrasonic mechanical forging are discussed.

Key words: ultrasonic mechanical forging, welded joints, titanium alloys, aluminum alloys, high-strength steel, nanostructuring

УДК 621.893 - 022.532:621.983

ТОПОКОМПОЗИТЫ ДЛЯ МНОГОПЕРЕХОДНОЙ ВЫТЯЖКИ КУЗОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Шульга Геннадий Иванович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (Новочеркасский политехнический институт) имени М.И. Платова»
346428, г.Новочеркасск Ростовской области, ул.Просвещения, 132
кафедра «Автомобили и транспортно-технологические комплексы»
доктор технических наук, профессор
Телефон: 8-928-629-04-24
E-mail: g.shulga41@mail.ru

Шульга Татьяна Геннадиевна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС)»
344038 г.Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2
кафедра «Безопасность жизнедеятельности»
кандидат технических наук, доцент
Телефон: 8-904-441-11-41
E-mail: t.shulga@mail.ru

Рассмотрены возможности применения топокомпози́тов при листовой вытяжке деталей кузовов автомобилей в замен, применяемых жидких, пластичных, пастообразных смазочных материалов. Приведены сравнительные испытания топокомпози́та ТК-2 и покрытия на основе цапон-лака НЦ-62, выполненные на приборе МТЛ-10Г-1.

Ключевые слова: топокомпози́т, многопереходная вытяжка, кузов, микролегированная сталь, смазочный материал, аддитивная технология

TOPOKOMPOSITES FOR MULTITRANSIENT STRETCHING BODY PARTS VEHICLES

Sulga Gennady Ivanovich

Platov South Russian State Polytechnical University (Novocherkassk Polytechnic Insnitut),
132, Prosvesheniya st., Novocherkassk, Rostov region, Russia, 346428,
Chair«Automobiles, transport and technological complexes»,
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Phone 8-928-629-04-24
E-mail: g.shulga41@mail.ru

Shulga Tatyana G.

Rostov State Transport University

2, Rostovskogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia, 344006,

Chair «Life Safety»

Candidate of Engineering Sciences, Associated Professor

Phone 8-904-441-11-41

E-mail: t.shulga@mail.ru

The possibilities of application topokompozitov with leaf extract parts of car bodies in return for used liquid, plastic, pasty lubricants. Comparative tests topokompozita TK-2 and coatings based on tsapon varnish NC-62, made on the device MTL-10G-1.

Keywords: topokompozit, multijunction hood, body, micro-alloyed steel, lubricant additive technology

УДК 51-72:[538.951+538.956]

ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД: ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ И МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ**Яковлев Виктор Борисович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.

Доктор физико-математических наук, профессор, профессор РАН

E-mail: yakovlev@miee.ru

Представлен подход к моделированию и вычислению эффективных и локальных упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических свойств композиционных материалов. На примере анализа диэлектрических свойств продемонстрирован подробный вывод основных соотношений.

Ключевые слова: моделирование, композит, поликристалл, эффективные свойства, локальные распределения физических полей.

CHARACTERISTICS OF HETEROGENEOUS MEDIA: MODELLING APPROACHES AND CALCULATION METHODS**Yakovlev Victor Borisovich**

National Research University of Electronic Technology

1, Shokin sq., Moscow, Zelenograd, , Russia, 124498

Doctor of Physics and Mathematics, professor, professor of RAS

E-mail: yakovlev@miee.ru

Approaches to modeling and calculation of the effective and local elastic, dielectric and piezoelectric properties of composite materials are presented. The detailed derivation of the basic equations is demonstrated by analyzing the dielectric properties.

Key words: modeling, composite, polycrystal, effective properties, local distributions of physical fields.

УДК 621.7.043

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ДЕТАЛИ

Коробейников Владимир Владимирович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»,
344038, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2,
Кафедра «Эксплуатация и ремонт машин»,
Аспирант
E-mail: vladimir6666662009@yandex.ru

С привлечением технологии повышения качества наплавленного металла деталей поверхностным пластическим деформированием.

Ключевые слова: механическая обработка, наплавка, шероховатость, износостойкость, поверхностное пластическое деформирование.

ANALYSIS OF EXISTING METHODS OF MACHINING OF DEPOSITED METAL DETAILS

Korobeynikov Vladimir Vladimirovich

Rostov State Transport University,
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia,
344038,
Chair «Maintenance and repair of track machines»,
Postgraduate student,
E-mail: vladimir6666662009@yandex.ru

With use of technology to improve the quality of deposited metal of components by surface plastic deformation.

Keywords: mechanical operation, fusing, roughness, durability, surface plastic deformation.

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ УЗЛОВ ТРЕНИЯ, РАБОТАЮЩИХ В ТРИБОСИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ МЕХАНИЧЕСКОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ

Колесников Владимир Иванович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»;
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2;
Доктор технических наук, профессор, академик РАН.
E-mail: kvi@rgups.ru

Иваночкин Павел Григорьевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»;

344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2;
Доктор технических наук, профессор.
E-mail: ivanochkin_p_g@mail.ru

Воропаев Александр Иванович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»;
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2;
Директор научно-испытательного центра «Нанотехнологии и трибосистемы».
E-mail: vai_nano@rgups.ru

В статье представлен тепловой расчёт тяжело нагруженного узла трения с нанесённым антифрикционным слоем в условиях динамического нагружения. Разработана методика и проведены лабораторные испытания по оценке влияния амплитуды и частоты динамического воздействия на коэффициент трения и интенсивность изнашивания.

Ключевые слова: коэффициент трения, температура, интенсивность изнашивания, частота и амплитуда динамического нагружения.

Kolesnikov Vladimir Ivanovich

Rostov State Transport University,
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia,
344038
professor, Doctor of Technical Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences,
Phone: 7(863) 245-49-29,
E-mail: kvi@rgups.ru

Ivanochkin Pavel Grigorevich

Rostov State University of Communications (RSTU),
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia,
344038
Doctor of Engineering Sciences, Professor
Phone/fax: +7-863-272-64-97
Email: ivanochkin_p_g@mail.ru

Voropaev Alexander Ivanovich

Rostov State University of Communications (RSTU),
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia,
344038
Director of the test center «Nanotechnology and tribosystem».
E-mail: vai_nano@rgups.ru

The article presents the calculation of thermal heavy-duty friction unit is coated with an anti-friction layer under dynamic loading. The technique and conducted laboratory tests to evaluate the effect of the amplitude and frequency of the dynamic effects on the coefficient of friction and wear rate.

Keywords: friction coefficient, temperature and wear rate, the frequency and amplitude of dynamic loading.

УДК 620.179.16

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТАДИЙ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАТЕРИАЛОВ ПО ДАННЫМ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Буйло Сергей Иванович

Институт математики, механики и компьютерных наук Южного федерального университета,

344090, пр. Стачки, 200/1, г. Ростов-на-Дону, Россия.

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник,

Ведущий научный сотрудник

Телефон: 8(951)8442722

E-mail: sibuiloo@yandex.ru

Иваночкин Павел Григорьевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС)

344038 г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения 2,

д.т.н., профессор,

Телефон (863) 259-53-48

E-mail: ivanochkin_p_g@mail.ru

Мясникова Нина Алексеевна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС)

344038 г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения 2,

к.ф.-м.н., доцент,

Телефон (863) 272-64-97

E-mail: myasnikova@rgups.ru

Исследована возможность идентификации стадий фрикционного взаимодействия материалов по данным акустико-эмиссионных (АЭ) испытаний. Предложен метод идентификации стадий трения по появлению переломов интенсивности потока актов АЭ и диагностике катастрофического разрушения по возрастанию интенсивности потока актов сопутствующей АЭ и появлению в спектре регистрируемой АЭ большого количества дискретных частот.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, диагностика, жидкие среды, кинетика, неразрушающий контроль, смазка, трение, трибология.

IDENTIFICATION THE STAGES OF FRICTIONAL INTERACTION OF MATERIALS ACCORDING TO THE ACOUSTIC EMISSION TESTING

Builo Sergey Ivanovich

Mechanics and Computer Sciences Institute, Southern Federal University

200/1, Stachky Ave., Rostov-on-Don, Russia, 344090,

Doctor of physico-mathematical Sciences, senior researcher, WAC,

Leading researcher at IMM and KM

Phone: 8(951)8442722

E-mail: sibuiloo@yandex.ru

Ivanochkin Pavel Grigorevich

Rostov State University of Communications (RSTU),

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia, 344038

Doctor of Engineering Sciences, Professor

Phone/fax+7-863-272-64-97

Email: ivanochkin_p_g@mail.ru

Myasnikova Nina Alexeevna

Rostov State University of Communications (RSTU),

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia, 344038

Candidate of Physics and mathematics Sciences, Associated Professor

Phone/fax +7-863-272-64-97,

E-mail: myasnikova@rgups.ru

The possibility of identifying the stages of frictional interaction of materials according to the acoustic emission (AE) testing is investigated. A method for identifying the stages of friction by the appearance of the flow rate of AE intensity and for diagnosing the stage of catastrophic failure by increasing the intensity of stream of AE events and the accompanying rise in the spectrum of AE recorded a large number of discrete frequencies is proposed.

Keywords: acoustic emission, diagnostics, liquid media, kinetics, nondestructive testing, lubrication, friction, tribology.

УДК 621.891 + 06

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ МОДЕЛИ ПАРЫ ТРЕНИЯ
«ВАЛ–КОЛОДКА»**

Буракова Марина Андреевна;

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»;

344038, г. Ростов –на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2;

Кандидат технических наук, доцент.

E-mail: ma.burakova@yandex.ru.

Даровской Геннадий Викторович;

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»;

344038, г. Ростов –на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2;

Кандидат технических наук, доцент.

E-mail: graffdarovskoi@yandex.ru.

Поляков Владимир Николаевич;

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»;

344038, г. Ростов –на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2;

Инженер

E-mail: vovapolyakov@mail.ru.

Проведенные исследования и расчеты позволили установить устойчивый режим гидродинамического смазывания при моделировании самоустанавливающейся пары трения «вал – колодка».

Ключевые слова: режим гидродинамического смазывания, моделирование, самоустанавливающаяся пара трения

HYDRODYNAMIC STABILITY OF THE MODEL FRICTION COUPLE "SHAFT-PAD"

Burakova Marina Andreevna

Rostov State Transport University,
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenya sq., Rostov-on-Don, 344038
Candidate of technical sciences, associate Professor,
Phone: 27-26-270, +7-928-773-14-98
E-mail: ma.burakova@yandex.ru.

Darovskoy Gennady Viktorovich;

Rostov State Transport University,
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenya sq., Rostov-on-Don, 344038
Candidate of technical Sciences, associate Professor.
E-mail: graffdarovskoi@yandex.ru.

Polyakov Vladimir Nikolaevich

Rostov State Transport University,
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenya sq., Rostov-on-Don, 344038
Engineer
E-mail: vovapolyakov@mail.ru

Studies and calculations have allowed to establish a stable regime of hydrodynamic lubrication in the modeling of self-aligning friction pair "shaft – pad".

Keywords: mode of hydrodynamic lubrication, modeling, self-aligning bearing couple.

УДК 621.894:620.179.16

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДИАГНОСТИКА СПЛОШНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ С ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫМИ КОМПОЗИТАМИ ФРИКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Кожушко Виктор Владимирович

Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси
246050, г. Гомель, ул. Кирова 32а, Республика Беларусь
К.ф.-м.н., ст. научный сотрудник
Телефон: +375 232 779101
E-mail: kozhushko@laser-ultrasound.com

Сергиенко Владимир Петрович

Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси
246050, г. Гомель, ул. Кирова 32а, Республика Беларусь
К.т.н., доцент, заведующий отделом
Телефон: +375 232 773575

E-mail: sergienko_vp@mail.ru

Сычев Александр Павлович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС)

344038 г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения
2,

к.ф.-м.н., доцент

E-mail: sap@rgups.ru

В работе рассматривается возможность применение широкополосных ультразвуковых преобразователей для решения задач контроля сплошности адгезии металлополимерных композитов фрикционного назначения. Фрикционный материал является сложным композитом полимеров, минералов и металлических включений со значительными локальными изменениями плотности и акустических импедансов, что вызывает сильное рассеяния зондирующих ультразвуковых импульсов на границах раздела микрочастиц материалов. Для решения задачи диагностики предлагается оптимизация рабочего спектрального диапазона и сильное демпфирование пьезоэлектрических тонкоплёночных преобразователей.

Ключевые слова: фрикционные композиты, металлополимерные изделия, неразрушающий контроль; ультразвуковая диагностика

ULTRASONIC DIAGNOSTICS OF ADHESION CONTINUITY BETWEEN METAL BASE AND HIGH-FILLED FRICTION COMPISITE

Kozhushko Victor Vladimirovich

Senior staff researcher

V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus

32a Kirova street, Gomel, 246050, Republic of Belarus

Phone: +375 232 779101

E-mail: kozhushko@laser-ultrasound.com

Sergienko Vladimir Petrovich

Head of department

V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus

32a Kirova street, Gomel, 246050, Republic of Belarus

Phone: +375 232 773575

E-mail: 7sergienko_vp@mail.ru

Sychev Alexander Pavlovich

Associate Professor

Rostov State Transport University

E-mail: sap@rgups.ru

The application of ultrasonic transducers for evaluation of adhesion continuity between the metal base and friction lining is considered. Friction composites comprise polymers, minerals, and metallic particles that cause strong scattering of probe ultrasonic pulses at the interfaces. The paper deals with the tasks of optimization of the operation bandwidth and heavy damping of transducers on the base of polarized piezoelectric polymer films.

Keyword: friction composites; metal-polymer products; nondestructive testing; ultrasonic diagnostics

УДК 621.891+06

МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ КОМПОНЕНТ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРИБОСИСТЕМ

Кохановский Вадим Алексеевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»,
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения,
д. 2.

Доктор технических наук, профессор,
E-mail: vcohan@yandex.ru

Иванов Сергей Иванович,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Таганрогского филиала Донского государственного технического университета (ДГТУ),
347900, г. Таганрог, пер. Донской, д.26

Кандидат технических наук, старший преподаватель,
E-mail: ivanov.dstu@mail.ru

Петренко Андрей Александрович,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Таганрогского филиала Донского государственного технического университета (ДГТУ),
347900, г. Таганрог, пер. Донской, д.26

старший преподаватель,
E-mail: petrenko.dstu@mail.ru

Больших Иван Валерьевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»,
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения,
д. 2,

ассистент,
E-mail: ivan.bolshih@yandex.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния металлических элементов на приработку металлополимерных трибосистем.

Ключевые слова: металлополимерные трибосистемы, металлические контртела, контактных напряжений, микрогеометрия, параметры приработки, зависимость приработочного износа.

THE METAL COMPONENT OF THE METAL-POLYMER TRIBOSYSTEM

Kochanowski Vadim Alekseevich

Rostov State Transport University,
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia,
344038,

Doctor of technical Sciences, Professor,
E-mail: vcohan@yandex.ru

Ivanov Sergey Ivanovich,

Federal state budget educational establishment of higher education Taganrog branch of don state technical University (DSTU),
26, Donskoy Lane, Taganrog, 347900,
Candidate of technical Sciences, senior lecturer,
E-mail: ivanov.dstu@mail.ru

Petrenko Andrey,

Federal state budget educational establishment of higher education Taganrog branch of don state technical University (DSTU),
26, Donskoy Lane, Taganrog, 347900,
senior lecturer,
E-mail: petrenko.dstu@mail.ru

Bolshih Ivan Valerevich

Rostov State Transport University,
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia,
344038,
assistant,
E-mail: ivan.bolshih@yandex.ru

The results of experimental studies of the effects of metallic elements in frictional metal-tribosystem.

Key words: metal-polymer tribosystem, the metal counterbody, contact stresses, micro-geometry, running parameters, the dependence of the running-wear.

УДК 629.4 +06

ИССЛЕДОВАНИЯ ВПИСЫВАНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В КРИВОЛИНЕЙНЫЙ УЧАСТОК ПУТИ**Озябкин Андрей Львович;**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»;
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2;
Доктор технических наук.
E-mail: ozyabkin@mail.ru

Никитина Мария Игоревна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»
344038, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2,
Магистрант,
E-mail: manunya3000@mail.ru

Коваленко Любовь Ивановна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»

344038, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2,
Аспирант,

Методами А.В. Чичинадзе исследованы контактные нагрузки с помощью контактной задачи Герца, возникающие при взаимодействии колёсных пар и рельсов в кривых малого радиуса.

Ключевые слова: тепловоз, непогашенное ускорение, контактные нагрузки, теория Герца.

RESEARCHES THE DESCRIPTION OF THE ROLLING STOCK TO THE CURVILINEAR SITE OF THE WAY

Ozyabkin Andrey Lvovich

Rostov State Transport University

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia, 344038,

Dr. Sc.,

E-mail: ozyabkin@mail.ru

Nikitina Maria Igorevna

Rostov State Transport University (RSTU),

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia, 344038,

Undergraduate

E-mail: manunya3000@mail.ru

Kovalenko Liubov Ivanivna

Rostov State Transport University (RSTU),

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia, 344038,

Postgraduate

Methods A.V. Chichinadze has investigated the contact loadings by means of a contact problem of Hertz arising at interaction of wheel couples and rails in curves of small radius.

Keywords: locomotive, outstanding acceleration, contact loadings, theory of Hertz.

УДК 620.178.37

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПЫТАНИЙ НА ИЗНАШИВАНИЕ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Памфилов Евгений Анатольевич

Брянский государственный технический университет

241035, город Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7

Доктор технических наук, профессор

Телефон: 89051001751

E-mail: pamfilov@bgita.ru

Пилюшина Галина Анатольевна

Брянский государственный инженерно-технологический университет
241037, город Брянск, проспект Станке Димитрова, 3
Кандидат технических наук, доцент
Телефон: 89803103543
E-mail: gal-pi2009@yandex.ru

Рассмотрены методы испытаний материалов на изнашивание при динамических нагрузках. Представлено испытательное оборудование при трении по абразиву, при ударных нагрузках при низких температурах. Даны рекомендации по условиям и режимам проведения испытаний.

Ключевые слова: методы испытаний, изнашивание, трение, низкие температуры, функциональные поверхности, динамические нагрузки, ударные нагрузки, ударно-абразивное изнашивание.

METHODOLOGICAL BASES OF TESTS FOR WEAR PROCESS IN THE CONDITIONS OF DYNAMIC LOADINGS**Pamfilov Evgenie Anatolevich**

Bryansk state technical university
7, 50 years of October blvd., Bryansk, 241035,
Dr.Sci.Tech., the professor
Phone: 89051001751
E-mail: pamfilov@bgita.ru

Piljushina Galina Anatolevna

Bryansk state engineering-technological university
3, Stanke Dimitrova ave., Bryansk, 241037
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer
Phone: 89803103543
E-mail: gal-pi2009@yandex.ru

Test methods of materials on wear process Are considered at dynamic loadings. The test equipment is presented at a friction on an abrasive, at shock loadings at low temperatures. Recommendations about conditions and modes of carrying out of tests are given.

Keywords: test methods, wear process, a friction, low temperatures, functional surfaces, dynamic loadings, shock loadings, with great dispatch-abrasive wear process.

УДК 620.178.162.4; 620.194.3

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИСПЫТАНИЙ КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОГО ИЗНАШИВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ**Памфилов Евгений Анатольевич**

Брянский государственный технический университет
241035, Россия, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7.
д.т.н., профессор
Телефон: (4832)74-16-46
E-mail: pamfilov@bgita.ru

Прозоров Ярослав Сергеевич

Брянский государственный инженерно-технологический университет
241050, Россия, Брянская область, г. Брянск, проспект Станке Димитрова, 3.
к.т.н., старший преподаватель
Телефон: 89605616009
E-mail: prozorov@bgita.ru

Кузнецов Сергей Викторович

Брянский государственный университет имени академика И.Г.Петровского
241036, Россия, Брянская область, г. Брянск, ул. Бежицкая, 14.
к.х.н., доцент, заведующий кафедрой
Телефон: (4832) 66-65-38
E-mail: passivoxid@mail.ru

Лукашов Сергей Викторович

Брянский государственный инженерно-технологический университет
241050, Россия, Брянская область, г. Брянск, проспект Станке Димитрова, 3.
к.х.н., доцент кафедры
Телефон: (4832) 64-96-29
E-mail: SergeLukashov@yandex.ru

Дана краткая характеристика коррозионно-механического вида изнашивания. Рассмотрены схемы для его исследования в условиях трения скольжения. Выделены основные группы методов исследования коррозионно-механического изнашивания: гальванические, потенциодинамические, потенциостатические и электрохимическая импедансная спектроскопия. Приведено описание каждой группы методов и сделан их краткий сравнительный анализ.

Ключевые слова: коррозионно-механическое изнашивание, трение скольжения, трибокоррозия, трибоэлектрохимическая ячейка, электрохимическая импедансная спектроскопия.

METHODS AND MEANS OF TESTING CORROSION-MECHANICAL WEAR IN CONDITIONS OF SLIDING FRICTION**Pamfilov Evgeny Anatolievich**

Bryansk state technical university
7, 50 years of October Blvd., Bryansk, 241035
Ph. D., Professor,
Phone: (4832)74-16-46
E-mail: pamfilov@bgita.ru

Prozorov Yaroslav Sergeevich

Bryansk state engineering-technological university
3, Stanke Dimitrova ave., Russia, 241050
Ph. D., senior lecturer
Phone: 89605616009
E-mail: prozorov@bgita.ru

Kuznetsov Sergey Viktorovich

Bryansk state University named after academician I. G. Petrovsky
14, Bezhitskaya str., Bryansk, Russia, 241036

Ph. D., associate Professor, head of Department
Phone: (4832) 66-65-38
E-mail: passivoxid@mail.ru

Lukashov Sergey Viktorovich

Bryansk state engineering-technological uUniversity
3, Stanke Dimitrova ave., Bryansk, Russia, 241050
Ph. D., associate Professor
Phone: (4832) 64-96-29
E-mail: SergeLukashov@yandex.ru

This article presents the short characteristic of corrosion-mechanical wear. There are schemes for his research in conditions of sliding friction. Main groups of methods are galvanic, potentiodynamic, potentiostatic and electrochemical impedance spectroscopy. The brief comparative analysis of each group of methods is shown.

Keywords: corrosion-mechanical wear, tribocorrosion, electrochemical cell, electrochemical impedance spectroscopy

УДК 621.891:620.178.16

**УНИКАЛЬНЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ
ТРИБОИССЛЕДОВАНИЙ**

Дерлугян Петр Дмитриевич

Акционерное общество «Особое конструкторско-технологическое бюро «Орион»
346428, г. Новочеркасск, Ростовская обл., ул. Михайловская, 150 «а»
Канд. техн. наук, доцент, Генеральный директор.
Телефон: (8635)22-24-45
E-mail: maslianit@inbox.ru

Могильницкий Вячеслав Михайлович

Акционерное общество «Особое конструкторско-технологическое бюро «Орион»
346428, г. Новочеркасск, Ростовская обл., ул. Михайловская, 150 «а»
Канд. техн. наук, начальник лаборатории
Телефон: (8635)24-82-24
E-mail: orion-m.novoch@yandex.ru

Чебанов Рафаил Александрович

Акционерное общество «Особое конструкторско-технологическое бюро «Орион»
346428, г. Новочеркасск, Ростовская обл., ул. Михайловская, 150 «а»
Ведущий инженер
Тел. (8635)24-82-24
E-mail: orion-m.novoch@yandex.ru

Уникальная установка трения УСУТ-2, оснащенная современными методами исследования трибопроцессов, дает возможность достижения значимых научных результатов в области антифрикционного материаловедения и трибологии, проведения междисциплинарных исследований для широкого диапазона материалов. Исследовательский комплекс УСУТ-2 внесен в перечень Минобрнауки «Уникальные научные установки» РФ.

Ключевые слова: уникальная стендовая установка трения, композиционный антифрикционный материал, узлы трения механизмов

A UNIQUE TESTING FACILITY FOR TRIBOELEMENT

Derlugyan Peter Dmitriyevich

Joint - stock company "Special konstruktorsko-technological Bureau "Orion"

150 "a", Mikhailovskaya str., Novocherkassk, Rostov region, 346428,

Cand. tech. Sciences, Professor, academician of the Russian Academy of engineering, the Director-General.

Phone: (8635)22-24-45.

E-mail: maslianit@inbox.ru

Mogilnitskiy Vyacheslav Mikhailovich

Joint-stock company "Special konstruktorsko-technological Bureau "Orion"

150 "a", Mikhailovskaya str., Novocherkassk, Rostov region, 346428,

Cand. tech. Sciences, head of laboratory

Phone: (8635)24-82-24. E-mail: orion-m.novoch@yandex.ru

Chebanov Raphael Alexandrovich

Joint-stock company "Special konstruktorsko-technological Bureau "Orion"

150 "a", Mikhailovskaya str., Novocherkassk, Rostov region, 346428,

Lead engineer

Phone: (8635)24-82-24.

E-mail: orion-m.novoch@yandex.ru

Re-equipment of the omni-purpose friction testing system USUT-2 with up-to-date scientific equipment and supporting of applied researches by tribo-scientific investigations provided operational capacity enhancement of the system USUT-2. Testing data of the advanced compositional antifrictional material allows us to recommend it to be used in mounting-travel friction units of hydraulic works.

Keywords: friction testing system, compositional antifrictional material, friction units of mechanisms.

УДК 621.892

ВЛИЯНИЕ ФРИКЦИОННОГО НАГРЕВА И НАПОЛНЕНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА

Седакова Елена Борисовна

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки ИПМ РАН.

199178, г. Санкт-Петербург, Большой пр., В.О., д. 61.

д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник,

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

д.т.н., профессор,

Телефон: 8-911-271-1103,

E-mail: elenasedakova2006@yandex.ru

Козырев Юрий Петрович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки ИПМ РАН.
Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, Большой пр., В.О., д. 61.
к.т.н., старший научный сотрудник,
Телефон: (812)321-47-74.
E-mail: ykoz2006@yandex.ru

В результате испытаний на износ полимерных материалов с различными температурами стеклования и размягчения показано, что при превышении этих температур происходит резкое снижение износостойкости материалов за счет увеличения адгезии к металлическому контртелу. Разработана методика расчета температуры в зоне фрикционного контакта.

Ключевые слова: адгезионный износ, износостойкость, температура стеклования, политетрафторэтилен, полиэфирэфиркетон, композит.

THE INFLUENCE OF FRICTIONAL HEATING AND FILLING IN THE CHANGE OF THE PHYSICAL STATE AND WEAR RESISTANCE OF POLYTETRAFLUOROETHYLENE AND POLYETHERETHERKETONE**Sedakova Elena Borisovna**

Institute of Problems in Mechanical Engineering Russian Academy of Science
61, Bolshoy ave., Saint-Petersburg, Russia, 199178,
Dr. of Tech. Sciences, Leading Researcher
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University
Dr. of Tech. Sciences, Professor,
Phone: 8-911-271-1103,
E-mail: elenasedakova2006@yandex.ru

Kozyrev Yuri Petrovich

Institute of Problems in Mechanical Engineering Russian Academy of Science
61, Bolshoy ave., Saint-Petersburg, Russia, 199178,
Ph. D., Senior Researcher
Phone: (812)321-47-74.
E-mail: ykoz2006@yandex.ru

As a result of tests on the wear of polymeric materials with different glass transition temperatures and softening it is shown that beyond these temperatures there is a sharp reduction of wear resistance of materials due to the increase of adhesion to the metal counterbody. The developed method of calculation of the temperature in the zone of friction contact.

Keywords: adhesive wear, wear resistance, glass transition temperature, polytetrafluoroethylene, polyetheretherketone, composite

УДК 621.001.4

ИСПЫТАНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА МИКРОАБРАЗИВНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ**Тополянский Павел Абрамович**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29,

Кандидат технических наук, доцент,
Телефон: 8-901-3200802,
E-mail: info@plasmacentre.ru

Ермаков Сергей Александрович

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29,
Кандидат технических наук, доцент,
Телефон: 8-911-2378621,
E-mail: info@plasmacentre.ru

Тополянский Андрей Павлович,

ООО «Плазмацентр»,
195112, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 68, оф. 103, генеральный директор,
аспирант, т. 8-953- 3540979,
E-mail: info@plasmacentre.ru

Разработана методика испытаний тонкопленочных покрытий на микроабразивное изнашивание. Приведены результаты испытаний на микроабразивное изнашивание покрытия MultiPateks (H-SiOCN), нанесенного методом финишного плазменного упрочнения, на быстрорежущую сталь P6M5.

Ключевые слова: финишное плазменное упрочнение, износостойкое нанопокрывтие, испытания на микроабразивное изнашивание.

MICRO-ABRASIVE WEAR TEST TRIBOLOGICAL COATINGS

Topolianskii Pavel Abramovich

„Welding and Laser Technologies” St. Petersburg Polytechnic University,
29, Polytechnic Str., St. Petersburg, Russia, 195251,
Ph. D, associate professor of the department
E-mail: info@plasmacentre.ru

Ermakov Sergy Aleksandrovich

„Welding and Laser Technologies” St. Petersburg Polytechnic University,
29, Polytechnic Str., St. Petersburg, Russia, 195251,
Ph. D, associate professor of the department
E-mail: info@plasmacentre.ru

Topolyansky Andrey Pavlovich

St. Petersburg Polytechnic University, General Director of ООО «Plasmacentre».
of.103, 68, Malookhtinsky ave., St. Petersburg, Russia, 195112,
graduate student
E-mail: andrey@plasmacentre.ru

Development of the testing procedure for thin-film coatings microabrasive wear testing. Results of microabrasive wear testing of the MultiPateks (H-SiOCN) coating layered by the finishing plasma hardening method on rapid steel P6M5.

Key words: finishing plasma hardening, wear-resistant nanocoating, microabrasive wear testing.

УДК 539.62

МАСШТАБНЫЙ ФАКТОР В ПРОЧНОСТНЫХ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В МИКРО- И НАНОШКАЛЕ

Тюрин Александр Иванович;

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина»

392000, г. Тамбов, ул. Интернациональная, д. 33;

НОЦ «Нанотехнологии и наноматериалы»;

К.ф.-м.н., доцент.

E-mail: tyurin@tsu.tmb.ru

Пирожкова Татьяна Сергеевна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина»

392000, г. Тамбов, ул. Интернациональная, д. 33;

НОЦ «Нанотехнологии и наноматериалы»;

Аспирант.

E-mail: t-s-pir@ya.ru

Методами динамического микро- и наноиндентирования исследовано влияние масштабного фактора на упругие, пластические, прочностные и трибологические свойства твердых тел в микро- и наномасштабе.

Ключевые слова: наноиндентирование, нанотвердость, размерные эффекты, трение в микро- и наномасштабе, локальная деформация, микромеханизмы локальной деформации, начальные стадии пластичности.

SIZE EFFECT FOR TOUGHNESS AND FRICTION PROPERTIES IN MICRO- AND NANOSCALE

Tyurin Alexander Ivanovich;

G.R. Derzhavin Tambov State University

33, Internatcionalnaya St., Tambov, 392000

NanoCenter “Nanotechnology and Nanomaterials”;

Ph.D

E-mail: tyurin@tsu.tmb.ru

Pirozhkova Tatyana Sergeevna

G.R. Derzhavin Tambov State University

33, Internatcionalnaya St., Tambov, 392000

NanoCenter “Nanotechnology and Nanomaterials”;

postgraduate.

E-mail: t-s-pir@ya.ru

With the use of the micro- and nanoindentation method to study size effect for elastic, plastic, toughness and friction properties in micro- and nanoscale

Key words: nanoindentation, nanohardness, size effect, friction properties in micro- and nanoscale, local deformation, micromechanisms, plastic.

УДК 544.18:539.4

СОВМЕСТИМОСТЬ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ГРАНИЦАХ ЗЕРЕН В СТАЛИ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА СТАЛИ

Мигаль Юрий Федорович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки ЮНЦ РАН,
344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, д. 41;

лаборатория транспорта и новых композиционных материалов;

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник.

E-mail: ymigal@mail.ru

Телефон: 8(863)2726272

Колесников Владимир Иванович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»;

344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения,
д. 2;

доктор технических наук, профессор, академик РАН,

E-mail: kvi@rgups.ru

Телефон: 8(863)2726336

Проведены расчеты энергии связи границ зерен в стали, содержащих элементы шестого периода. Использованы метод DFT и модель пластины.

Ключевые слова: элементный состав, химическая связь, границы зерен.

COMPATIBILITY OF CHEMICAL ELEMENTS ON GRAIN BOUNDARIES IN STEEL AND ITS INFLUENCE ON STRENGTH PROPERTIES OF STEEL

Migal Yuri Fedorovich

Southern Scientific Centre of Russian Academy of Sciences,
41, Chekhov av., Rostov-on-Don, 344006, Russia,

Laboratory of transport and new compositional materials,

doctor of Physical and Mathematical Sciences, chief researcher,

E-mail: ymigal@mail.ru

Phone: 8(863)2726272

Kolesnikov Vladimir Ivanovich

Rostov State Transport University (RSTU),

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia,
344038,

Doctor of Engineering Sciences, Academician of Russian Academy of Sciences,

E-mail: kvi@rgups.ru

Phone: 8(863)2726336

Calculations of binding energy of grain boundaries in steel containing elements of the sixth period are carried out. The DFT method and a slab model are used.

Keywords: element structure, chemical bond, grain boundaries.

УДК 652.2:504 + 06

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ

Борисова Анастасия Викторовна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2,
к.т.н., старший преподаватель
E-mail: nastja004@bk.ru

В работе рассмотрены основные теоретические подходы к выбору приборного оборудования при комплектации экоаналитических лабораторий транспортной отрасли. Предложена методика оптимального выбора средств измерений физических и химических факторов окружающей среды. Представлена модернизированная функциональная схема передвижного измерительно-вычислительного комплекса экологического вагона-лаборатории.

Ключевые слова: экологический вагон-лаборатория, экологический мониторинг, методика оптимального выбора приборного оборудования

IMPROVING THE SYSTEM OF ECOLOGICAL MONITORING OF THE TRANSPORT INDUSTRY

Borisova Anastasiya Victorovna

Rostov State Transport University
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia, 344038,
candidate of technical Sciences, senior lecturer
E-mail: nastja004@bk.ru

In work the main theoretical approaches to a choice of the instrument equipment at a complete set of eco-analytical laboratories of transport branch are considered. The methodology of an optimum choice of measuring instruments of physical and chemical factors of environment is offered. The modernized function chart of the mobile measuring computer system of the ecological car laboratory is presented.

Keyword: ecological car-laboratory, environmental monitoring, methods of optimum selection of equipment

УДК 536.24/658.51

СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ДИОКСИДА АЗОТА И САЖИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРЕВПРЫСКА В ДВИГАТЕЛЯХ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН.

Деундяк Дмитрий Владимирович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»
Кандидат технических наук, инженер

Телефон: +7928-178-75-27
E-mail: dmi.deundiak@yandex.ru

Ужесточение нормативов выбросов от двигателей транспортных средств (ТС), особенно в отношении выбросов твердых частиц сажи и смеси оксидов азота NO_x воздействующих как на человека в среде его жизнедеятельности и риски профессиональных заболеваний ставит все более новые задачи перед производителями двигателей при создании новых конструктивов и модернизации существующих типов.

В связи с глобальным потеплением климата необходимо снижать расход топлива, при этом сохраняя эффективную мощность ТС. Снижение расхода топлива напрямую влияет на объемы выбросов диоксида углерода CO₂, а также позволит уменьшить существенный недостаток дизельных агрегатов – повышенные концентрации оксидов азота NO_x, а также повышенное содержание твердых частиц сажи, с налипающими на их поверхности бенз-α-пирен, с производные C₂₀H₁₂, при сгорании дизельного топлива в таких двигателях.

Ключевые слова: Моделирование процессов образования вредных веществ при горении топлив, горение дизельного топлива, зависимость количества выбросов от различных характеристик двигателя и качества дизельного топлива.

REDUCING EMISSIONS OF NITROGEN DIOXIDE AND CARBON BLACK FROM THE USE PREINJECTION IN ENGINES OF TRANSPORT CARS

Deundiak Dmitriy Vladimirovich

Rostov State Transport University,
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia,
344038,
E-mail: dmi.deundiak@yandex.ru

Tighter emission standards on motor vehicles (TM), particularly with regard to soot particulate emissions and a mixture of NO_x impact on both the person in the environment of his life and the risks of occupational disease puts more new challenges for engine manufacturers to create new constructs and modernization of the existing types. Due to global warming need to reduce fuel consumption, while maintaining the power efficiency of the TM.

Fuel savings directly affect the volume of carbon dioxide CO₂, and will reduce the significant disadvantage of diesel units - elevated concentration of NO_x nitrogen oxides, as well as increased solids content of soot particles from adhering to the surface of benzo-α-pyrene, with derivatives C₂₀H₁₂, the combustion of diesel fuel in such engines.

Keyword: simulation process pollutant formation during combustion of fuel, burning of the diesel fuel, the relationship of emissions from various engine characteristics and quality of diesel fuel.

УДК 628.517.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УРОВНЕЙ УСКОРЕНИЙ НА КОЖУХАХ ТЯГОВЫХ ПЕРЕДАЧ И БУКСАХ ЭЛЕКТРОВЗОВ

Сарьев Сергей Джамамуратович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»;
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения,
2,
аспирант

Телефон 8 (863) 27-26-270
E-mail: bva_rek@rgups.ru

Голубничая Дарья Сергеевна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»;
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2,
магистрант
Телефон 8 (863) 27-26-270
E-mail: bva_rek@rgups.ru

Проведение измерений вертикальных и горизонтальных поперечных ускорений кожухов зубчатых передач и букс пары колесной с электродвигателем.

Ключевые слова: букса, зубчатая передача, кожух, электродвигатель

EXPERIMENTAL STUDY OF THE LEVEL OF ACCELERATION ON THE CASING TRACTION TRANSMISSION AND BUCS ELECTRIC LOCOMOTIVES

Sariyev Sergey Dzhumamuratovich

Rostov State Transport University
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq, Rostov-on-Don, Russia 344038;
Chair "Fundamentals of Machine Design", graduate student
E-mail: bva_rek@rgups.ru

Golubnichaya Darya Sergeevna

Rostov State Transport University
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia
Chair "Fundamentals of Machine Design", student
E-mail: bva_rek@rgups.ru

Measurements of vertical and horizontal lateral acceleration co-zhuhov gears and wheel pair axle box with an electric motor.

Keywords: bush, zubachataya transmission housing, the electric motor

УДК 621.9-113.1

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ СИСТЕМ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ УПРОЧНЕНИЯ КОЛЕСНЫХ ПАР И ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ СВЕРЛИЛЬНОЙ ГРУППЫ

Стуженко Наталья Игоревна;

Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ;
346500, г. Шахты, Ростовская обл., ул. Шевченко, 147;
старший преподаватель;
E-mail: n.stuzhenko@mail.ru

Ермолов Михаил Валерьевич;

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»;
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения,
д. 2;

старший преподаватель;

E-mail: emv_ahc@rgups.ru

Статья посвящена обоснованию защитных конструкций для обеспечения безопасных условий труда операторов станков. Единый подход обеспечения безопасности при работе на деревообрабатывающих станках сверлильной группы и обработке поверхностей шарико-стержневым упрочнением позволяет применять однотипные защитные конструкции. Такие конструкции позволяют снизить не только уровни шума, но и концентрации пыли на рабочих местах операторов станков.

Ключевые слова: уровни шума, концентрация пыли, шарико-стержневое упрочнение, деревообрабатывающие сверлильные станки, защитные конструкции.

RATIONALE FOR CONSTRUCTION SECURITY SYSTEMS WORKING CONDITIONS IN THE WORKING AREA OF STRENGTHENING WHEELSETS AND WOODWORKING MACHINES DRILLING GROUPS**Stuzhenko Natalia I.;**

Institute of Entrepreneurship and Service sector (branch) DSTU;

147, Shevchenko str., Shahty, Russia, 346500;

Senior Lecturer;

E-mail: n.stuzhenko@mail.ru

Ermolov Mikhail V.;

Rostov State Transport University;

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq, Rostov-on-Don, Russia
344038;

Senior Lecturer;

E-mail: emv_ahc@rgups.ru

The article is devoted to the justification of protective structures to ensure safe working conditions of machines operators. A unified approach to ensure safety when working on woodworking machines drilling and surface treatment group ball-rod hardening allows for the same type of protective structures. Such designs not only reduce the noise levels and the concentration of dust in the workplace machine operators.

Keywords: noise levels, dust concentration, ball-rod reinforcement, woodworking drills, protective structures.

УДК 621.9:628.517.2

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДАВЛЕНИЯ ШУМА НА СОРТИРОВОЧНЫХ КОМПЛЕКСАХ**Шестаков Михаил Михайлович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»;

344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения,
д. 2;
Аспирант, инженер

Корниенко Роман Андреевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»;
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения,
д. 2;
Аспирант, инженер

Сидельников Александр Сергеевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»;
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения,
д. 2;
Магистрант, лаборант

В результате проведенных испытаний было доказано, что возможно применение как ручного способа модифицирования боковой поверхности колеса вагона, так и способа с использованием пневмоцилиндров.

Ключевые слова: фрикционные автоколебания, уровень шума, трение, вибрация, сортировочные горки, физико-математическое моделирование.

IMPROVING THE TECHNOLOGY OF NOISE SUPPRESSION ON SORTING COMPLEXES

Shestakov Mikhail Mikhailovich

Rostov State Transport University;
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq, Rostov-on-Don, Russia
344038;
Postgraduate student, engineer

Kornienko Roman A.

Rostov State Transport University;
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq, Rostov-on-Don, Russia
344038;
Postgraduate student, engineer

Sidel'nikov Alexander Sergeevich

Rostov State Transport University;
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq, Rostov-on-Don, Russia
344038;
Graduate student, research assistant

The results of the tests proved that the use of manual method of modifying the side surfaces of the wheels of the car, and the way using pneumatic cylinders.

Keywords: frictional self-oscillations, noise, friction, vibration, sorting slides, physics and mathematical modeling.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 4
МЕХАНИКА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Верескун В.Д., Притыкин Д.Е. Математическое моделирование тормозных процессов в грузовом поезде	3
Айзикович С.М., Васильев А.С., Садырин Е.В. Влияние толщины слоёв двухслойного покрытия на функцию жёсткости индентирования	11
Бабешко О.М. О методе блочного элемента в теории скрытых дефектов при горизонтальных гармонических воздействиях	17
Белянкова Т.И., Калинин В.В. Моделирование неоднородных покрытий из функционально градиентных материалов	21
Ватульян А.О., Нестеров С.А. Идентификация термомеханических характеристик слоистых и функционально-градиентных материалов	29
Евдокимова О.В. К проблеме конструирования материалов с продольно-поперечной полосовой арматурой	35
Журавлев Г.А. Несоответствия классических решений контактных задач геометрическим формам канонических и реальных тел	40
Зеленцов В.Б., Митрин Б.И., Лубягин И.А. Влияние разогрева от трения на износостойкость материалов покрытий	48
Кудина Е.Ф., Винидиктова Н.С., Гольдаде В.А., Ермолович О.А. Разработка покрытий на основе функционализированных эпоксидных смол	54
Леви М.О., Леви Г.Ю., Татарков Д.А. О контактных взаимодействиях в электромагнитоупругих гетероструктурах	59
Манжиров А.В., Казаков К.Е. Множественный контакт тел с покрытиями с учетом износа	64
Неверов А.В. Вибрационное самораскручивание резьбовых соединений	68
Усов П.П. Численный анализ влияния вязкоупругости поверхностных слоев контактирующих тел на характеристики смазочного слоя	75
Устинов Ю.А. К теории канатов. Задача растяжения-кручения	81
Чебаков М.И., Данильченко С.А., Ляпин А.А. Математическое моделирование износа неоднородных оснований	85
Суслов А.Г., Шалыгин М.Г. изнашивание нанонеровностей поверхностей трения	89
Шейдаков Д.Н., Михайлова И.Б. Устойчивость упругих плит с поверхностными напряжениями	96
Ватульян А.О., Недин Р.Д. Об идентификации неоднородного предварительного состояния в упругих и электроупругих телах	101

СЕКЦИЯ 5
НОВЫЕ ИЗНОСОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ
И УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Антонова Н.М., Бабичев А.П. О возможности использования пористых композиционных матриц на основе НА-КМЦ с металлическими порошками для формирования покрытий с регулируемыми антифрикционными свойствами	107
---	-----

Бардушкин В.В., Сорокин А.И., Сычев А.П. Объемная плотность энергии деформации в полимерных композитах с наполненными смазкой сферическими микрокапсулами и дисперсными включениями бесщелочного стекла.....	113
Белоцерковский М.А., Жорник В.И., Ялович А.П. Повышение работоспособности пар трения сочетанием технологий гиперзвуковой металлизации и трибомодифицирования.....	118
Буря А.И., В. Томина М.В., Колесников В.И., Мясникова Н.А, Доброва Л.В. Влияние волокна оксалон на эксплуатационные характеристики органопластиков...	123
Дерлугян П.Д., Данюшина Г.А., Шишка В.Г., Бережной Ю.М., Шишка Н.В. Композиционный антифрикционный полимерный материал.....	133
Елисеев А.А., Филиппов А.В. , Рубцов В.Е. , Чумаевский А.В., Колубаев А.В., Колубаев Е.А. Прочностные характеристики сплава АМГ5 после интенсивного термомеханического фрикционного воздействия трением с перемешиванием.....	137
Смирнова А.С, Почивалов Ю.И., Панин В.Е Ультразвуковая ударная обработка как способ повышения усталостной долговечности сварных соединений конструкционных материалов.....	140
Шульга Г.И., Шульга Т.Г. Топокомпозиты для многопереходной вытяжки кузовных деталей транспортных средств.....	146
Яковлев В.Б. Характеристики неоднородных сред: подходы к моделированию и методы вычисления.....	151
Коробейников В.В. Анализ существующих способов механической обработки наплавленного металла детали.....	155
Колесников В.И., Иваночкин П.Г., Воропаев А.И. Исследование узлов трения, работающих в трибосистемах в условиях механического демпфирования.....	160

СЕКЦИЯ 6 ПРОБЛЕМЫ ТРЕНИЯ, ИЗНОСА, СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И СМАЗКИ

Буйло С.И., Иваночкин П.Г., Мясникова Н.А. Идентификация стадий фрикционного взаимодействия материалов по данным акустико-эмиссионных испытаний..	166
Буракова М.А., Даровской Г.В., Поляков В.Н. Гидродинамическая устойчивость модели пары трения «вал–колодка».....	171
Кожушко В. В., Сергиенко В. П., Сычев А. П. Ультразвуковая диагностика сплошности соединения металлической основы с высоконаполненными композициями фрикционного назначения.....	177
Кохановский В.А. Иванов С.И., Петренко А.А., Больших И.В. Металлический компонент металлополимерных трибосистем.....	182
Озябкин А.Л., Никитина М.И., Коваленко Л.И. Исследование вписывание подвижного состава в криволинейный участок пути.....	186
Памфилов Е.А., Пилюшина Г.А. Методологические основы испытаний на изнашивание в условиях динамического нагружения.....	190
Памфилов Е.А., Прозоров Я.С., Кузнецов С.В., Лукашов С.В. Методы и средства испытаний коррозионно-механического изнашивания в условиях трения скольжения.....	197
Дерлугян П.Д., Могильницкий В.М., Чебанов Р.А. Уникальный испытательный комплекс для трибоисследований.....	206

Седакова Е. Б., Козырев Ю. П. Влияния фрикционного нагрева и наполнения на изменение физического состояния и износостойкость политетрафторэтилена и полиэфирэфиркетона.....	212
Тополянский П.А., Ермаков С.А., Тополянский А.П. Испытания трибологических покрытий на микроабразивное изнашивание.....	217
Тюрин А.И., Пирожкова Т.С. Масштабный фактор в прочностных и трибологических свойствах твердых тел в микро- и наношкале.....	223
Мигаль Ю.Ф., Колесников В.И. Совместимость химических элементов на границах зерен в стали и ее влияние на прочностные свойства стали.....	229

**СЕКЦИЯ 7
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
ТРАНСПОРТНЫХ ТРИБОСИСТЕМ**

Борисова А.В. Совершенствование системы экологического мониторинга транспортной отрасли.....	236
Деундяк Д. В. Снижение выбросов диоксида азота и сажи при использовании превпрыска в двигателях транспортных машин.....	242
Сарыев С.Д., Голубничая Д.С. Экспериментальные исследования уровней ускорений на кожухах тяговых передач и буксах электровозов.....	246
Стуженко Н.И., Ермолов М.В. Обоснование конструкций систем безопасных условий труда в рабочей зоне упрочнения колесных пар и деревообрабатывающих станков сверлильной группы.....	251
Шестаков М.М., Корниенко Р.А., Сидельников А.С. Совершенствование технологии подавления шума на сортировочных комплексах.....	254
Аннотации	260

Сборник докладов
Том 2
Международная научная конференция
«Механика и трибология транспортных систем»
(МехТрибоТранс–2016)

Тексты докладов приводятся в авторской редакции

Компьютерная верстка А.С. Степанищева
Подписано в печать с оригинал-макета
Формат 60х/84/8 Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 19,88 Тираж 500 Изд. № 50175 Заказ № 196

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»
Адрес: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного
Ополчения, д.2

Отпечатано в издательстве ООО «АЛЬЯНСКОНЦЕПТ»
Адрес: 344013, г. Ростов-на-Дону, ул. Мечникова, д. 112
e-mail: divprint@mail.ru, тел. +7(918) 543-75-63