

Министерство образования Российской Федерации
Тверской государственный технический университет

МЕХАНИКА И ФИЗИКА ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА

Межвузовский сборник научных трудов

Выпуск 9

Тверь 2002

УДК 621.891

Сборник содержит результаты научных исследований механики и физики контактного взаимодействия, трения и изнашивания материалов и конструкций, фрикционных и антифрикционных материалов, смазок, новейших технологических методов повышения износостойкости оборудования. Рассмотрены фундаментальные и прикладные аспекты фрикционного взаимодействия, указываются пути повышения износостойкости, прочности, экономичности узлов трения.

Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, докторантов, аспирантов, студентов машиностроительных специальностей.

Сборник подготовлен на кафедре физики Тверского государственного технического университета.

Редакционная коллегия:

Доктор техн. наук, профессор Н.Б. Демкин (ответственный редактор), доктор техн. наук, профессор И.И. Беркович, доктор техн. наук, профессор Н.А. Буше, доктор техн. наук, профессор А.Н.Болотов, доктор техн. наук, профессор В.Г. Зубчанинов, доктор техн. наук, профессор В.В. Измайлов (зам. ответственного редактора), С.В. Новосёлов (ответственный секретарь).

Рецензенты:

Заведующий кафедрой общей физики ТГУ, доктор химических наук, профессор Ю.Д.Орлов;

Доцент кафедры медбиофизики и информатики ТГМА, кандидат физико – математических наук В.В.Туровцев.

© Тверской государственный
технический университет, 2002

ПРЕДИСЛОВИЕ

Повышение качества, надежности, эффективности, эргономичности и экологичности современного технологического оборудования и бытовой техники невозможно без грамотного триботехнического подхода к производству, изготовлению и эксплуатации машин и приборов.

Сложная природа фрикционных процессов требует для своего изучения интеграции усилий ученых многих специальностей: физиков, химиков, материаловедов, механиков, математиков и др. Поэтому сборник включает широкий спектр статей фундаментального и прикладного плана, содержащих как теоретические результаты, так и конкретные технические разработки в области машиностроения, приборостроения, торфяной промышленности. В ряде статей исследованы процессы контактирования с позиций механики деформированного тела, большое внимание уделено материаловедческому аспекту трения и изнашивания. Исследованы свойства современных антифрикционных покрытий, присадок к смазочным материалам, описаны некоторые другие новейшие технологические методы повышения износостойкости оборудования. Рассмотрены методики фрикционных испытаний и моделирование трения, изнашивания и других процессов в зоне контакта деталей машин и приборов в различных условиях эксплуатации. Приведен подробный анализ деформирования упрочняющихся и неупрочняющихся сред. В сборнике представлены статьи ведущих ученых и специалистов в области механики и физики контактного взаимодействия, трения и изнашивания. Содержащиеся в сборнике материалы предназначены для научных работников, конструкторов и технологов, занятых в проектировании, изготовлении и эксплуатации современного машиностроительного, энергетического, транспортного оборудования, а также докторантов, аспирантов и студентов-старшекурсников машиностроительных и приборостроительных специальностей.

ВЛИЯНИЕ ПРИРАБОТКИ
НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОНТАКТА

В процессе приработки деталей машин меняется высота микровыступов и их форма. Причем, если образуется более гладкая поверхность, то шаг неровностей почти не изменяется, а меняется в основном, высота выступов. В результате возникает шероховатость, образованная выступами, имеющими различные радиусы кривизны вершин.

В работе [1] было выполнено специальное исследование влияния характера распределения радиусов кривизны выступов на результаты расчетов. Рассматривался упругий и упругопластический контакт. Расчет фактического давления q_r выполнялся при постоянном значении радиуса и в случае равномерного, нормального и бета-распределения радиусов. Значения радиусов менялись в пределах от 10 до 390 мкм. Как показали расчеты, при симметричном законе распределения, влияние распределения радиусов по величине на значение q_r весьма мало. При асимметричном законе распределения q_r несколько уменьшается по сравнению со значением, полученным расчетом, выполненным при постоянном радиусе, равном среднему арифметическому.

Однако в рассматриваемом случае, при приработке, ситуация изменяется, поскольку радиус кривизны зависит от высоты выступа: радиус растет по мере уменьшения высоты выступа, т. е. $r_1 > r_2 > r_3 > r_4 > r_5$ (рис. 1).

Для того чтобы учитывать влияние изменения радиуса на характеристики контакта, необходимо для каждого выступа определять радиус в зависимости от его высоты. При этом возникает затруднение: расчетная высота выступов зависит от сближения, которое, в свою очередь определяется величиной радиусов. Поэтому для расчетов была разработана ЭВМ – программа, учитывающая влияние возрастания радиуса при помощи метода итерационных приближений. Расчеты выполнялись на основе теории реального контакта [2,3] применительно к контакту двух шероховатых поверхностей [4].

На рис. 2 показано изменение среднего радиуса выступов при изменении относительного сближения: с ростом сближения радиус увеличивается все быстрее, в рассматриваемом случае он возрастает примерно в два с половиной раза, аналогичные результаты получены и для других поверхностей.

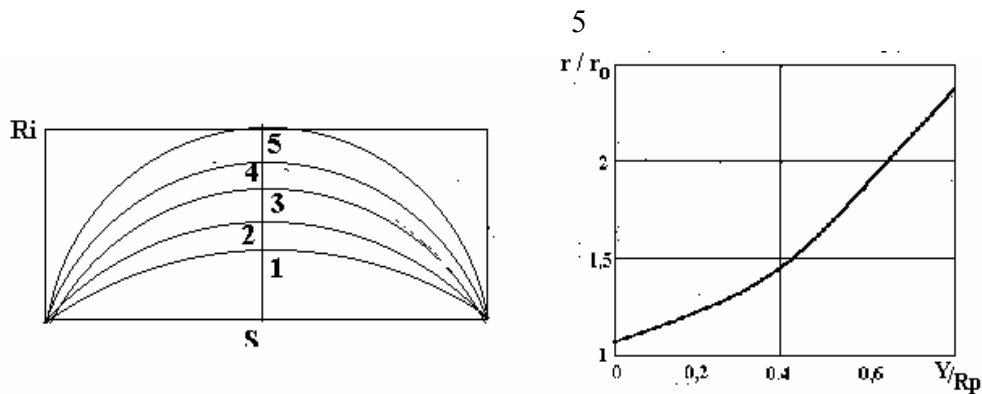


Рис.1 Зависимость радиуса кривизны выступов от их высоты

Рис.2. Влияние относительного сближения на увеличение среднего радиуса

Для оценки влияния переменных радиусов выступов на свойства контакта выполнены расчеты для двух пар поверхностей из незакаленной и закаленной стали (табл.).

В таблице r – средний арифметический радиус кривизны вершин выступов, S – шаг неровностей. Расчет для 1 – й и 3 – й пар выполнялся при постоянном значении радиусов, для 2 – й и 4 – й с учетом изменения радиусов выступов в процессе нагружения. Характеристики поверхностей выбраны таким образом, чтобы для 1– й и 2 – й пар имела место преимущественно упругопластическая деформация выступов, а для 3 – й и 4 – й пар – упругая.

Параметры, характеризующие свойства контактирующих поверхностей

Характеристики поверхности пар	Твердость, МПа	Модуль упругости, ГПа	R_p , мкм	r , мкм	S , мкм
1	2000	0,2	5	50	-
2	2000	0,2	5	-	90
3	6000	0,2	0,1	500	-
4	6000	0,2	0,1	-	630

Рассчитывали фактическое давление на контакте q_r , и величину деформации контакта (сближение) Y . При возрастающем радиусе фактическое давление существенно меньше, чем при постоянном, причем для контакта гладких твердых поверхностей это влияние проявляется сильнее (рис 3,4).

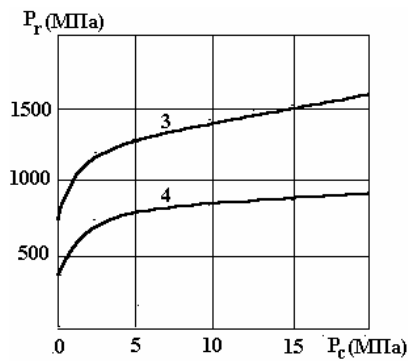


Рис.3. Влияние контурного давления на фактическое давление. Гладкие поверхности (3 – я и 4 – я пары)

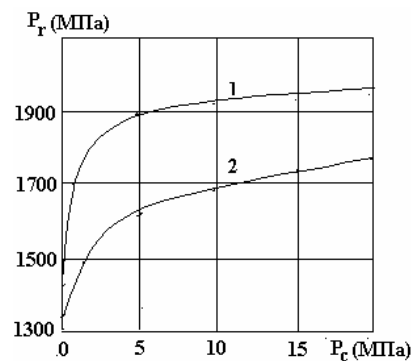


Рис.4. Влияние контурного давления на фактическое. Шероховатые поверхности (1 – я и 2 – я пары)

Для поверхностей имеющих более грубую шероховатость влияние возрастания радиуса на фактическое давление меньше. Это объясняется упругопластическим характером деформации выступов.

Деформация поверхностей, образующихся при приработке, мало зависит от эффекта возрастания радиуса, причем для переменного радиуса деформация несколько больше, чем для постоянного (рис. 5,6).

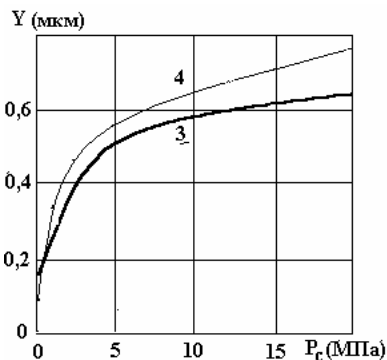


Рис.5. Зависимость сближения от контурного давления для гладких поверхностей (3 – я и 4 – я пары)

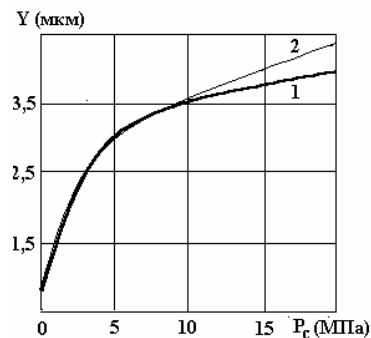


Рис.6. Зависимость сближения от контурного давления для шероховатых поверхностей (1 – я и 2 – я пары)

Это объясняется малым влиянием формы выступов на деформационные свойства контакта для грубых поверхностей, поскольку они деформируются преимущественно упругопластически.

Для гладких твердых поверхностей преобладает упругий контакт выступов [1,2], давление, в соответствии с формулами Герца, зависит от радиусов выступов и сближение растет с увеличением радиусов, поскольку при этом уменьшается число контактирующих выступов..

Проделанные расчеты на основе предложенной ЭВМ-модели позволяют сделать следующие выводы:

1. В процессе приработки меняется характер распределения радиусов выступов, поскольку по мере снижения высоты выступов их радиус

увеличивается и, следовательно, радиусы выступов меняются в зависимости от их высоты.

2. В процессе приработки средний радиус возрастает примерно в два раза.

3. Для контакта приработанных поверхностей фактическое давление существенно снижается, причем для гладких поверхностей снижение больше..

4. Изменение радиуса выступов влияет на сближение не слишком сильно, причем для гладких поверхностей сближение увеличивается, а для шероховатых поверхностей при малых давлениях сближение практически не зависит от изменения радиусов выступов.

Библиографический список

1. Демкин Н.Б. Влияние распределения выступов по радиусам на результаты расчетов характеристик контакта// Механика и физика контактного взаимодействия. Тверь:ТПИ. 1990. С 4-7.

2. Демкин Н.Б. Развитие теории фрикционного контакта // Трение и износ. – т.13. 1992. №1. С. 71-80.

3. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М. 1981.

4. Демкин Н.Б. Исследование контакта двух шероховатых поверхностей // Трение и износ. – т.11. 1990. №6. С. 1002-1006.

УДК 621.822

А.Н. Болотов, В.Л. Хренов
Тверской государственный технический университет

ШПИНДЕЛЬНЫЙ УЗЕЛ С МАГНИТНЫМИ ОПОРАМИ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ПАМЯТИ КОМПЬЮТЕРА

Как показывает практика, непереносимое условие развития вычислительной техники – увеличение объема памяти. Важным направлением решения этой проблемы является увеличение точности шпиндельных узлов дисководов, которая пропорционально увеличивает плотность магнитной записи.

Нами разработан шпиндельный узел накопителя магнитной записи на жестких дисках типа винчестер с магнитными подшипниками вместо традиционных опор качения. Принципиальная схема шпиндельного узла устройства представлена на рисунке. В корпусе 1 шпиндельного узла в комплексе соединены два симметричных радиальных магнито-гидродинамических и многозубцовый упорный магнитостатический подшипники.

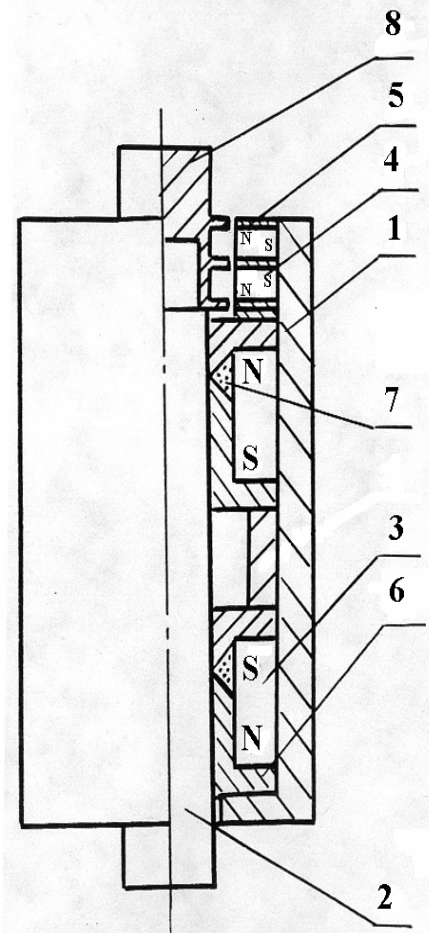
Радиальные подшипники оригинальной конструкции [1] состоят из кольцевого постоянного магнита 3 осевой намагниченности и двух втулок 6, образующих клиновидную канавку, заполненную магнитным маслом 7 и обращенную сужающейся частью к валу 2. Постоянный магнит образует магнитный контур, замыкающийся через втулки и масло в канавке. За счет геометрии торцев втулок создается неоднородное магнитное поле с градиентом, направленным к валу. Во время работы подшипника масло увлекается магнитным полем из канавки в зазор между валом и втулками и принудительно намазывается на вал. Масло создает давление, удерживающее вал в стабильном положении под нагрузкой.

Радиальные подшипники обладают достоинствами традиционных гидродинамических: высокой точностью вращения вала (выше, чем у опор качения), хорошим демпфированием колебаний, бесшумностью. Но в отличие от них удерживают слой масла в подшипнике в режимах пуска и останова и автономно обеспечивают термомагнитную циркуляцию масла при работе [2].

Упорный подшипник состоит из двух постоянных магнитов 4 с чередующейся осевой намагниченностью, полюсных наконечников 5. Схема шпиндельного узла и насадки 8 с зубцами, напрессованной на вал. Магнитный поток, замыкаясь через полюсные наконечники и насадку, бесконтактно удерживает вал в осевом направлении с требуемой грузоподъемностью и жесткостью [2]. Расположение упорного подшипника на выходе вала из корпуса выгодно тем, что подшипник может дополнительно выполнять роль магнитожидкостного уплотнения.

Исследовался шпиндельный узел с размерами базового на шарикоподшипниках, используемого в накопителе информации персонального компьютера. Диаметр и длина корпуса 26 и 45 мм соответственно, диаметр вала 8 мм. В конструкции применены ферритбариевые магниты марки 22РА220. Для смазывания радиальных подшипников использовались диэфирные магнитные масла с вязкостью от 0,5 до 0,08 Па·с. Шпиндель приводился во вращение вентильным электродвигателем с частотой вращения до 5000 об/мин.

В процессе проведения испытаний определялось также время разгона вала до максимальной частоты вращения с места. Оно составило 16 с, что несколько хуже, чем на шарикоподшипниках. Это объясняется в значительной мере повышенным пусковым моментом, возникающим за счет структурирования магнитного масла во время стоянки. После оптимизации состава магнитного масла удалось довести время разгона до 10...12 с, что



превосходит показатели шпиндельного узла с шарикоподшипниками класса точности 2.

Дополнительно измерялись биения вала. Общие биения составили 8 мкм, а неповторяющиеся 0,25 мкм. Контроль размеров вала и подшипников скольжения показали, что отдельные их параметры не соответствуют требованиям, заложенным в технической документации на изготовление. Так, диаметральный зазор в радиальном подшипнике составил 20 мкм вместо 8...16 по чертежу, прямолинейность оси вала достигала 20 мкм, а некруглость составила 3,5 мкм. Эти неточности изготовления и привели к столь высоким суммарным биениям. Однако, при этом неповторяющиеся биения значительно ниже, чем для узла на шарикоподшипниках (для высокоточных шарикоподшипников класса точности 2 это 2 мкм).

Упорные магнитостатические подшипники обеспечивали стабильное положение вала при осевой нагрузке до 12 Н.

Полученные результаты подтверждают существенное, почти на порядок, повышение стабильности положения вала, что позволит пропорционально увеличить плотность магнитной записи на жестком диске. Исследования также показывают перспективность использования шпиндельных узлов с магнитными опорами для прецизионных устройств.

Библиографический список

1. А.с. 1712697 СССР, МКИ F 16 C 39/06. Магнитогидродинамический подшипниковый узел / А.Н. Болотов, В.Л. Хренов, Н.Б. Демкин // Бюлл. изобр.- 1992.- № 6.

2. Болотов А.Н., Михалев Ю.О., Хренов В.Л. Подвесы с использованием магнитной жидкости // Трение и износ.- Т. 11, 1990. - № 1. - С. 116-123.

УДК 621.891

А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, В.А. Кожемякина
Российская академия наук, Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова (ИМАШ)

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ В ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧАХ ПРИ ГРАНИЧНОЙ СМАЗКЕ С УЧЕТОМ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ И КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В зубчатых передачах максимальная температура контактной поверхности зуба $\vartheta_{\max}$ определяет возникновение нежелательных кромочных эффектов (В.В. Корнилов, И.А. Конф), деструкцию пленки смазочного материала (Р.М. Матвеевский, И.А. Буяновский), заедание, повышенные потери

энергии в зацеплении и преждевременный выход из строя передачи из-за чрезмерного износа.

Традиционный подход, когда температура в зацеплении упрощенно оценивается как сумма объемной температуры зуба ϑ_v и температурной вспышки $\vartheta_{всп}$ на перемещающейся контурной полоске контакта, имеет три существенных недостатка. Первый недостаток – не учитывается реальный микрорельеф поверхности трения зуба, влияющий на возникновение температурных вспышек $\vartheta_{всп}$ на фактических пятнах касания. Второй недостаток – не учитывается реальная температура номинальной поверхности трения зуба ϑ_a^* , которая может заметно отличаться от объемной ϑ_v . Третий недостаток – не учитывается экранирующее действие тонких граничных пленок масла на номинальном, контурном и фактическом контактах.

Целью настоящей работы является сопоставление результатов традиционного расчета и расчетов, где устранены названные недостатки с учетом достижений трибологии.

Процессы трения на номинальном, контурном и фактическом контактах являются кратковременными, и это требует учета приведенных теплофизических параметров системы: тонкая масляная пленка + металл в зависимости от эффективной глубины проникновения тепла $b_{эф}$ за время контактирования t_T . При этом приходится учитывать реальные значения коэффициента температуропроводности a . Технологическая термическая обработка поверхностных слоев зуба приводит к существенному (почти на 30 - 40%) снижению теплофизических характеристик этих слоев по сравнению с объемными свойствами металла, сведения о которых приведены в справочной литературе.

$$b_{эф} = \sqrt{3at_T} \quad (1)$$

Если на контакте имеет место пленка смазочного материала, то в расчетах используются приведенные теплофизические характеристики системы: смазочная пленка + металл. Они учитывают дополнительно толщину и температуропроводность пленки смазочного материала.

В первом приближении температурная вспышка

$$\vartheta_{всп} \sim C^* \frac{f_T}{\lambda} \quad (2)$$

где λ -- коэффициент теплопроводности, f_T – коэффициент трения, а C^* объединяет параметры геометрии контакта (рис. 1), скорость и нагрузку.

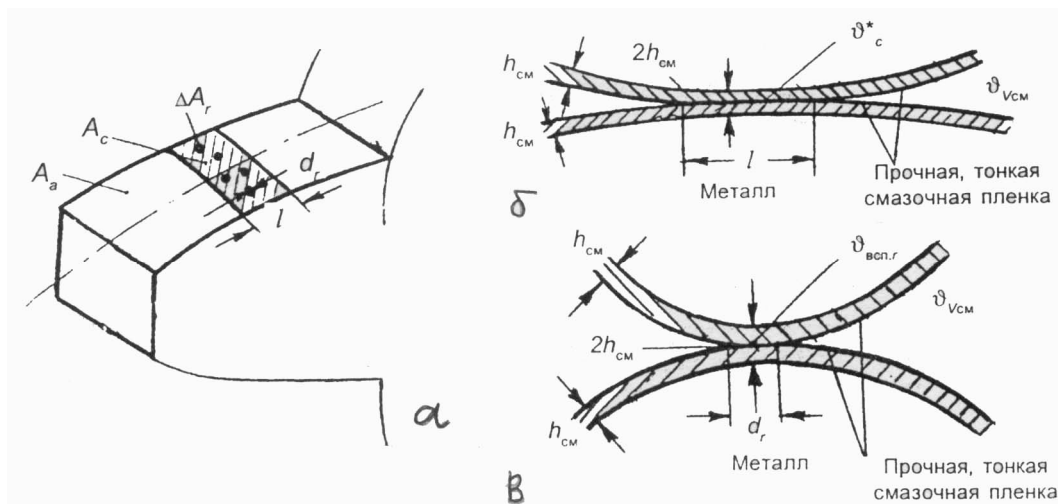


Рис. 1. Подмодели процесса контактирования зуба:

а) без смазочного материала на контакте;

б) с граничной тонкой смазочной пленкой h_{cm} на зубе шестерни и колеса при движущейся полоске трения шириной l ;

в) фактического контакта единичной неровности, расположенной на контурной площади движущейся полоски трения.

Условные обозначения:

A_a - номинальная площадь; A_c - контурная площадь перемещающейся полоски контакта; ΔA_r - площадь единичного фактического пятна контакта; d_r - диаметр среднестатистического фактического пятна контакта; h_{cm} - тонкая, прочная граничная пленка на зубе шестерни и колеса; $2h_{cm}$ - толщина тонкой смазочной пленки в зоне контурного контакта; ϑ_c^* - температурная вспышка на контурной полоске контакта; ϑ_{vcm} - объемная температура смазки; d_r - диаметр среднестатистического пятна касания; $\vartheta_{всп.г}$ - температурная вспышка на фактическом пятне касания

На этом рисунке учтено развитие представлений об особенностях контакта в зубчатом зацеплении с позиций трибологии.

Для расчета максимальной температуры на поверхности трения зуба, определяющей возможность разложения масла, используется гипотеза суммирования температур:

$$\vartheta_{\max} = \vartheta_{vcm} + \vartheta_a^* + \vartheta_{всп} \quad (3)$$

В зависимости (3) имеет место существенный вклад температурной вспышки.

С помощью развитой и обоснованной А.В.Чичинадзе теории рассмотрены три подхода при оценке $\vartheta_{\max}$ с учетом возникающих температурных вспышек $\vartheta_{всп}$ на номинальном, контурном и фактическом контактах применительно к зубчатому зацеплению.

Первый (традиционный) подход является некорректным. Он не учитывает реальную физику контактного взаимодействия, так как при оценке $\vartheta_{всп}$ по формуле (2) для граничной смазки берется низкий коэффициент трения $f_{Tcm} = 0,025 - 0,1$ а коэффициенты теплопроводности и температуропроводности выбираются неоправданно большими, как для чисто металлического контакта ($\lambda_{мет} = 30 - 60$ Вт/м $\cdot$ °С и $a_{мет} = (12 - 16) \cdot 10^{-6}$ м 2 /с). В результате такого расчета

получают заниженные значения $\vartheta_{всп}$ и, следовательно, ϑ_{max} , которые неправильно ориентируют конструкторов и эксплуатационников (рис. 2 а).

Второй, усовершенствованный, подход (по Х.Блоку) позволяет оценить ϑ_{max} с учетом только температурной вспышки ϑ_c^* на контурной площади движущейся полоски контакта шириной l без учета реальной микрогеометрии контактирования шероховатых поверхностей трения зубьев.

В этом случае не учитывается экранирующее действие переменной по толщине смазочной пленки ($2 h_{см} = \text{variable}$), а также возможность возникновения своеобразных микродинамических и квазигидродинамических эффектов при различных нагрузках P_H и окружных скоростях $v_{окр}$. Интересно, что благодаря учету экранирующего действия смазочной пленки приведенный коэффициент теплопроводности системы: тонкая смазочная пленка + материал зуба $\lambda_{np.l}$ уменьшается почти в 2 раза (точнее, на 44%) по сравнению с коэффициентом теплопроводности чистого исходного металла $\lambda_{мет}$. Это приводит к возрастанию температурной вспышки ϑ_c^* на полоске контакта на $\sim 20\%$ (рис. 2 б).

Если предположить, что толщина граничной смазочной пленки является постоянной величиной ($2h_{см} = \text{const}$), то при росте нагрузки P_H почти в 2 раза (от $P_H = 5,5 \cdot 10^4$ Н до $P_H = 10,31 \cdot 10^4$ Н) коэффициент теплопроводности $\lambda_{np.l}$ увеличивается на 39,5%, а температурная вспышка ϑ_c^* возрастает на 100% (условия примера 2).

Третий, наиболее точный, подход (по А.В.Чичинадзе) позволяет оценить ϑ_{max} с учетом реальной температурной вспышки $\vartheta_{всп.r}$ на фактическом пятне касания шероховатых поверхностей трения зубьев.

При таком подходе значение приведенного коэффициента теплопроводности $\lambda_{np.r}$ составляет всего 45,5% по сравнению со значением коэффициента теплопроводности $\lambda_{np.l}$ при втором подходе, что заметно ухудшает теплоотвод с фактического пятна касания. Соответственно значения температурной вспышки $\vartheta_{всп.r}$ возрастают с 10,5 до 35% по сравнению с ϑ_c^* по второму подходу.

В результате этого в гипотезе суммирования по формуле (3) при оценке максимальной температуры ϑ_{max} значительный вклад (от 50 до 58%) в зависимости от режима эксплуатации вносит температурная вспышка $\vartheta_{всп.r}$.

Таким образом получены наиболее высокие (почти 2—кратные) значения максимальной температуры на поверхности трения зуба ϑ_{max} по сравнению со вторым подходом.

Предлагаемый третий подход оценки $\vartheta_{всп.r}$ и ϑ_{max} позволяет более точно оценивать не только влияние экранирующего действия граничной смазки на $\vartheta_{всп.r}$ и далее на ϑ_{max} , но и, например, опасность перегрева фрикционного

контакта из-за уменьшения коэффициентов теплопроводности $\lambda_{мет}$ и температуропроводности $a_{мет}$ в результате насыщения тонких поверхностных слоев металла углеродом при цементации. В этом случае расчет показывает, что температурная вспышка $\vartheta_{всп.г}$ и максимальная температура ϑ_{max} возрастают дополнительно по сравнению с результатами расчета для нецементированной стали.

Каждый из подходов был сопоставлен с двумя остальными на основе анализа результатов расчета тяжело нагруженной зубчатой передачи для моторвагонной секции электропоезда ЭР – 22. Редуктор этой передачи предусматривает работу в условиях эластогидродинамической смазки.

Рассмотрены два примера. Первый полагает постоянное значение нормальной погонной нагрузки на зуб $P_{пог} = 55 \cdot 10^4$ Н/м, но переменными окружные скорости шестерни v . Известно, что толщина пленки $h_{см}$ увеличивается с ростом скорости скольжения, что сопровождается снижением коэффициента трения f_T .

Второй пример полагает постоянную скорость шестерни $v = 10$ м/с, а также толщину смазочной пленки $h_{см} = 0,2 \cdot 10^{-6}$ и коэффициент трения $f_{T см} = 0,05$. В то же время переменны нормальная нагрузка P_H и ширина движущейся линейной полоски контурного контакта.

Результаты расчетов для примера 2 в настоящей работе не приведены, однако они подтверждают выводы по примеру один.

В расчетах приняты следующие материалы: сталь 20Х2М3А (цементированная), смазочный материал МС – 20. Их теплофизические и механические свойства корректируются с учетом эффективной глубины проникновения тепла $b_{эф}$, что особенно важно при очень малых значениях времени контактирования зуба $t_{т.к.}$. Например, для системы смазочная пленка + металл $b_{эф}$ соизмерима с толщиной смазочной пленки.

На рис. 2 а, б, в приведены расчетные зависимости для примера 1 и трех названных выше подходов.

Таким образом, для объективного расчета максимальной температуры на поверхности трения зубчатых передач, работающих в режиме граничной и особенно эластогидродинамической смазки, необходимо обязательно учитывать экранирующее действие тонких смазочных пленок.

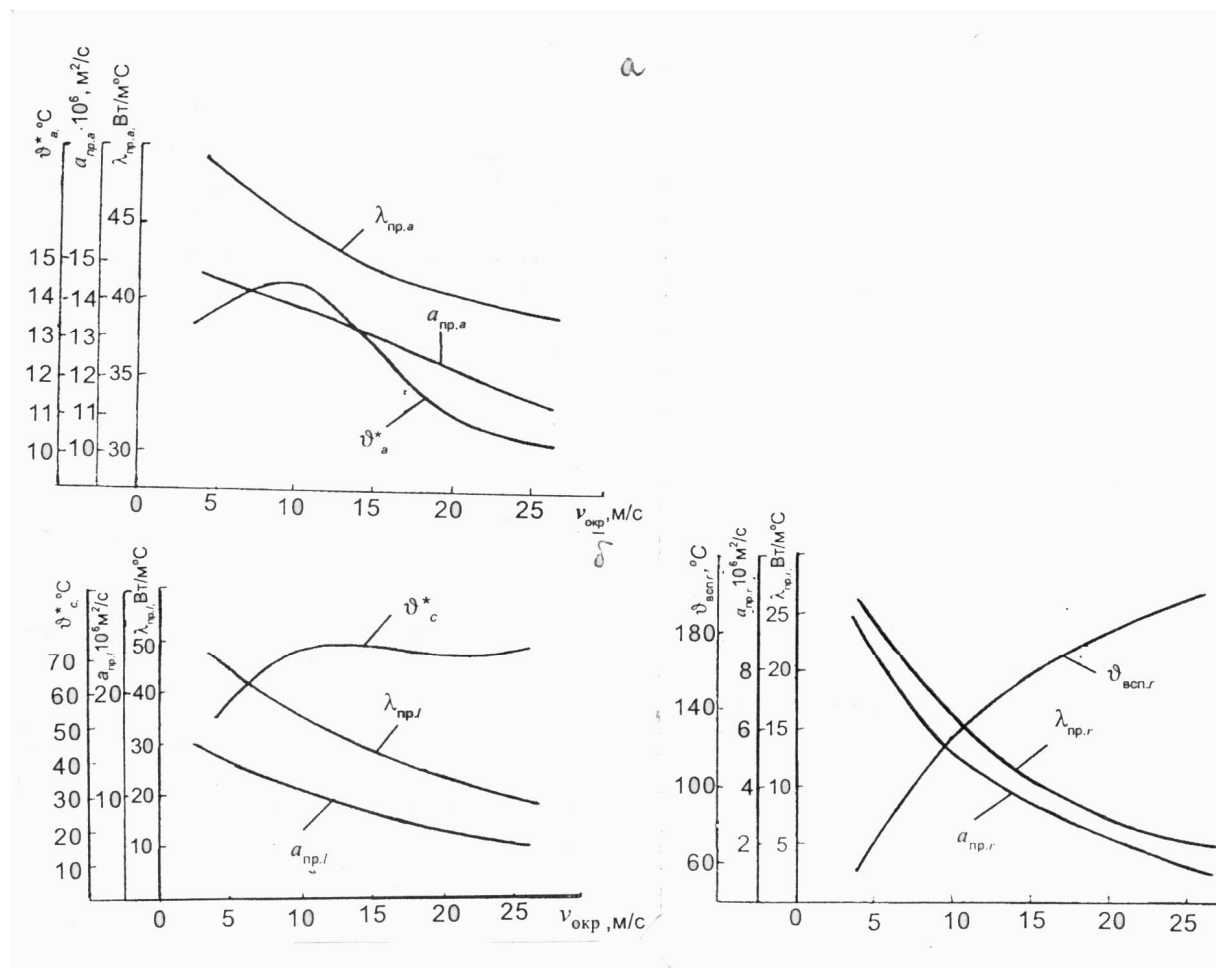


Рис. 2. Расчетные зависимости приведенных параметров λ , a и температурной вспышки на поверхности трения зуба для подмоделей а, б, и в (условия примера 1)

В дальнейшем предполагается развитие и уточнение методики расчета применительно к каждой конкретной задаче на стадии проектирования и конструирования различных зубчатых передач, работающих со смазкой.

УДК 621.891

И.И.Беркович, Ю.И.Морозова
Тверской государственный технический университет

Методика определения фактической площади контакта дисперсных материалов по результатам компрессионных испытаний

Существующие методы экспериментального измерения фактической площади контакта (ФПК) дисперсных материалов [1-3] достаточно сложны в реализации, трудоемки и требуют специфического аппаратного обеспечения. К настоящему времени разработаны методы расчета ФПК дисперсных материалов с учетом влияния характера контактной деформации, физико-механических свойств материалов частиц, фракционного состава и параметров режима нагружения [4, 5]. Однако расчетные методы применимы для

дисперсных материалов, частицы которых имеют округлую форму, близкую к шарообразной, и обладают гладкой поверхностью. Кроме того, требуется значение таких физико-механических характеристик материалов частиц, как предел текучести, модуль упругости, параметров закона распределения частиц по размеру, что требует специальных достаточно сложных экспериментальных исследований.

Для решения прикладных задач, связанных с разработкой технологических процессов производства изделий из порошков методами компактирования: в области порошковой металлургии, при получении топливных и кормовых брикетов, таблетировании и гранулировании пластмасс, пищевых и фармацевтических материалов, требуется создание более простых и доступных инженерных методов оценки ФПК.

Упрощающим обстоятельством для оценки ФПК, в условиях компактирования, является то, что процессы протекают при давлении прессования, превышающем на несколько порядков величину давления, при котором происходит переход от упругопластического деформирования к пластическому при взаимном влиянии частиц [1]. Следует отметить, что пластическая деформация по мере роста давления от пятен контакта распространяется вглубь частиц. Когда зоны пластической деформации перекрываются, она становится стесненной, и давление текучести возрастает по мере роста давления прессования. Подобным образом происходит и деформирование частиц в объеме прессовки. Однако поскольку координационное число частиц в зоне контакта прессовки с поверхностью инструмента ниже, чем в объеме, то частицы внутри прессовки переходят в состояние стесненной пластической деформации при больших значениях давления прессования, чем это имеет место у частиц на границе прессовки. Изложенное иллюстрируется графиками (рис. 1,2) зависимости относительной ФПК ($\eta = \frac{A_r}{A_a}$) и относительной плотности прессовки ($\alpha = \frac{\gamma}{\rho}$), а также фактического давления на контакте ($\sigma_r = \frac{P}{\eta}$) и эффективного напряжения ($\sigma_s = \frac{P}{\alpha}$) от давления прессования (P).

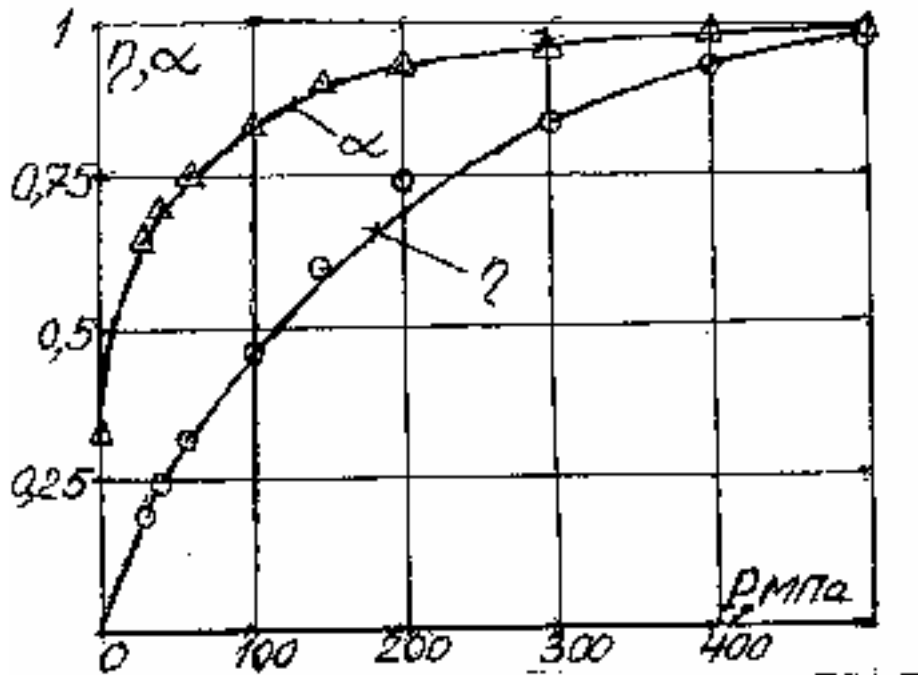


Рис.1. Зависимость относительной ФПК и относительной плотности от давления

Здесь A_r – ФПК, A_a – номинальная площадь контакта, γ – плотность пористой прессовки, ρ – плотность материала частиц порошка. Эксперименты проводились на порошке алюминия марки АП1 со средним диаметром частиц 0,22 мм. ФПК определялась методом формования контакта порошка с твердой обработанной по 12-му классу шероховатости твердосплавной пластиной. Измерение ФПК осуществлялось на телевизионном планиметре [1]. Компрессионные испытания осуществлялись односторонним прессованием данного порошка в цилиндрической матрице.

Из рис. 1 следует, что зависимости относительных величин ФПК и плотности с увеличением давления прессования стремятся к насыщению при одном и том же давлении. При стремлении давления к нулю относительная ФПК также стремится к нулю, а относительная плотность к своему начальному значению

$$\alpha_0 = \gamma_0 / \rho,$$

где γ_0 – плотность пористого тела в состоянии засыпки.

Рис. 2 свидетельствует о том, что в масштабе действующих давлений прессования, который соответствует диапазону давлений, используемых в порошковой металлургии, зависимость фактического давления на контакте от давления прессования может быть описана линейной функцией

$$\sigma_r = \sigma_{or} + k_r P \quad (1)$$

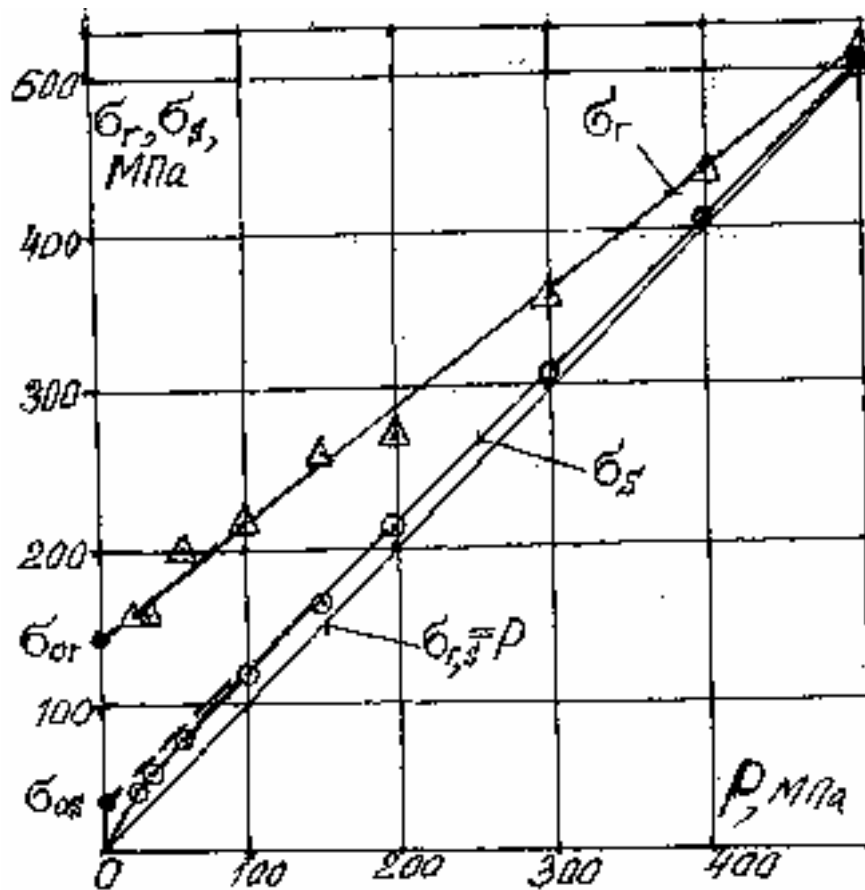


Рис. 2. Зависимость фактического давления на контакте и эффективного напряжения от давления.

В свою очередь зависимость относительной ФПК от давления выражается в виде дробно-линейной функции

$$\eta = \frac{P}{\sigma_r} = \frac{P}{(\sigma_{or} + k_r P)} \quad (2)$$

где σ_{or} и k_r — коэффициенты, характеризующие соответственно исходную твердость частиц порошка и интенсивность роста давления текучести с повышением степени стесненности пластической деформации. Аналогичный характер имеет и зависимость эффективного напряжения в объеме прессовки от давления прессования. Однако в своей начальной части эта зависимость не линейна, что отражает запаздывание в наступлении стесненной пластической деформации частиц в объеме прессовки по отношению к частицам, расположенным на границе. Исследования, проведенные на ряде дисперсных материалов как органического, так и неорганического происхождения, показали, что величина эффективного напряжения, при котором зависимость эффективного напряжения от давления прессования становится линейной, близко к значению исходной твердости частиц материала (σ_{or}). Линейная часть графика зависимости эффективного напряжения от давления описывается формулой, аналогичной (1):

$$\sigma_s = \sigma_{os} + k_s P. \quad (3)$$

Коэффициенты зависимостей (1), (3), рассчитываемые методом наименьших квадратов, составили: $\sigma_{or} = 141$ МПа, $\sigma_{os} = 26,9$ МПа, $k_r = 0,742$, $k_s = 0,959$.

Поскольку при некотором критическом давлении ($P_{кр}$) смыкаются поры и $\sigma_r = \sigma_s = P_{кр}$, то

$$k_r = 1 - \frac{\sigma_{or}}{P_{кр}}, \quad k_s = 1 - \frac{\sigma_{os}}{P_{кр}}.$$

С доверительной вероятностью 0,95 было установлено, что рассчитанные с помощью этих формул значения $P_{кр}$ можно считать статистической оценкой одной и той же величины $P_{кр}$. Отношение для данного материала составило 5,45.

Подобные данные были получены для материалов разной природы с разной формой частиц. Рассмотрим результаты испытаний металлических порошков, представленные на рис. 3. Графики построены в безразмерных координатах $(\frac{\sigma_r}{\sigma_t}, \frac{P}{\sigma_t}, \eta = \frac{A_r}{A_a})$. Значения предела текучести для порошков алюминия, железа и меди взяты из справочника [4].

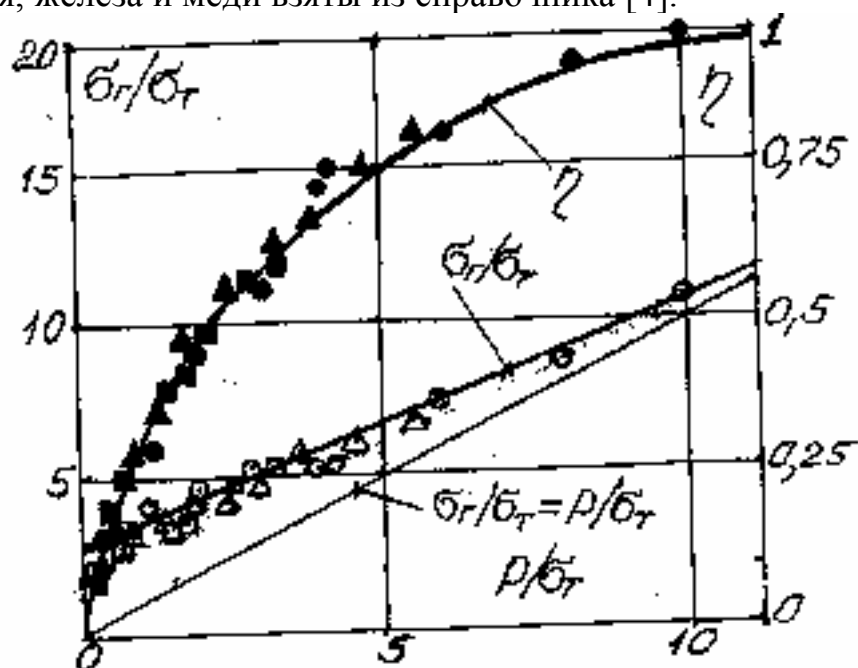


Рис. 3. Контактные характеристики металлических порошков $\circ$ - Al, Δ - Cu, $\square$ - Fe

Контактно-механические характеристики для испытаний материалов приведены в таблице.

Контактно- механические характеристики
для испытаний материалов

Материал	$\frac{\sigma_{or}}{\sigma_t}$	$\frac{P_{кр}}{\sigma_t}$
Алюминий	2,88	10,96
Медь	2,50	11,92
Железо	2,62	14,30

Анализируя приведенные данные, приходим к выводу, что величина коэффициента σ_{or} близка к твердости по Бринеллю. Среднее значение отношения $\frac{\sigma_{or}}{\sigma_t}$ составило 2,67. По литературным данным, отношение твердости по Бринеллю к пределу текучести [2] составляет 2,8. Среднее значение отношения критического давления к пределу текучести составило 12,4

Пользуясь результатами проведенных исследований, можно сделать вывод о том, что если имеются достоверные сведения о величине предела текучести или твердости материала частиц, то, пользуясь найденными соотношениями, можно рассчитать коэффициенты формулы (2).

В заключение рассмотрим, как меняется концентрация пятен контакта по мере роста давления прессования. Из графика, представленного на рис. 4, видно, что при формировании площади контакта алюминиевого порошка концентрация пятен интенсивно возрастает на начальной стадии процесса компактирования.

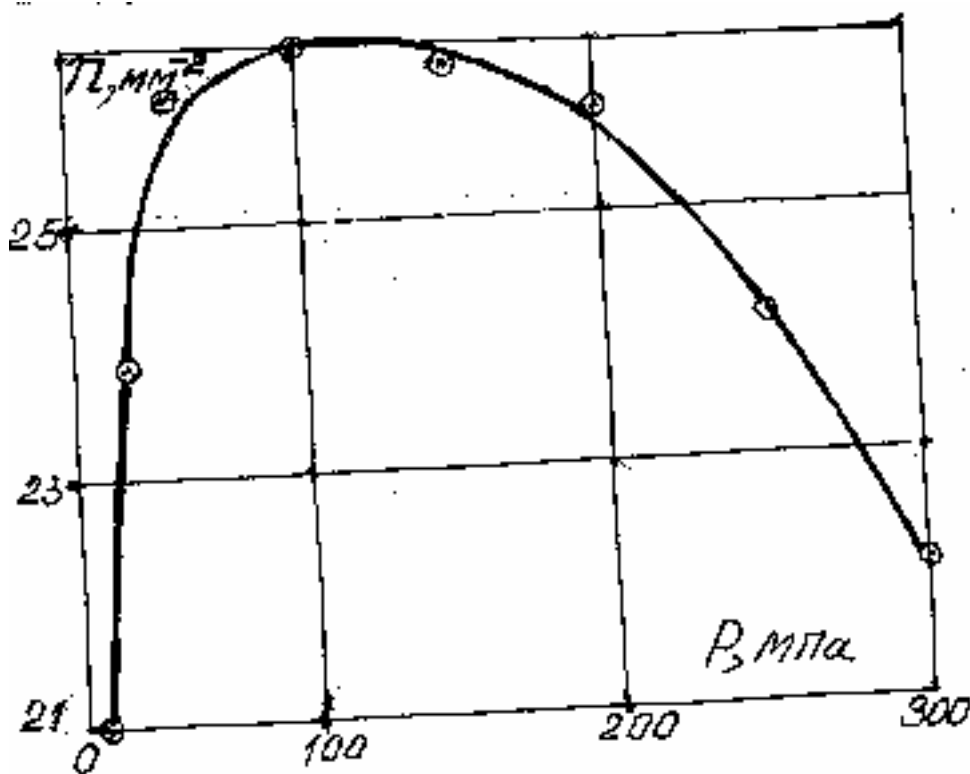


Рис. 4. Влияние давления на концентрацию пятен контакта

Начиная с давления, при котором стесненная пластическая деформация охватывает весь объем прессовки, концентрация достигает максимума, а затем начинает убывать из-за агрегирования пятен вплоть до полного слияния при критическом давлении.

Библиографический список

1. Беркович И.И. Фрикционное взаимодействие торфа с элементами оборудования торфяного производства: Дис. д-ра техн. наук. Тверь: ТГТУ, 1997. 468 с.
2. Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. 266 с.
3. Основы трибологии./ Демкин Н.Б. и др. М.: Центр «Наука и техника». 1995. 777с.
4. Беркович И.И. Фрикционное взаимодействие дисперсных материалов с твердой поверхностью// Трение и износ. 1995. Т.16. №6.С.1079-1117.
5. Беркович И.И., Морозова Ю.И. Контактное взаимодействие дисперсных структур// Механика и физика фрикционного контакта: Межвузовский сборник научных трудов. Тверь: ТГТУ, 1998. С.27-37.

УДК 533.538:678.4:621.26.065

В.Г. Копченков

Северо-Кавказский государственный технический университет

ВЛИЯНИЕ ВИДА ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА НА ВЕЛИЧИНУ КОЭФФИЦИЕНТА МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПРИ УДАРЕ

Износ при ударном воздействии частицы является следствием передачи энергии от двигающейся частицы к поверхности при дискретном контакте. В соответствии с энергетической концепцией изнашивания процесс разрушения поверхностного слоя имеет активационную природу. Для его осуществления необходимо подвести или накопить в критическом объеме материала предельную плотность энергии.

Количество энергии, поглощенное поверхностью при ударе, зависит от вида фрикционного контакта поверхности и частицы, который определяет кинематику относительного движения и, как следствие, работу внешних и внутренних сил при деформации, а также от физико-механических свойств поверхности и частицы.

На рис. 1а показана физическая модель контакта твердой частицы с высокоэластичной поверхностью, когда при ударе возникает только упругая деформация.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования механизма фрикционного контакта твердой частицы и высокоэластичной поверхности [1,2] дали возможность установить влияние угла атаки, коэффициента трения, эластичности поверхности на кинематику контакта и характер деформирования поверхности. При больших углах атаки α_0 (рис. 1а) твердая частица упруго деформирует поверхность в нормальном направлении и незначительно в тангенциальном. При уменьшении угла атаки уменьшается глубина внедрения h_{max} и, соответственно, нормальная деформация. Одновременно возрастает упругое смещение поверхности δ в тангенциальном

направлении, но оно не превышает относительного перемещения частицы по поверхности l_x . При достижении граничного угла ($l_x = \delta$) зона удара без скольжения заканчивается и начинается зона удара с частичным скольжением. В этой зоне величина упругого сдвига поверхности δ меньше перемещения частицы по поверхности l_x за счет уменьшения нормальной составляющей силы удара и, соответственно, силы трения. Поэтому после граничного угла уменьшается тангенциальная деформация поверхности, но возникают относительные скольжения частицы и поверхности.

Приведенный механизм контактного взаимодействия частицы и резиновой поверхности позволяет определить механические потери при ударе, т.е. количество поглощенной поверхностью энергии ΔW :

$$\Delta W = \Delta W_y + \Delta W_x + A_{mp}, \quad (1)$$

где ΔW_x , ΔW_y – потери энергии на деформирование поверхности соответственно в нормальном и тангенциальном направлении, A_{mp} – потери энергии на работу трения при проскальзывании частицы.

Коэффициент механических потерь позволяет оценить какая часть энергии частицы поглощается при ударе поверхностью:

$$\chi = \frac{\Delta W}{W_0}, \quad (2)$$

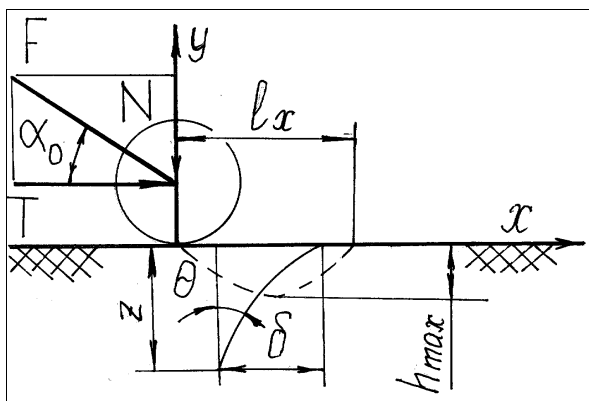
где W_0 – полная энергия цикла нагружения, т.е. запас энергии частицы.

С учетом (1) коэффициент механических потерь можно разложить на составляющие:

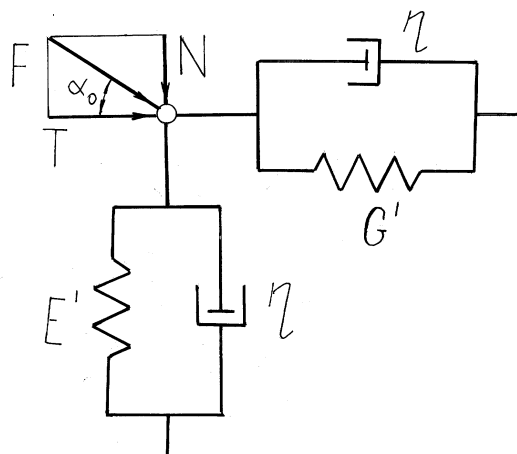
$$\chi = \frac{\Delta W_y + \Delta W_x + A_m}{W_0} = \chi_y + \chi_x + \chi_T. \quad (3)$$

где χ_y , χ_x и χ_T – составляющие коэффициента механических потерь соответственно на нормальную и тангенциальную деформации и работу трения.

Сумма χ_y и χ_x показывает гистерезисные потери на внутреннее трение, а χ_T – потери на внешнее трение.



а)



б)

Рис. 1. Схема контакта твердой частицы с поверхностью:
а) физическая модель удара; б) вязкоупругая модель удара

Рассмотрим составляющие уравнения (1) исходя из вязкоупругой природы эластомеров. На рис. 1б показана комбинация моделей Кельвина-Фохта, описывающая поведение стандартного вязкоупругого тела применительно к рассматриваемому механизму контакта.

Энергия ΔW_y , рассеянная за половину цикла нагружения, если принять синусоидальное изменение нормальной деформации

$$y = y_0 \sin \omega t, \quad (4)$$

$$\Delta W_y = \int_0^{\pi/2} c \cdot y' \cdot dy = \frac{\pi}{2} \omega \cdot c \cdot y_0^2,$$

где y_0 – максимальная деформация, ω – частота нагружения, c – коэффициент демпфирования, y' – скорость деформации

Исходя из понятия коэффициента демпфирования

$$c = N_\delta / y',$$

где N_δ – демпфирующая сила.

Из модели вязкоупругого тела следует, что

$$N_\delta = \frac{\eta \cdot y'}{L} A,$$

где A – площадь контакта, η – вязкость демпфера, L – характеристический размер. С учетом соотношения [3]

$$\eta = \frac{E' \cdot \operatorname{tg} \delta}{\omega},$$

где $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс потерь, E' – динамический модуль резины, получим

$$\Delta W_y = \frac{\pi \cdot E' \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot A \cdot y_0^2}{L}. \quad (5)$$

Учитывая, что $y_0 = h_{\max}$ и используя соотношение Герца для удара твердой частицы по поверхности получим выражение для нормальной составляющей коэффициента механических потерь

$$\chi_y = \frac{\pi^2 E' \operatorname{tg} \delta (1 - \mu^2) \sin^2 \alpha_0}{E}, \quad (6)$$

где α_0 – угол атаки, μ – коэффициент Пуассона, E – комплексный модуль упругости.

Потери энергии на тангенциальный сдвиг поверхности

$$\Delta W_x = \int_0^{\pi/2} c \cdot x' \cdot dy = \frac{\pi}{2} \omega \cdot c \cdot x_0^2,$$

где c – коэффициент демпфирования, x_0 – максимальная тангенциальная деформация.

Повторив предшествующие рассуждения, получим

$$\Delta W_x = \frac{\pi \cdot G' \operatorname{tg} \delta \cdot A \cdot x_0^2}{2Z}, \quad (7)$$

где Z – глубина деформированной поверхности, G' – динамический модуль сдвига.

При тангенциальном сдвиге максимальная деформация x_0 в зоне удара со скольжением определяется по зависимости [4]

$$\delta = \frac{3(2 - \mu)f \cdot N}{8G \cdot a},$$

где f – коэффициент трения, N – нормальная сила удара, G – модуль сдвига, a – радиус пятна контакта.

В зоне удара без скольжения максимальную деформацию l_x можно определить из рис. 1а:

$$l_x = \frac{2h_{\max}}{\operatorname{tg} \alpha_0},$$

где $h_{\max}$ – максимальная глубина внедрения.

Поэтому тангенциальная составляющая коэффициента механических потерь зависит от значения угла атаки α_0 и граничного угла α_b , разделяющего зоны удара:

$$\text{при } \alpha_0 < \alpha_b \quad \chi_x = \frac{0,3 \cdot \pi^2 \cdot \operatorname{tg} \delta}{Z \cdot G^2} \cdot \frac{(2 - \mu)^2 (f \cdot F \sin \alpha_0)^2}{m \cdot V_0^2}, \quad (8)$$

$$\text{при } \alpha_0 \geq \alpha_b \quad \chi_x = \frac{\pi^2 \operatorname{tg} \delta (1 - \mu^2) \cos^2 \alpha_0}{E},$$

где F – сила удара, G – модуль сдвига, m – масса частицы, f – коэффициент трения скольжения, V_0 – скорость частицы.

В зоне удара с частичным скольжением возникают потери, связанные с работой сил внешнего трения:

$$A_{mp} = f \cdot N(l_x - \delta) = f \cdot F \cdot \sin \alpha (l_x - \delta),$$

где l_x – перемещение частицы относительно начальной точки контакта на поверхности, δ – упругое перемещение поверхности при ударе, F – сила удара, f – коэффициент трения.

Составляющие от трения коэффициента механических потерь

$$\chi_t = \frac{2f \cdot F \sin \alpha (l_x - \delta)}{m \cdot V_0^2}. \quad (9)$$

На рис. 2а приведены расчетные кривые, построенные по зависимостям (6) (8) (9), и суммарный график коэффициентов механических потерь (3). На рис. 2б в качестве примера показаны кривые, построенные по экспериментальным данным для резин двух марок, отличающихся видом каучука (1 – на СКИ-3, 2 – на СКД), но одинаковым наполнением техуглеродом (20 мас. частей).

Сравнение графиков на рис. 2а и 2б позволяет сделать вывод о высоком уровне сходимости теоретических и экспериментальных результатов. Это позволяет сделать анализ факторов, влияющих на величину коэффициента механических потерь при ударе по поверхности эластомера. Из уравнений (6), (8), (9) следует, что количество энергии, поглощаемой поверхностью, зависит в основном от ее упруго-гистерезисных свойств: динамического модуля, тангенса потерь, комплексного модуля, а также угла атаки. При малых углах атаки важны коэффициент трения, масса и скорость частицы, определяющие силу удара.

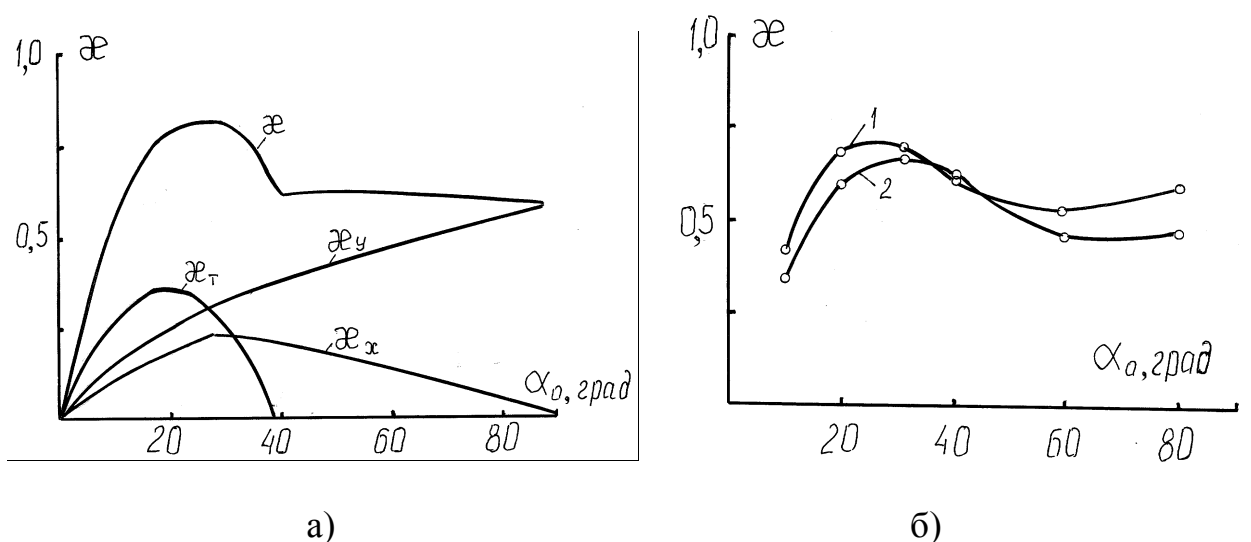


Рис. 2. Зависимость коэффициента механических потерь от угла атаки: а) теоретическая; б) экспериментальная

Эти выводы позволяют через рецептуру и технологию изготовления эластомеров влиять на величину поглощенной энергии при ударе за счет измерения физико-математических свойств.

Библиографический список

1. Копченков В.Г. Анализ моделей для описания удара твердой частицы по резиновой поверхности.: Сб. науч. тр. Ставрополь: СевКав ГТУ, 2000. С. 14-18.
2. Копченков В.Г. Влияние фрикционного контакта на траекторию движения твердой частицы при ударе //Механика и физика фрикционного контакта: Межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТГТУ, 2000. С. 8-13.
3. Мур Д. Основы и применения трибоники. М.: Мир, 1978. 487 с.
4. Джексон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.

УДК 621.315

С.В.Десятов, В.В.Измайлов, А.В. Корбачёв, М.В.Новоселова
Тверской государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК НА ЭЛЕКТРОКОНТАТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Поверхность любых металлов покрыта посторонними поверхностными пленками, влияющими на физические свойства контакта металлов, в том числе на его электрическую проводимость. Проблема поверхностных пленок особенно важна в контактах, работающих при повышенных температурах, например, в сильноточных контактах, так как в этих условиях скорость образования и толщина поверхностных пленок увеличиваются порой вплоть до полной потери проводимости. В то же время роль поверхностных пленок не всегда однозначно отрицательна. Например, в скользящих электрических контактах оксидные пленки играют двоякую роль: с одной стороны, могут существенно снижать контактную электропроводность, с другой – уменьшают трение в контакте. В любых контактах разрушение поверхностных пленок очень существенно влияет на их электропроводность. Это влияние обуславливает необходимость изучения электрической и механической прочности пленок.

Методика проведения экспериментов

В продолжение проведенных ранее экспериментов [1] были исследованы условия электрического и механического разрушения оксидных пленок на образцах из молибдена и вольфрама. Для экспериментального определения механической и электрической прочности пленок использовался прибор (рис. 1), в котором поверхность образца 1 контактировала с металлическим зондом 2 из сплава ПдВ20, достаточно твердого и достаточно стойкого к потускнению. Нормальную нагрузку N на зонд задавали разновесами массой 0,5-1,0 г. О разрушении пленки судили по величине разности потенциалов между зондом и образцом. Пленка считалась разрушенной, если разность потенциалов падала необратимо на 1-2 порядка по сравнению с разностью потенциалов на разомкнутом контакте, в других случаях пленка считалась неразрушенной.

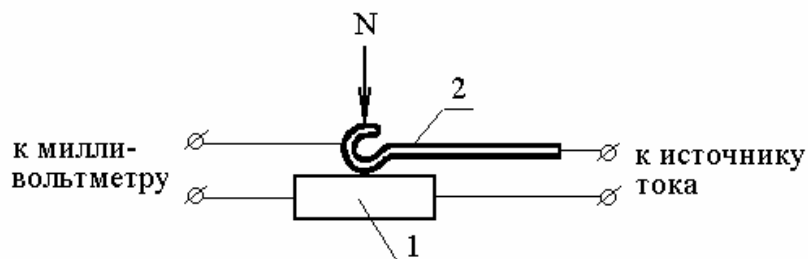


Рис. 1. Схема установки для исследования разрушения поверхностных слоев

Исследование механического разрушения

Механическое разрушение оксидных пленок исследовали, нагружая контакт разновесами при напряжении на разомкнутом контакте 20 мВ (для исключения электрического пробоя). В эксперименте определяли вероятность разрушения P при нагрузке N . Повторность экспериментов была 10 -кратной. Данные обрабатывали методами математической статистики с определением зависимости $P(N)$ и последующей её аппроксимацией формулой

$$P = \exp\{-\exp[-(aN+b)]\},$$

где a и b - числовые коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов.

Исследование электрического разрушения

Исследование электрического разрушения оксидных пленок проводили при механической нагрузке на контакт, соответствующей вероятности разрушения $P \approx 30\%$. На замкнутый контакт подавали линейно увеличивающееся напряжение, которое фиксировалось на самопишущем вольтметре. В момент пробоя пленки наблюдалось резкое падение напряжения. Максимальное его значение принималось за пробивное U_{np} . Величина U_{np} существенно различается в различных точках поверхности. Это можно объяснить, во-первых, неоднородностью толщины и свойств пленок, во-вторых, наличием шероховатости на поверхности исследуемого образца. Вследствие шероховатости зонд контактирует с отдельными микровыступами с различным радиусом закругления вершины.

Экспериментальные результаты обрабатывали методами математической статистики с определением среднего значения пробивного напряжения и доверительного интервала при 95%-ной доверительной вероятности.

Известно, что U_{np} тонких диэлектрических пленок самой различной природы имеет величину порядка 10^8 В/м [2, 3]. По величине пробивной напряженности оценивали толщину d оксидных пленок.

Обсуждение результатов

Механическая прочность

В таблице 1 и на рис. 2 для пленок, полученных в различных условиях, приведены значения нагрузок, при которых вероятность разрушения пленок составляет 50%.

Таблица 1. Значения нагрузок 50-процентной вероятности разрушения поверхностных пленок

Металл	Условия окисления		Кривая на рис. 2	N, мН при $P = 50\%$
	T, °C	Время		
W	Естественные пленки		4	12,0
	20	12 дней	1	7,0
	20	21 день	2	11,5
	75	8 часов	3	12,0
Mo	Естественные пленки		4	13,0
	75	5 часов	1	2,5
	100	4 часа	2	4,5
	75	10 часов	3	12,5

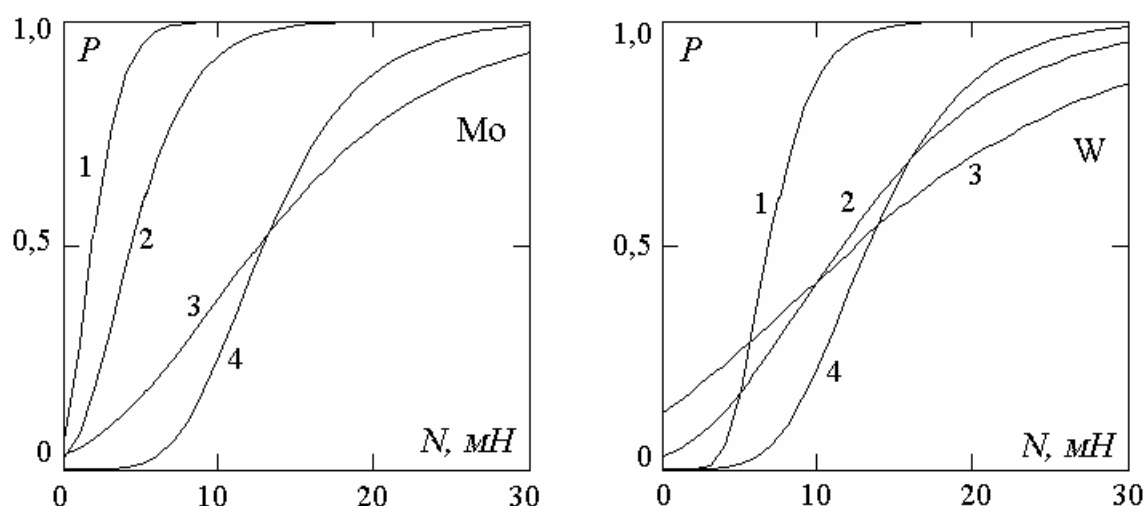


Рис. 2. Зависимость вероятности механического разрушения окисных пленок на образцах из молибдена и вольфрама от нормальной нагрузки

Механическая прочность естественных пленок на молибдене и вольфраме практически одинакова. Наиболее вероятная нагрузка их разрушения составляет 12 - 13 мН. Из анализа зависимостей $P(N)$ следует, что условия окисления влияют на механические свойства образующихся поверхностных пленок. Увеличение температуры и времени окисления вызывает возрастание прочности пленок, что может быть связано в первую очередь с увеличением их толщины. Оценить толщину поверхностных пленок позволяет исследование их электрической прочности.

Электрическая прочность

Результаты исследования электрического разрушения поверхностных пленок представлены в таблице 2 и на рис. 3.

Представляет интерес оценить температуру на пятне контакта в момент электрического пробоя пленки. Для этого воспользуемся уравнением [2]

$$T = \sqrt{\frac{I}{8 \cdot L}} U_{np},$$

где T – температура перегрева контакта, $L = 2,44 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2/\text{К}^2$ - число Лоренца. Как видно из таблицы 2, температура контакта в момент пробоя соответствует температуре рекристаллизации исследованных металлов, которая составляет 0,4 – 0,5 абсолютной температуры плавления. При рекристаллизации происходит размягчение металла, поэтому напряжение, соответствующее температуре рекристаллизации, в теории электрических контактов называют напряжением размягчения [2]. Следствием рекристаллизации является уменьшение твердости металла, в результате чего увеличивается площадь контакта, снижаются его сопротивление и температура перегрева контакта. Все это свидетельствует о неразрывной связи процессов электрического и механического разрушения поверхностной пленки.

Таблица 2. Значения пробивного напряжения, толщины пленок и температуры контакта

Металл	U_{np} , В при 20 °С	d , нм	$T_{\text{конт}}$, °С при U_{np}	$T_{\text{плав}}$, °С	$\Theta = \frac{T_{\text{конт}}}{T_{\text{плав}}}$
W	$0,62 \pm 0,28$	6,2	1690 ± 633	3420	0,53
Mo	$0,29 \pm 0,13$	2,9	946 ± 294	2620	0,42

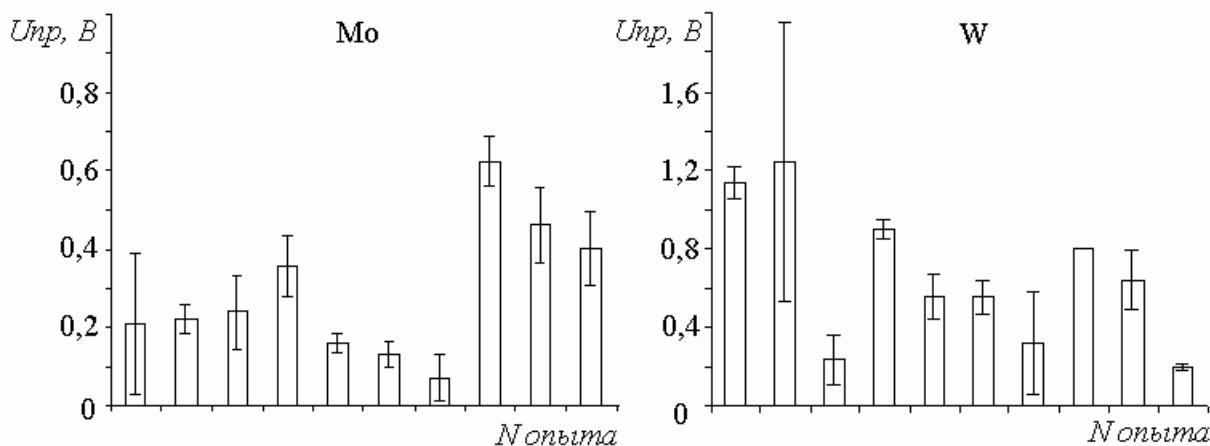


Рис. 3. Значения пробивного напряжения в различных точках поверхности образца

Из рис. 4 следует, что при многократном пробое в одной и той же точке пробивное напряжение после возможного первоначального снижения в

дальнейшем остается постоянным. Это можно считать проявлением эффекта «самозалечивания», часто наблюдающегося в тонкопленочных структурах [3].

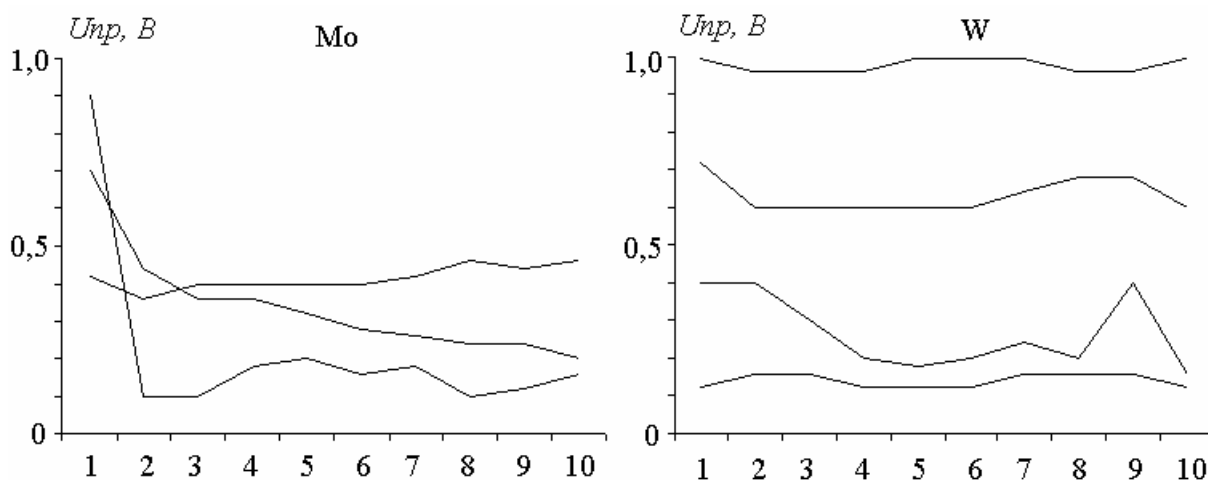


Рис. 4. Зависимость пробивного напряжения окисных пленок от числа пробоев

Библиографический список

1. Борисов П.А., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Экспериментальные исследования разрушения окисных пленок на металлических гранулах // Механика и физика фрикционного контакта: Межвуз. сб. научн. тр. Тверь: ТГТУ, 2000. С. 45-49.
2. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Изд. иностр. лит-ры, 1961. 464 с.
3. Воробьев Г.А., Мухачев В.А. Пробой тонких диэлектрических пленок. М.: Сов. радио, 1977. 72 с.

УДК 621.891

В. А. Погonyшев, С. А. Погonyшев, В. Т. Осипенко
Брянская государственная сельскохозяйственная академия
Брянская государственная инженерно-технологическая академия

НАНЕСЕНИЕ ПЛЁНОК ПЛАСТИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ НА ПЛОСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ.

В современных условиях глубокого экономического кризиса повышение качества и надёжности машин является одной из важнейших народнохозяйственных проблем, стоящих перед технологией машиностроения и ремонтными предприятиями. Анализ технологий восстановления показывает, что повышения ресурса восстановленных деталей можно достигнуть путём применения более эффективных технологий[1]. В настоящее время прогрессивной технологией для повышения качества ремонта восстановленных стальных деталей является финишная антифрикционная безабразивная

обработка (ФАБО), которая еще не нашла широкого применения при восстановлении изношенных и изготовлении новых деталей машин с износостойким покрытием. При этом сдерживающим фактором является технология получения пленок пластичных металлов на плоских поверхностях деталей.

Требования, предъявляемые к наносимым материалам, предназначенным для использования в сопряжениях[2], можно в известной мере разделить на экономические, технологические, эксплуатационные и экологические.

Установлено[3], что поверхностные слои сопрягаемых деталей должны быть менее прочными по сравнению с нижележащими. Однако после механической обработки в результате сдвига кристаллов и разрушения кристаллической решётки происходит разрыхление поверхности и одновременно – наклёп его[3]. Следовательно, приповерхностные слои по сравнению с нижележащими имеют повышенную твёрдость. Это говорит о том, что уже в процессе изготовления сопрягаемой детали правило положительного градиента не выполняется, что приводит к нестабильности коэффициента трения и значительному износу в период приработки, а следовательно, сокращению срока службы этой детали.

Известна технология получения покрытия методом ФАБО для повышения задиростойкости и улучшения приработки сопряженных деталей, восстановления посадочных поверхностей, получения многослойных пленок [1], и т.д. Все эти покрытия наносились на цилиндрические поверхности, где скорость скольжения прутка (донора) с течением времени не изменялась и была постоянной.

Нанесение пленок на плоские поверхности деталей вращения сопряжено с изменением скорости скольжения наносимого материала (прутка). Следовательно, изменяются и процессы, характеризующие режимы фрикционного нанесения пленок. При проведении опытов по получению плёнок методом ФАБО на торцовые поверхности мы столкнулись с этой проблемой. В результате экспериментов были установлены режимы, при которых плёнка из латуни Л-63 наносилась ровным сплошным слоем. Анализ проведенных опытов показал, что самыми оптимальными при нанесении плёнок из латуни Л-63 являются режимы: диапазон частот вращения от $250...350 \text{ мин}^{-1}$ при подаче от 0,08 до 1,5 мм/об. За пределами указанного диапазона, как показали эксперименты, адгезия ухудшается.

Вышеуказанный метод предлагается использовать для фрикционных многодисковых муфт. Как известно[2], для этих муфт характерен нестабильный коэффициент трения. Это связано с тем, что в момент соприкосновения между дисками имеется масляная плёнка. После повышения температуры[4] и силы сжатия дисков эта пленка выдавливается, вследствие чего происходит резкое изменение силы трения.

При использовании плёночных покрытий, получаемых методом ФАБО, которые обладают наряду с демпфирующими свойствами еще и смазывающими, можно получить более стабильно работающие фрикционные многодисковые муфты. Период приработки при этом сводится к минимуму, т.

к. в соприкосновение входит материал, обладающий необходимой пластичностью за счёт лучшей совместимости поверхностей элементов пары трения.

Библиографический список

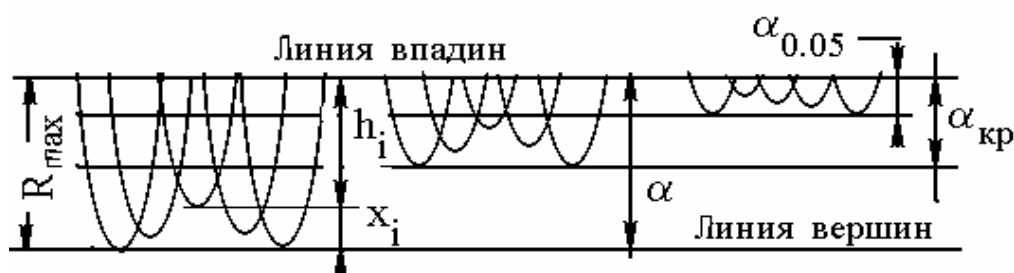
1. Погоньшев В.А., Погоньшев С.А., Попов А.П. Демпфирующие свойства многослойных покрытий // Информационный листок. №08-032-01.
2. Крагельский И.В., Михин Н. М. Узлы трения машин. М.: Машиностроение, 1984.
3. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. М.: Машиностроение, 1987.
4. Евтушенко А.А., Иваник Е.Г., Коваленко Е.В. Нестационарный фрикционный разогрев упругого шероховатого тела // Трение и износ. 1998. №1.С.17-25.

УДК 891. 621; 5.39.411.001.24

А.А.Ланков, Д.М.Ворохобин
Тверской государственный технический университет

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НЕРОВНОСТЕЙ ПРИ СЖАТИИ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

При сжатии шероховатого слоя очень твердой недеформируемой плоскостью на произвольную величину сближения ε все неровности, вступившие в контакт, в силу распределения вершин выступов по высоте шероховатого слоя будут находиться в неодинаковом напряженно – деформированном состоянии (см.рис).



Три группы выступов шероховатой поверхности
при ее контакте с плоской: 1-с $h_i < \alpha_{0.05}$,
2-с $\alpha_{0.05} < h_i < \alpha_{кр}$, 3-с $\alpha_{кр} < h_i < R_{max}$

Часть неровностей, деформация которых не превышает некоторую относительную величину, обозначаемую как $\varepsilon_{0.05}$ (сближение, соответствующее степени нагружения $k=0,05$), деформируется упруго.

Часть выступов, деформация которых больше этой величины, но меньше критической деформации $\varepsilon_{кр}$, сжимается, подчиняясь законам деформирования переходной области (ООУП). Наконеч неровности, сжатие которых превышает критическое значение, деформируется упругопластически с упрочнением (в ОРУП) [1,2].

Для анализа напряженно-деформированного состояния выступов шероховатости используем представление неровностей в виде сегментов сфер одинакового радиуса r , но различной высоты. Максимальная высота неровностей обозначается как R_{max} [3,4].

Для расчета необходимых величин в различных случаях деформирования (в упругой фазе, ООУП и ОРУП) применяется один и тот же метод, меняются только параметры, соответствующие фазам деформирования. В силу ограниченности объема статьи покажем, как рассчитываются необходимые характерные величины на примере выступов, деформирующихся в ОРУП, а для остальных фаз ограничимся выводами.

Плотность распределения выступов шероховатой поверхности $\Phi(\varepsilon)$ для сферической модели выступов примем в виде степенного закона

$$\Phi(\varepsilon) = \frac{dn}{n_c d\varepsilon} = \frac{b}{B(2, \nu - 1)} \cdot \varepsilon^{\nu-2}. \quad (1)$$

Для степени нагружения выступов в ОРУП используем известное соотношение [1]

$$k = 0,5 + 2 \cdot \frac{\alpha}{\alpha_{кпу}} - \sqrt{0,25 + 2 \cdot \frac{\alpha}{\alpha_{кпу}}}. \quad (2)$$

Математическое ожидание степени нагружения в ОРУП найдем проинтегрировав по всем выступам в пределах от 0 до $\alpha - \alpha_{кр}$, воспользовавшись условиями (1) и (2):

$$\bar{k} = \frac{b}{B(2, \nu - 1)} \cdot \left[\frac{1}{2} \int_0^{\alpha - \varepsilon_{кр}} x^{\nu-2} dx + \frac{2}{\alpha_{кр}} \int_0^{\alpha - \alpha_{кр}} (\alpha - x) x^{\nu-2} dx - \int_0^{\alpha - \alpha_{кр}} \sqrt{\frac{1}{4} + 2 \frac{\alpha - x}{\alpha_{кр}}} x^{\theta-2} dz \right].$$

Введя относительные величины $\varepsilon = \frac{\alpha}{R_{max}}$, и $\varepsilon_{кр} = \frac{\alpha_{кр}}{R_{max}}$, произведя замену переменных, проинтегрировав и сгруппировав, для математического ожидания степени нагружения в ОРУП получим после значительных выкладок

$$\bar{k} = b \varepsilon_{кр}^{\nu-1} \left[2 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{кр}} \right)^{\theta} - \nu(\nu-1) \cdot {}_1F_2^{\bullet} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{кр}} = 1 \right)^{\nu-2} - \frac{\nu}{2} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{кр}} - 1 \right)^{\nu-1} \cdot \left[{}_1F_2^{\bullet} \cdot \sqrt{1 + 8 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{кр}}} \right] \right], \quad (3)$$

где гипергеометрические функции Гаусса ${}_1F_2 = F(x, y, z; \gamma)$ имеют следующее содержание [5]:

$${}_2F^{\bullet\bullet}_1 = {}_1F_2^{\bullet\bullet} \cdot \left(1, 2 - \nu, 3; -\frac{1}{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{кр}} - 1} \right), \quad {}_1F_2^{\bullet} = {}_1F_2^{\bullet} \cdot \left(\nu - 1, -\frac{1}{2}, \nu; \frac{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{кр}} - 1}{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{кр}} + 1} \right)$$

Контурное давление определяется как частное от деления математического ожидания нагрузки на контурную площадь основания выступа, то есть

$$\bar{q}_c = \frac{\bar{P}}{\Delta A_c} = \frac{\bar{k}P_{кр}}{\Delta A_c} = 0.5k\varepsilon_{кр}H. \quad (4)$$

После подстановки значения степени нагружения и преобразований для контурного давления найдем

$$\begin{aligned} \dot{q}_c = & \frac{bv}{4} H \varepsilon_{кр} (\varepsilon - \varepsilon_{кр})^{\nu-1} \left[1 - \sqrt{1 + 8 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{кр}}} \cdot {}_1F_2 \right] + bH\varepsilon^\nu - \\ & - \frac{bv(\nu-1)}{2} H (\varepsilon - \varepsilon_{кр})^{\nu-2} \varepsilon_{кр} {}_1F_2^{\bullet\bullet}. \end{aligned} \quad (5)$$

Опорная площадь произвольного сферического выступа определяется известным соотношением $A_{\text{опл}} = \alpha 2\pi R_{\text{max}}(\varepsilon - x)$, в котором относительное сближение ε зависит от величины деформации выступа, то есть в конечном счете от степени упрочнения материала в ОРУП, определяемой величиной степени нагружения k . Коэффициент α в этой фазе деформирования равен 1.

Фактическая площадь контакта выступов в ОРУП найдется интегрированием площадок контакта по поверхности при сближении ε :

$$A_r = \int_0^{\varepsilon - \varepsilon_{кр}} A_{\text{пл}} dn = 2\pi R_{\text{max}} n_c b \nu (\nu - 1) \int_0^{\varepsilon - \varepsilon_{кр}} (\varepsilon - x) x^{\nu-1} dx. \quad (6)$$

Выражение (6) значительно упрощается при переходе к относительной фактической площади η_r :

$$\eta_r = \frac{A_{\text{ОРУП}}}{2\pi R_{\text{max}} n_c} = b \nu (\nu - 1) \cdot \int_0^{\varepsilon - \varepsilon_{кр}} (\varepsilon - x) x^{\nu-2} dx. \quad (7)$$

Решение последнего интеграла после некоторых преобразований приводит к следующему результату:

$$\eta_r = u \varepsilon_{кр}^\nu \left[\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{кр}} \right)^\nu - \frac{\nu(\nu-1)}{2} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{кр}} - 1 \right)^{\nu-2} \cdot F \right] \quad (8)$$

Используя полученные данные, определяем фактическое давление:

$$q_r = \frac{q_c}{\eta_r}. \quad (9)$$

По результатам исследований параметров контакта во всех фазах деформирования металлов, можно утверждать:

1. При сжатии шероховатой поверхности, когда значение степени нагружения более единицы, при любом сближении поверхностей происходит деформация выступов – в упругой, переходной (ООУП) и упругопластической областях деформирования (ОРУП).

2. При математическом ожидании степени нагружения $k > 1$ наибольшая часть нагрузки воспринимается выступами, деформирующимися в ОРУП, в которой среднее давление монотонно возрастает, стремясь приблизиться к своей предельной величине H .

3. Монотонное увеличение давления в ОРУП под влиянием возрастания нагрузки (наклеп или деформационное упрочнение) связано с постепенным, не скачкообразным, изменением структуры материала среды под индентором, что и приводит к повышению сопротивляемости среды внешним воздействиям.

4. Анализ показывает, что независимо от величины сближения упругодеформирующиеся выступы выдерживают незначительную нагрузку, а фактическое давление на них с высокой надежностью постоянно и всегда меньше $1/3 H$; на выступах, деформирующихся в переходной области, фактическое давление также постоянно, но по величине несколько меньше $1/2 H$, и только на выступах, деформирующихся в ОРУП, давление больше $1/2 H$ и медленно возрастает, стремясь приблизиться к H .

5. Пластическая деформация невозможна для металлов большой и средней твердости и у материалов малой твердости с низкими значениями модуля упругости.

6. Ни в коем случае нельзя пренебрегать выступами, деформирующимися в ОРУП, так как именно эти неровности играют весьма существенную роль во многих процессах – трение скольжения, электро – теплопроводность, удара и пр.

Из всего сказанного выше следует, что любой расчет контактных характеристик является, по крайней мере неточным, а часто просто ошибочным, если не учитывать выступы, деформирующиеся в ОРУП.

Библиографический список

1. Ланков А.А., Миронов В.А. Упругость, упругопластичность, пластичность в конструктивных средах. Тверь: ТГТУ, 1997. 132 с.
2. Миронов В.А., Ланков А.А. Деформирование конструктивных материалов при ударном воздействии. Тверь: ТГТУ. 2000. 174 с.
3. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 525 с.
4. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 348с.
5. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 576 с.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Изд-во физ-мат. литературы, 1978. 634 с.

УДК 531.44: 53.096

В.В.Мешков

Тверской государственный технический университет

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА МАТЕРИАЛА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И ИЗНОС ПОРШНЯ

Рациональным путем повышения надежности и долговечности технологического оборудования является прогнозирование параметров узлов трения, в частности численными методами [1-3].

Одним из ответственных трибосопряжений такого оборудования является сопряжение поршень – втулка. Скольжение поршня из композитного материала во втулке под действием механического воздействия приводит к возникновению и трансформации в поршне напряженного состояния и температурного поля. Кроме того, в результате фрикционного взаимодействия поршня и металлической втулки возникают тангенциальные напряжения, тепловыделение и износ.

Цель данной работы – оценка методом конечных разностей влияния состава материала на напряженное состояние и износ упругопластического поршня в зависимости от числа нагружений.

Постановка задачи и исходные параметры для расчета

Торцевая поверхность цилиндрического поршня подвергается динамическому (нагрузка – разгрузка) воздействию. Принято, что механическая работа, затрачиваемая на трение, полностью преобразуется в тепловую энергию. Состояние поршня из упругопластического материала подчиняется условиям теории пластического течения с изотропным линейным упрочнением (с учетом корректировки девиатора напряжений):

$$S_z^2 + S_r^2 + S_\theta^2 + 2\tau_{rz}^2 = 2 Y^2 (J_2, T) / 3. \quad (1)$$

Для случая осевой симметрии исходная система уравнений термоупругости в цилиндрической системе координат может иметь вид

$$\begin{aligned} \rho (\partial v_z / \partial t) &= (\partial \sigma_z / \partial z) + (\partial \tau_{rz} / \partial r) + (1 / r) \tau_{rz}, \\ \rho (\partial v_r / \partial t) &= (\partial \tau_{rz} / \partial z) + (\partial \sigma_r / \partial r) + (1 / r) (\sigma_r - \sigma_\theta), \\ \partial \sigma_z / \partial t &= (2\mu + \lambda) (\partial v_z / \partial z) + \lambda (\partial v_r / \partial r) + \lambda (v_r / r) - \alpha (3\lambda + 2\mu) (\partial T / \partial t), \\ \partial \sigma_r / \partial t &= \lambda (\partial v_z / \partial z) + (2\mu + \lambda) (\partial v_r / \partial r) + \lambda (v_r / r) - \alpha (3\lambda + 2\mu) (\partial T / \partial t), \\ \partial \sigma_\theta / \partial t &= \lambda (\partial v_z / \partial z + \partial v_r / \partial r) + (2\mu + \lambda) (v_r / r) - \alpha (3\lambda + 2\mu) (\partial T / \partial t), \\ \partial \tau_{rz} / \partial t &= \mu (\partial v_z / \partial r + \partial v_r / \partial z). \end{aligned} \quad (2)$$

Начальные и граничные условия определялись аналогично тому как описано в работе [4]. Температурное поле поршня определялось

предварительно и независимо от напряженного состояния тела решением двумерного квазилинейного уравнения теплопроводности. Для расчета износа использовался критерий $J_2 < W_{кр}$, согласно которому износ W происходит, если второй инвариант девиатора напряжений J_2 равен или превышает критическое значение $W_{кр} = Y_k^2 / 3$.

Квазиизотропная структура материала поршня учитывалась комплексным параметром $Y_k = f(Y, E, \nu, \epsilon_d)$, расчет которого производился на основе правила смесей, а затем сравнивался с экспериментальными данными, полученными при квазистатических испытаниях. Эффективные физико-механические и теплофизические характеристики определялись с помощью метода аппроксимации Фойгта [5].

Расчет напряженно-деформированного состояния поршня (диаметр 12 мм, длина 28 мм) во втулке производился при скоростях скольжения 0,35 м/с и давлении несжимаемой жидкости $P = 10$ МПа. В качестве материала поршня выбраны полимер (полисульфон) и полимерный композит на основе полисульфона и графита (объемное содержание графита 5 %), а втулки – сталь 45 (58...62 HRC). Предполагалось, что технологический поверхностный слой поршня толщиной 0,002 мм в обоих случаях представляет собой слой полимера, не содержащий наполнителя.

Обсуждение результатов исследования

Изменение тангенциальных напряжений τ_{tz} в поверхностных слоях поршня в зависимости от количества циклов нагружения N и материала поршня представлено на рис..

Для поршня из полисульфона (рис.а) наибольшая величина тангенциальных напряжений τ_{tz} достигает в поверхностном слое толщиной $h = 0,02$ мм. Расчетные данные показывают, что на глубине 0,16 мм и более величина тангенциальных напряжений невелика: не превышает 3 кПа. При небольшом количестве циклов нагружения ($N < 50$) величина тангенциальных напряжений уменьшается в направлении нормальном к боковой поверхности в глубь поршня. При превышении этого числа циклов ($N=100$) тангенциальные напряжения в подповерхностных слоях (на глубине 0,06 и 0,08 мм) значительно превышают напряжения, возникающие в поверхностном слое. Это подтверждает гипотезу о возможности образования областей разрушения материала в подповерхностных слоях тела, подвергающегося фрикционному воздействию. В дальнейшем τ_{tz} несколько снижаются.

Введение в полимер порошкообразного антифрикционного компонента (графита), не привело, как и ожидалось, к существенному снижению тангенциальных напряжений и износа при небольших числах нагружения ($N=1-10$), (рис. б, Табл.)

Расчетные значения износа W боковой поверхности поршня, мм

Материал поршня	Количество циклов нагружения, N					
	1	2	10	50	100	200
Полисульфон	-	-	0,002	0,004	0,007	0,009
Композит на основе полисульфона и графита (5 объемных %)	-	-	0,002	0,004	0,006	0,007

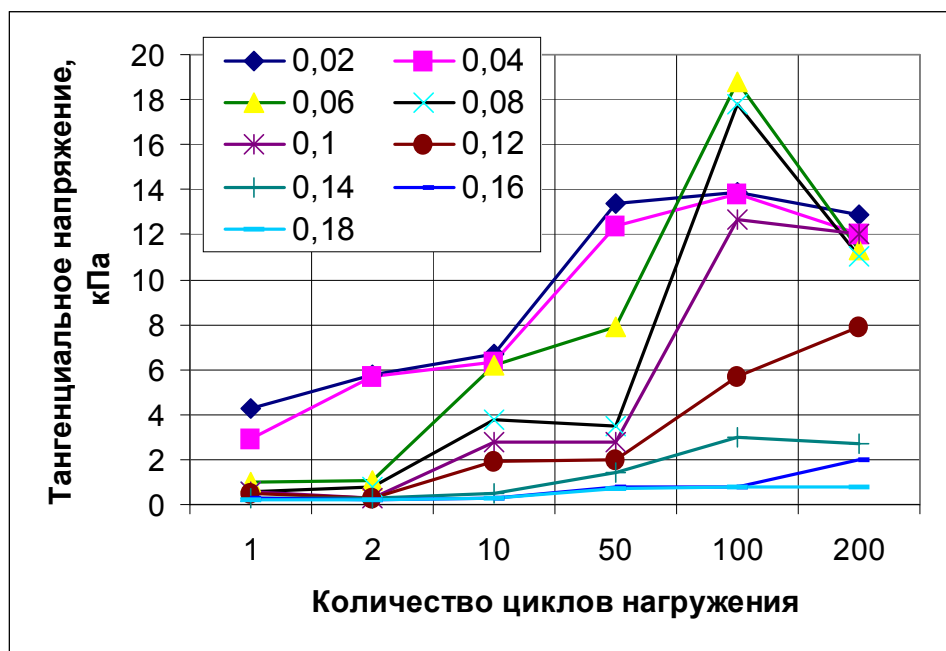
Вероятно, это связано с тем, что необходимо некоторое критическое число циклов нагружения $N_{кр}$ для первоначального износа поверхностного слоя поршня, не содержащего наполнителя (и образования пленки фрикционного переноса, содержащей графит). Для поверхностного слоя ($h = 0,02$ мм) тангенциальные напряжения достигают минимальных значений $\tau_{rz} < 3,2$ кПа при числе циклов $N=50$, после чего резко возрастают в несколько раз, достигая величины около 9 кПа, что, однако, почти в два раза меньше, чем τ_{rz} для поршня из полимера, не содержащего антифрикционный наполнитель.

Заключение. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния поршня в стальной втулке позволило оценить величину и кинетику изменения тангенциальных напряжений в поверхностном и подповерхностных слоях поршня в зависимости от его состава и циклов нагружения. Введение в полимер антифрикционного наполнителя приводит к существенному снижению тангенциальных напряжений в поверхностном слое поршня только после определенного числа циклов нагружения. Показана возможность концентрации в подповерхностных слоях поршня тангенциальных напряжений, величина которых существенно превышает величину напряжений на поверхности.

Обозначения

r, θ, z - цилиндрические координаты; v_z, v_r - скорости частиц материала в направлениях z и r ; $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ - нормальные напряжения; τ_{rz} - тангенциальное напряжение; S_r, S_θ, S_z - компоненты девиатора напряжений; J_2 - второй инвариант тензора скоростей деформаций; λ и μ - коэффициенты Лямэ; Y - динамический предел текучести материала поршня; t - время; T - температура; α - коэффициент линейного температурного расширения; E - модуль упругости; ν - коэффициент Пуассона; ε_d - скорость деформации; W - износ; P - гидростатическое давление.

а)



б)

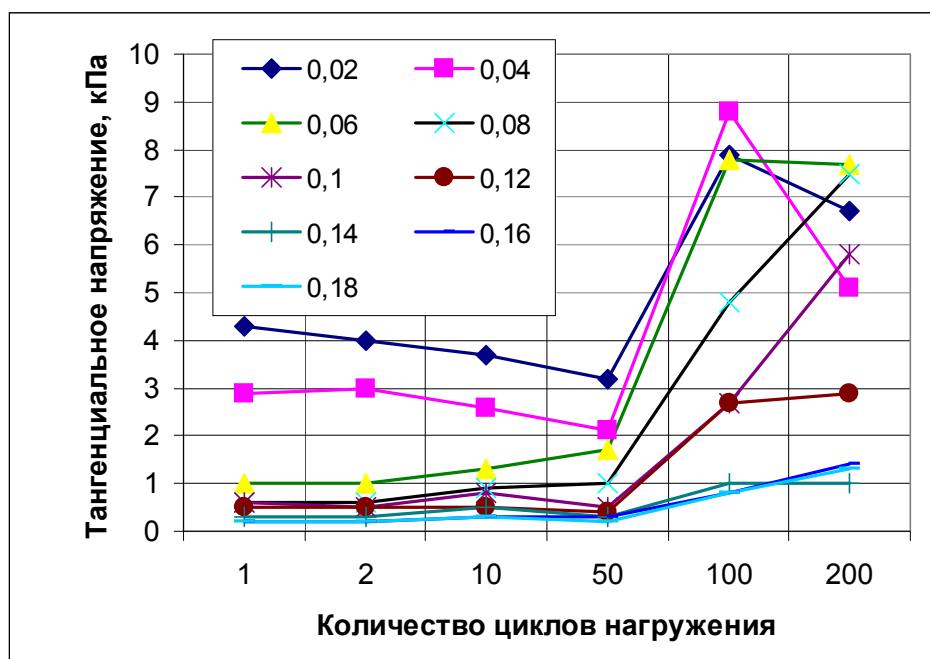


Рис. Зависимость тангенциального напряжения τ_{tz} (кПа) в поверхностном и подповерхностных слоях поршня, расположенных на различной глубине h (мм), в зависимости от количества циклов нагружения N и материала поршня: а) полисульфона, б) композита на основе полисульфона и графита (5 объемных %)

Библиографический список

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.
2. Бате К., Вилсон У. Численные методы анализа и метод конечных элементов / Под ред. А.Ф.Смирнова. М.: Стройиздат, 1982.

3. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация / под ред. Н.С. Бахвалова. М.: Мир, 1986.

4. О моделировании напряженного состояния и износа полимерного поршня / Мешков В.В. и др. // Трение и износ. 1995. Т. 16. N 3. С. 447-453.

5 Кравчук А.С., Майборода В.П., Уржумцев Ю.С. Механика полимерных и композиционных материалов. М.: Наука, 1985.

УДК 621.822

А.Н. Болотов, И.В. Горлов

Тверской государственный технический университет

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗНОШЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Недостаточная обеспеченность ремонтного производства запасными частями и их высокая стоимость являются серьезными факторами снижения надежности и долговечности различных узлов и механизмов. Расширение же производства новых запасных частей связано с увеличением материальных затрат. Вместе с тем около 75% деталей, выбракованных при ремонте, являются ремонтпригодными. Поэтому альтернативой расширению производства запасных частей является вторичное использование изношенных деталей, восстанавливаемых в процессе ремонта.

Из ремонтной практики известно, что большинство выбракованных по износу деталей теряют не более 1 – 2% исходной массы. При этом прочность деталей практически сохраняется. Например, 95% деталей двигателей внутреннего сгорания выбраковываются при износах, не превышающих 0,3 мм, и большинство могут быть использованы после восстановления.

Восстановление деталей стало одним из важных показателей деятельности крупных ремонтных предприятий. По ряду наименований важнейших наиболее металлоемких и дорогостоящих деталей вторичное потребление восстановленных деталей значительно больше, чем потребление новых запасных частей. Так, например, восстановленных блоков двигателей, головок блоков цилиндров, используется в 2,5 раза больше, чем новых; коленчатых валов – в 1,9 раза; картеров коробок скоростей – в 2,1 раза больше, чем новых. Себестоимость восстановления для большинства деталей не превышает 75% стоимости новых, а расход материалов в 15 – 20 раз ниже, чем на их изготовление. Высокая экономическая эффективность предприятий, специализирующихся на восстановлении деталей, обеспечивает им конкурентоспособность в условиях рыночного производства.

Наряду с крупными ремонтными предприятиями, имеющими серьезную материальную базу, существуют небольшие мастерские, которые выполняют

большой объем работ по ремонту автомобилей и агрегатов. Отсутствие необходимых ремонтных производственных фондов этих мастерских приводит к снижению качества ремонта. Однако потребность в ремонте в условиях, когда недоступны отработанные методы ремонта и восстановления деталей и узлов, увеличивается с ростом числа автомобилей и расширением их номенклатуры. Для повышения качества ремонта на небольших предприятиях необходимо разрабатывать новые методы восстановления изношенных деталей, обеспечивающие требуемые параметры реставрированных поверхностей не за счет сложного технологического оборудования, а с помощью специальных приспособлений, которые доступны большинству мелких ремонтных мастерских.

Наиболее доступен для небольших предприятий метод восстановления, основанный на пластическом деформировании. Этот метод не требует сложного технологического оборудования, а может быть обеспечен относительно простыми приспособлениями и инструментами.

В последнее время за рубежом ведутся разработки новых технологий и приспособлений для восстановления подшипников скольжения методом пластических деформаций. В Германии фирма «Waller Krupp» разработала технологию и комплект инструментов для восстановления направляющих втулок клапанов двигателей.

Принцип восстановления деталей основан на применении специального твердосплавного ролика, при помощи которого в направляющей втулке прокатывают спиральный паз. Под действием ролика материал внутренней поверхности втулки выдавливается, в результате чего внутренний диаметр уменьшается. Последующей обработкой специальной разверткой получают номинальный размер внутреннего диаметра. Спиральный паз, образующийся при восстановлении, обеспечивает хорошую смазку стержня клапана даже в критическом режиме работы. Поэтому зазор между направляющей и стержнем клапана можно уменьшить, что улучшает работу клапана и повышает срок службы направляющей.

Недостатком большинства известных методов восстановления пластическими деформациями является то, что номинальные размеры детали после деформирования получаются за счет снятия стружки, а это приводит к дополнительной потере материала детали. Можно в некоторых случаях для точной окончательной обработки применить вместо резания обкатывание роликом, но это может привести к преодолению предела прочности материала и его разрушению.

Для того чтобы не подвергать поверхность восстанавливаемой детали чрезмерной деформации, а также получать требуемый размер без дополнительной потери материала, можно ограничить величину вытесняемого металла прилегающей поверхностью. Форма и размеры этой поверхности должна соответствовать номинальным параметрам восстанавливаемой детали.

Для проверки работоспособности этого метода при восстановлении плоской поверхности была разработана специальная установка моделирующая данный процесс.

Рабочее тело представляло собой идеально пластичный материал, который был помещен в специальный металлический контейнер, открытый только сверху. Контейнер закрывается сверху прозрачной крышкой, имеющей отверстие по диаметру индентора сферической формы вдавливаемого в поверхность рабочего тела (рис.)

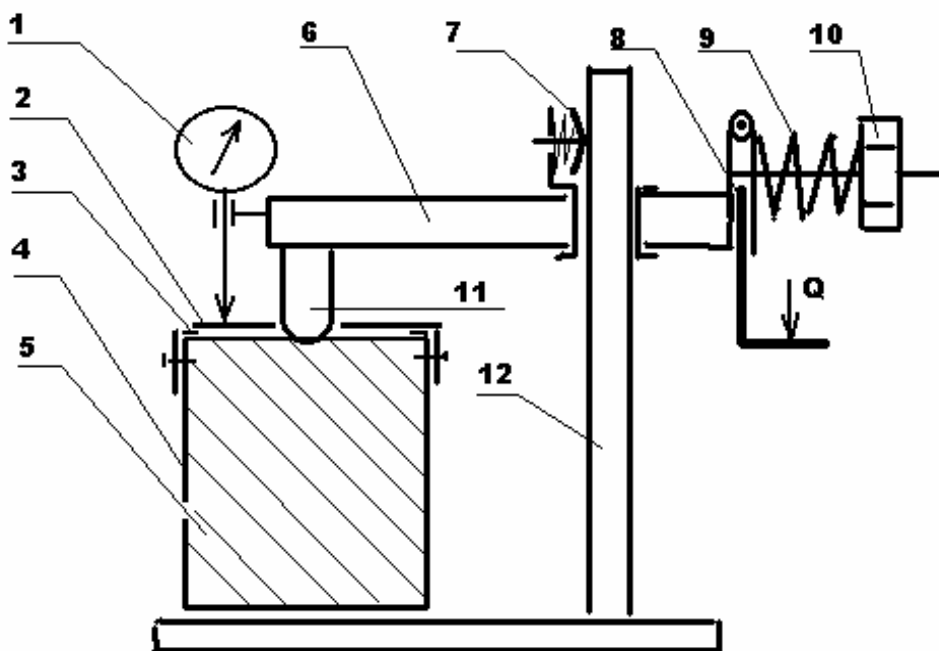


Схема экспериментальной установки

(1 – индикатор, 2 – прозрачная крышка, 3 – регулировочные кольца, 4 – контейнер, 5 – рабочее тело, 6 – подвижный кронштейн, 7 – тормоз, 8 – фрикцион, 9 – пружина, 10 – регулировочная гайка, 11 – индентор сферический диаметром 8 мм, 12 – стойка, Q – точка приложения усилия внедрения S – площадь пятна восстановленной поверхности, Sd – площадь поперечного сечения индентора).

Величина зазора, который требуется компенсировать, выставляется с помощью набора колец (в данном случае зазор 0,5мм). Отношение зазора к диаметру индентора в данном случае $\delta/d=0,06$. Индентор вдавливается ступенчатой нагрузкой, при этом определяется величина заглубления и диаметр площадки, восстановленной до ограничивающей поверхности. Величина заглубления снималась с индикатора, настроенного на ноль в момент касания индентором рабочей поверхности. Диаметр восстановленной площадки определялся по пятну рабочего тела, касающегося прозрачной крышки.

В ходе проведения эксперимента проявился ряд трудностей, связанных с нагружением индентора, и текучестью рабочего тела. Применение пружинного динамометра оказалось нецелесообразным, так как снятие нагрузки после достижения ею определенной величины затруднительно, возникает постоянное движение индентора. Чтобы этого избежать, пришлось применить специальный фрикционный узел, через который передавалось усилие. Величина отсечки усилия регулировалась с помощью гайки и пружины по динамометру. Для предотвращения сползания подвижного кронштейна из-за действия на него силы тяжести в установке предусмотрен специальный тормоз. На каждой ступени нагрузки делалось несколько измерений глубины внедрения и площади восстановленной поверхности, после чего определялось отношение глубины

внедрения к диаметру индентора l/d и отношение восстановленной площади к площади поперечного сечения индентора. S/S_d в зависимости от усилия внедрения Q (в ньютонах). Результаты представлены в табл.

Идеально пластичное тело имеет различные механические свойства при разной температуре, что позволило расширить интервал исследований в зависимости от твердости рабочего тела.

На основе полученных результатов можно проследить некоторые закономерности :

площадь восстановленной поверхности в несколько раз превышает площадь углубления от индентора, даже при относительно небольшом внедрении,

площадь восстановленной поверхности изменяется вместе с глубиной внедрения индентора и зависит от приложения усилия, причём пропорции глубины и площади сохраняются при различной твёрдости рабочего тела.

Результаты исследования

	$t=20^{\circ}\text{C}$		$t=15^{\circ}\text{C}$		$t=10^{\circ}\text{C}$		$t=0^{\circ}\text{C}$		$t=-15^{\circ}\text{C}$	
Q	l/d	S/S_d	l/d	S/S_d	l/d	S/S_d	l/d	S/S_d	l/d	S/S_d
5	0.1	--	0.06	--	0.04	--	0.03	--	0.01	--
10	0.16	--	0.14	--	0.1	--	0.05	--	0.03	--
15	0.24	0.56	0.22	0.32	0.15	--	0.13	--	0.06	--
20	0.31	1.25	0.28	0.9	0.2	0.29	0.16	--	0.1	--
25	0.43	2.06	0.39	1.64	0.3	1.25	0.26	--	0.15	--
30	0.86	10.4	0.73	5.25	0.5	3	0.35	1.4	0.24	--
35	1.25	13.1	0.98	10.4	0.6	3.51	0.44	2.51	0.3	1.2
40	--	--	--	--	--	--	0.65	4.06	0.42	2.2
45	--	--	--	--	--	--	0.93	11.2	0.63	3.9

В целом эксперименты показали, что данный метод восстановления перспективен и после более полных исследований (привязки к реальным материалам и узлам) может быть применен в ремонтном производстве.

Библиографический список

1. Восстановление автомобильных деталей: технология и оборудование. – Канарчук В.Е., Чигринец А.Д., Голяк О.Л., Шоцкий П.М. М.: Транспорт, 1995. 303 с.

2. Степанский Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1979. 211 с.

3. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. – М.: Металлургия, 1972. 408 с.

УДК 539.3

С.И. Кулаков, Е. А. Мотова

Нижегородский филиал института машиноведения РАН

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

Как показали исследования [1], влияние ультразвука на коррозионно-механическое изнашивание, представляющее собой коррозионное разрушение поверхности металла при одновременном наложении механических воздействий (удельной нагрузки и скорости скольжения), складывается из целого ряда факторов. Ультразвуковые колебания в силу своих специфических особенностей могут существенно влиять на скорость диффузионных процессов, а также на структуру пассивирующих слоев, препятствующих разрушению металла. В большинстве работ наблюдалась интенсификация диффузионных процессов в железе под действием ультразвука большой мощности [2]. Характер воздействия ультразвука и причины ускорения диффузии под его влиянием еще не объяснены. Авторы работы [3] связывают влияние ультразвука на структуру пассивирующих слоев с нарушением сплошности пленки вследствие воздействия на поверхность пассивного металла образующихся в растворе кавитационных полостей. В научной литературе мало внимания уделялось экспериментальным разработкам по выяснению воздействия ультразвука на коррозионно-механическое разрушение сталей.

В настоящей работе проводится анализ влияния механической нагрузки и акустической эмиссии на скорость коррозионно-механического разрушения стали в водном растворе серной кислоты. Взаимное влияние различных факторов на микроуровне затрудняет изучение коррозионно-механических процессов. Одним из методов, используемых в трении и износе, является рассмотрение влияния отдельных факторов на скорость суммарного процесса.

В наших экспериментах применялась стальная проволока (сталь У8А). Сначала для снятия поверхностных напряжений и дефектов, возникающих при вытяжке, проволоку отжигали в вакууме (10^{-3} Торр) при температуре 760°C в течение двух часов, затем охлаждали ее до комнатной температуры. Непосредственно перед погружением в реактор проволоку выдерживали в течение 5-10 сек в концентрированной азотной кислоте и промывали дистиллированной водой. В качестве водного электролита использовалась серная кислота химически чистая.

Для изучения кинетики взаимодействия стали с водным раствором серной кислоты использовали омический метод, который заключался в

измерении электрического сопротивления образца проволоки с помощью электронного вольтметра при ее растворении в результате коррозионно-механического разрушения.

Установка для исследования процессов растворения металла (рис.1) состояла из реакционной ячейки специальной конструкции (2), измерительной схемы, обеспечивающей непрерывную регистрацию электросопротивления растворяемого образца, и системы возбуждения ультразвуковых колебаний. Реакционная ячейка представляла собой стеклянный сосуд с тремя отверстиями, в котором поддерживалась задаваемая температура с помощью термостата, и была снабжена электромагнитной мешалкой (1), частота вращения которой определялась посредством электронного тахометра ТЭ-7 и варьировалась в пределах от 900 до 1200 об/мин. Механическое нагружение проволоки регистрировалось при помощи динамометра, присоединенного к одному концу проволоки; другой конец прикреплялся к микрометрическому винту. Водный раствор кислоты, предварительно нагретый до температуры эксперимента, заливали в реактор при включенной мешалке. Измерительная схема состояла из электронного вольтметра В7-34А (9).

Система возбуждения ультразвуковых колебаний частотой 125 кГц включала генератор синусоидальных сигналов RFT 03 005 (11), усилитель мощности LV-103 RFT (12), осциллограф С1-112А (10) и акустический волновод с пьезокерамическим кристаллом (5). Выбор частоты объясняется ее обнаружением в спектре акустических колебаний (100-140 кГц).

Экспериментальные исследования состояли из трех частей: расчета энергии активации по уравнению Аррениуса; анализа влияния механических нагрузок на процесс растворения металлических образцов и анализа влияния ультразвука на скорость коррозии стали.

Для определения энергии активации процесса растворения стали в серной кислоте были проведены эксперименты при различных температурах электролита (50, 60, 70, 80 °С). Зависимость скорости коррозии W от температуры выражается уравнением вида [4]

$$W = A_0 \exp^{(-E/RT)}, \quad (1)$$

W – скорость изучаемого процесса растворения стали, $\text{г} \times \text{см}^{-2} \text{мин}^{-1}$;
 A_0 – предэкспоненциальный множитель зависящий от механических свойств материала; E – энергия активации; T – термодинамическая температура, $^{\circ}\text{К}$;
 R – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж/моль} \times \text{К}$.

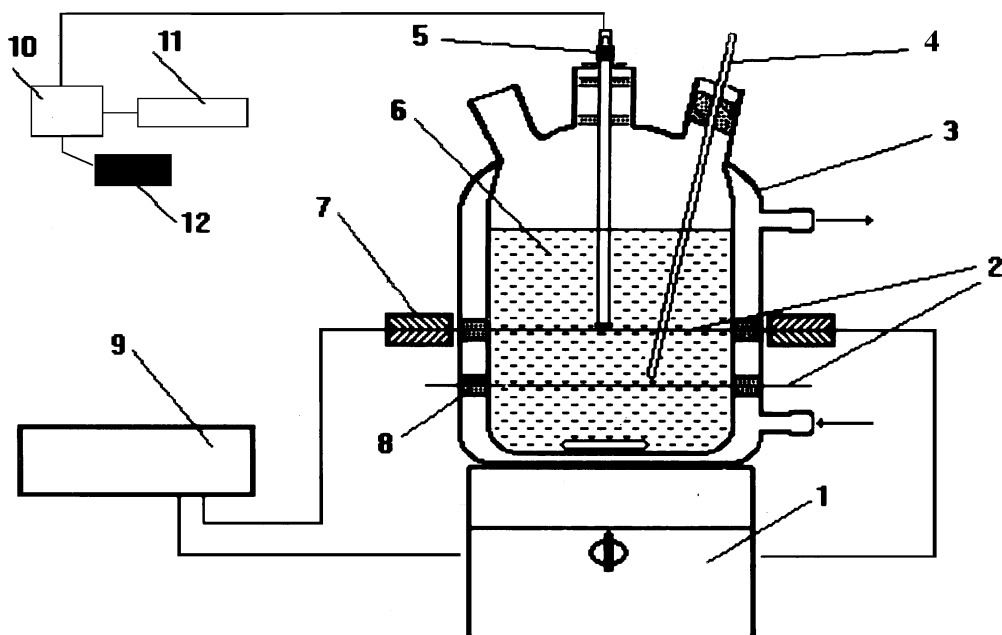


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 - электромагнитная мешалка; 2 - проволоочный образец; 3 - термостатируемая реакционная ячейка; 4 - термометр; 5 - акустический волновод с пьезокерамическим кристаллом; 6 - реакционная среда; 7 - зажим тестера механических испытаний; 8 - пробка из кислотостойкой резины; 9 - вольтметр; 10 - осциллограф; 11 - генератор; 12 - усилитель

Энергия активации определялась из зависимости константы скорости от температуры. Для этого (1) представляли так:

$$\ln W = \ln A_0 - \left(\frac{E_0^\ddagger}{RT} \right). \quad (2)$$

Откладывая на графике (рис.2) экспериментальные значения $\ln W$ по оси ординат и $1/T$ по оси абсцисс, получаем серию точек, лежащих в пределах точности эксперимента на одной прямой. Тангенс угла наклона этой прямой равен (E/R) , деленному на отношение масштабов по оси ординат и оси абсцисс. Следовательно, $E = R \operatorname{tg} \alpha$, умноженному на отношение масштабов по оси ординат и оси абсцисс. Погрешность при расчетах энергии активации составляла $\pm 1,5$ ккал/моль.

Для изучения влияния механической нагрузки на коррозионное поведение металла была проведена серия экспериментов в интервале прикладываемых нагрузок от 70 Н до 100 Н. Предварительные эксперименты в более широком диапазоне механических нагрузок показали, что при наложении нагрузок более до 100 Н происходит пластическая деформация про- волоки, и механохимический эффект монотонно увеличивается.

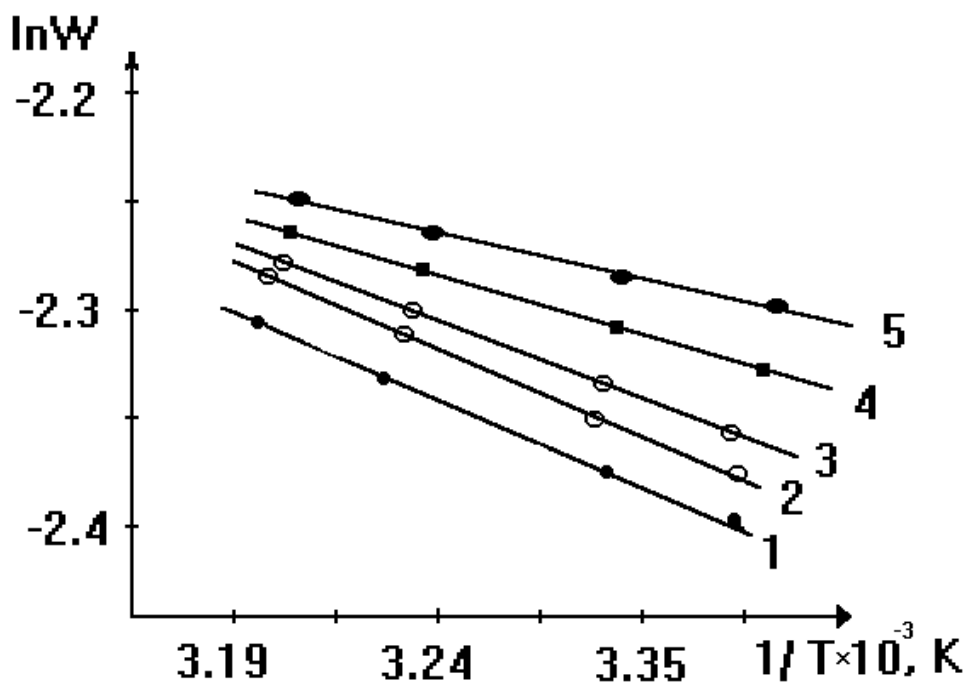


Рис.2. Зависимость скорости коррозии стали в серной кислоте от температуры: 1- без нагрузки; 2 - нагрузка 70Н; 3 - нагрузка 100Н; 4 - без нагрузки плюс ультразвук; 5 - нагрузка 70Н плюс ультразвук

Приложение нагрузок свыше 100 Н приводило к разрыву проволоки. Из данных, представленных в таблице, следует, что при увеличении нагрузки до 100 Н происходит снижение энергии активации на 3,9 ккал/моль, по сравнению с исходной энергией активации (без нагрузки). На основании полученных данных было предложено эмпирическое уравнение для расчета зависимости эффективной энергии активации от приложенной нагрузки:

$$E_{\text{акт}} = E_{\text{акт}}^0 - K_3 P, \quad (3)$$

где $E_{\text{акт}}$ - эффективная энергия активации коррозионно-механического изнашивания; $E_{\text{акт}}^0$ - энергия активации процесса без механического нагружения; P - приложенная нагрузка, МПа; K_3 - эмпирический коэффициент, полученный в результате обработки экспериментальных данных. В наших исследованиях коэффициент составил $K_3=0,995$ в интервале нагрузок (70 - 100 МПа).

С целью изучения влияния ультразвукового воздействия на скорость коррозии на модельной системе проводились эксперименты без механического нагружения на проволоку и при одновременном наложении статической нагрузки величиной 70 Н. Из табличных данных следует, что при отдельном влиянии ультразвука на систему скорость коррозии возрастает, но в меньшей степени, чем под влиянием только механической нагрузки. Одновременное воздействие ультразвука и механической нагрузки приводит к увеличению скорости коррозии и снижению энергии активации до 15,7 ккал/моль.

Энергетические характеристики процесса

Воздействие на образец	Стационарная скорость, г×см ⁻² ×мин ⁻¹				Е _{акт} ккал/моль	Пред- экспо- нента
	Температура эксперимента, °С					
	50	60	70	80		
-	0,444	1,134	2,734	6,008	21	1,2×10 ⁹
70 Н	0,707	1,672	3,247	7,242	17,4	4,4×10 ⁷
100 Н	0,939	2,011	3,469	8,762	16,9	3,7×10 ⁷
Ультразвук	0,629	1,662	2,998	6,795	17,4	4,6×10 ⁷
70Н и ультразвук	1,106	2,457	5,267	10,028	15,7	2,4×10 ⁷

Таким образом, исследование кинетических закономерностей коррозионно-механического поведения модельной системы сталь У8А – серная кислота показали, что наложение механической нагрузки и ультразвука повышает скорость коррозионно-механического разрушения металла, причем при одновременном воздействии нагрузки и ультразвука достигается максимальное увеличение скорости коррозионно-механического разрушения и происходит уменьшение энергии активации процесса. Расчет зависимости эффективной энергии активации процесса от приложенной нагрузки можно проводить по эмпирическому уравнению (3).

Библиографический список

1. Алтухов В.К., Маршаков И.Н. Изучение кинетики электрохимических реакций в ультразвуковом поле // Новые методы исследования коррозии металлов. М.: Наука, 1973. С.183-188.
2. Абрамов О.В. Электрохимические и электрофизические методы обработки // НИИ МАШ, 1969. N5-6. С.77.
3. Кукоз Ф.И., Скалзубов М.Ф. // Труды Новочеркасского политехнического института. Работы кафедры физики. 1959. Т. 73. С.137.
4. Кнорре Д.Г., Крылова Л.Ф., Музыкантов В.С. Физическая химия. М., 1981. 326 с.

УДК 621.891

В.В.Измайлов, С.В.Карцова, М.В.Новоселова
Тверской государственный технический университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПАВсодержащих СРЕД, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ТВЕРДОФАЗНОЙ ФЕРМЕНТАЦИИ

Биотехнологические методы получения различных соединений все шире используются в современном производстве. Это связано прежде всего с требованиями

снижения энергозатрат, а также с дешевой сырьем. Кроме того, производственное культивирование может сочетаться и с утилизацией различных отходов как бытового, так и промышленного происхождения. Биотехнологические методы получения продуктов целевого назначения являются прежде всего энергосберегающими, использующими в качестве исходного сырья субстраты природного происхождения, как правило, являющиеся отходами пищевой и сельскохозяйственной промышленности. Кроме того, биотехнология оказывает существенное влияние на решение экологических проблем в ликвидации последствий загрязнения окружающей среды.

Методика получения экстрактов, содержащих ПАВ

Получение субстратов, содержащих ПАВ, осуществлялось методом твердофазной ферментации (ТФФ) с использованием торфа и отходов сельскохозяйственного производства (навоза).

Торф и свежий бесподстилочный навоз КРС измельчали в мельнице, смешивали в отношении 1:1 и помещали в биореактор для осуществления ферментации.

Длительность процесса ферментации составляла в общей сложности 10 дней. Из них трое суток процесс проводили в так называемом мезофильном режиме (при 37 - 40 °С) и трое суток – при термофильном (57 - 60 °С). После этого пробы находились в помещении при комнатной температуре (20 °С) в течение 4 дней.

Процесс ферментации проводили одновременно с двумя образцами (N3 и N4). Во время ферментации в пробе N4 один раз в сутки осуществлялась аэрация путем перемешивания в течение 15 минут. При приготовлении пробы N3 аэрация не проводилась, а соответственно отсутствовало и перемешивание. Такие различия в режиме ферментации, возможно, могут способствовать выявлению оптимальных условий ферментации с целью повышения выхода ПАВ. Есть предположение, что ПАВ образуются в анаэробной фазе. Возможно также, что прекурсорами ПАВ являются актиномицеты и грибы, нормальная жизнедеятельность которых нарушается при механическом перемешивании.

Для выявления поверхностной активности были приготовлены экстракты из двух образцов БАД (N3 – образец готовился без аэрации, N4 – с аэрацией), а также экстракты из исходных компонентов БАД, не подвергавшихся ферментации, – навоза (N5) и торфа (N6).

30 граммов навески соответствующего субстрата гомогенизировали в 30 мл 96% этанола и количественно переносили в колбочки с притертыми крышками, в которых осуществлялась экстракция. Для этого в течение 45 минут при комнатной температуре (20 °С) содержимое колб перемешивалось с помощью шейкера. После этого для удаления осадка пробы подвергали центрифугированию в течение 5 минут при 3000 об/мин. Затем надосадочную жидкость, содержащую ПАВ, переносили в бюксы с притертыми пробками. Описание образцов опытных жидких сред приведены в таблице 1.

Таблица 1. Опытные образцы ПАВсодержащих жидких сред

№ образца	Экстрагент	Условия ферментации
1	Этиловый спирт	-
2	Дистиллированная вода	-
3	Этиловый спирт	С аэрацией
4	То же	Без аэрации
5	- " -	Исх. компонент (навоз)
6	- " -	Исх. компонент (торф)

Результаты экспериментов и их обсуждение

Предварительные эксперименты по определению фрикционных и электрических характеристик скользящих электрических контактных соединений с опытными образцами ПАВсодержащих промежуточных сред были проведены с образцами №1 и 2. В данных экспериментах помимо определения влияния ПАВ на электрофрикционные характеристики контакта определяли оптимальный экстрагент. Летучие экстрагенты были исключены ввиду их быстрой испаряемости, которая не давала возможности провести длительные испытания. Дистиллированная вода, как экстрагент, показала несколько худшие свойства по сравнению с этиловым спиртом (более высокие значения коэффициента трения и его нестабильности). Учитывая коррозионную активность воды по отношению к контакт-деталям, выбор был сделан в пользу этилового спирта как экстрагента для последующих образцов промежуточных ПАВсодержащих сред (образцы жидких сред № 3 – 6 в таблице 1).

В таблице 2 представлены основные эксплуатационные характеристики скользящих контактов с исследованными ПАВсодержащими промежуточными средами. Эти характеристики следующие: среднее значение коэффициента трения $f_{\text{ср}}$, относительная нестабильность коэффициента трения $\Delta f/f_{\text{ср}}$, среднее значение переходного сопротивления $R_{\text{ср}}$, МОм, относительная нестабильность переходного сопротивления $\Delta R/R_{\text{ср}}$, %.

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы. Среднее значение коэффициента трения в основном лежит в диапазоне $0,1 \div 0,2$. Такие значения типичны для режима трения при граничной смазке, что свидетельствует о наличии на поверхности трения активных молекул, предположительно жирных кислот. В пользу этого предположения свидетельствует величина переходного сопротивления контакта. Типичные значения переходного сопротивления составляют единицы или десятки МОм. Такие значения характерны для контактов с достаточно толстыми поверхностными пленками (слой активных молекул), тогда как для металлического контакта значения переходного сопротивления обычно составляют единицы или десятки микроом. Следует отметить, что в контактах с исследуемой жидкой средой №2 (водная вытяжка) наблюдаются самые низкие

значения переходного сопротивления. Это свидетельствует о том, что поверхности трения в этом случае не защищены достаточно надежно слоем поверхностно – активных молекул, в процессе трения возможно образование металлических пятен контакта. Таким образом, данная жидкость не обеспечивает требуемых электрофрикционных характеристик контакта.

У контактов с исследованными ПАВсодержащими средами №3 – 6 эксплуатационные характеристики сравнимы с характеристиками контактов, в которых используются промышленные смазочные материалы [1]. Таким образом, результаты экспериментов свидетельствуют о возможности применения биотехнологических методов получения ПАВсодержащих сред из отходов сельскохозяйственного производства и продуктов переработки торфа. В ходе дальнейших работ целесообразно исследовать влияние различных режимов экстракции на выход ПАВ из субстрата, в частности, провести исследования ультразвуковой экстракции.

В качестве экстрагентов намечается исследование возможности применения органических масел и аминоспиртов. В сочетании с ПАВ данные смазочные и протекторные среды должны обеспечить высокие электрофрикционные характеристики скользящих контактов.

Таблица 2. Электрофрикционные характеристики контактов с опытными образцами ПАВсодержащих сред

№ образца	Электрофрикционные характеристики			
	Коэффициент трения, f	Нестабильность коэффициента трения, $\Delta f/f$, %	Контактное электросопротивление, мОм	Нестабильность контактного электросопротивления, $\Delta R/R$, %
1	0,24	60	6,2	45
2	0,29	86	2,8	23
3	0,21	52	5,3	26
4	0,22	54	155	14
5	0,17	46	65	20
6	0,18	62	15	60

Библиографический список

1. Разработка экологически безопасных материалов, смазочных, технологических и протекторных сред электротехнического назначения на основе биоремедиационных технологий: Отчет по НИР – Тверь: ТГТУ. 2000.

ИЗНАШИВАНИЕ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ПРИВОДА ФРЕЗЕРУЮЩИХ ТОРФЯНЫХ МАШИН

В современных конструкциях фрезеров наметилась тенденция к использованию двух – и трехпоточных приводов, каждый из которых передает нагрузку только на две соединенные с редуктором секции фрез. Это позволяет обеспечить более равномерную нагрузку элементов привода и повысить надежность и долговечность зубчатых передач. Многопоточный привод предполагает увеличение расхода трансмиссионного масла, научно обоснованная замена которого после выработки срока службы является существенным резервом экономии дефицитных нефтепродуктов.

В процессе работы фрезеров в сильно запыленных условиях происходит накопление в трансмиссионном масле торфяных частиц, образующих органические и минеральные примеси, а также продуктов износа зубчатых передач. Органические примеси ускоряют процесс окисления масла, снижая несущую способность масляной пленки, а минеральные примеси вместе с продуктами износа интенсифицируют процесс разрушения рабочих поверхностей зубьев. Сложность рассматриваемого явления очевидна. Поэтому экспериментальные исследования влияния степени загрязнения трансмиссионного масла на долговечность зубчатых передач торфяных машин имеют важное практическое значение.

Для проведения указанных исследований был создан лабораторный стенд, работа которого основана на методе нагружения по принципу замкнутого силового контура. Замкнутый контур представляет собой четыре цилиндрических редуктора фрезера МТФ-14А, соединенных попарно втулочно-пальцевой и фланцевой муфтами, а образованные пары – карданными валами. Фланцевая муфта используется также в качестве нагружающего устройства.

Нагружая зубчатые передачи с максимальным длительно действующим моментом 303 Нм и ведя испытания непрерывно, срок службы редуктора можно выработать за 1600 часов, в течение которых зубчатая передача получит ту же степень усталости, что и за 5000 час, при действии постоянной расчетной нагрузки в 182 Нм. Таким образом, при ежедневной двадцатичасовой работе стенда достаточно трехмесячного срока для проверки расчетной долговечности привода. Величина крутящего момента в контуре стенда устанавливается в начале и контролируется в конце каждой смены. Если величина крутящего момента уменьшается более чем на 5-10 %, то производится дозакрутка торсионных валов с помощью фланцевой муфты.

Асинхронный электродвигатель переменного тока 4А13254 мощностью $P_d = 7,5$ кВт при $n_d = 1455$ об/мин, через трехручьевую клиноременную передачу и вариатор приводит во вращение зубчатые колеса замкнутого

контура. Установка рабочей частоты вращения карданных валов ($n_k = 793$ об/мин) производится с помощью вариатора. Контроль скорости вращения осуществляется тахометром в начале и конце каждой смены.

Контроль мощности, потребляемой приводом стенда, позволяет оценить состояние его деталей. По повышенному расходу мощности можно судить о неисправностях в замкнутом контуре. Замеры мощности производятся с помощью измерительного комплекта К 50 в начале и конце каждой смены.

Для смазки зубчатых передач в каждый редуктор заливается 1,3 литра трансмиссионного масла для промышленного оборудования (ТУ 38101529-75), представляющего собой неочищенный остаток прямой перегонки нефти, содержащий значительное количество смол, асфальтенов и других продуктов, склонных к глубокому окислению при повышенных температурах [1]. В связи с этим требуется постоянный контроль температуры масла в каждом редукторе. Для замера температуры установлены термодатчики, с помощью которых по прибору фиксируется температура масла в начале и конце каждой смены.

Для оценки влияния степени загрязнения трансмиссионного масла на долговечность зубчатых передач в каждый из трех редукторов кроме контрольного, соответственно добавляется к объему масла 1,3 и 5 % торфяной пыли с диаметром частиц до 1 мм, взятой с металлоконструкции работающего фрезера. Измерение величины износа зубьев позволяет оценить состояние зубчатых передач, так как срок их службы ограничивается либо абразивным износом, либо усталостным выкрашиванием рабочих поверхностей зубьев. Износ определяется как разность хордальных толщин зубьев, измеряемых штангензубомером до и после испытания. Измерение хордальных толщин зубьев и площади усталостного выкрашивания их рабочих поверхностей производится через каждые 240 часов работы стенда. В это же время оцениваются качество трансмиссионного масла по ТУ 38101529-75 и возможность его дальнейшего использования.

Исследования И.В.Крагельского и Т.Я. Ямпольского по абразивному износу зубчатых передач показали, что величина износа двух зубьев в шестерне может отличаться в два раза и более. Это подтверждает возможность использования результатов износа рабочих поверхностей зубьев зубчатых колес всех испытываемых редукторов.

Как показали стендовые испытания, износ профилей зубьев по высоте в среде трансмиссионного масла с различной концентрацией в нем торфяной пыли имеет классический характер, заключающийся в увеличении количества изношенного материала от полюсной линии к периферии зуба, т.е. к месту повышенного скольжения. Причем наибольший износ наблюдается на ножках зубьев и реже – на головках. Максимальная температура поверхности контакта в нижней точке активного профиля зуба у его ножки приводит к резкому понижению вязкости масла и уменьшению толщины масляной пленки.

Зависимости наибольших средних износов на ножках зубьев от суммарного количества циклов их нагружения для нижней шестерни ($z=18$), соединяемой с фрезами, и верхней шестерни ($z=20$), соединяемой с карданным

валом, близки к линейным, но с точками перелома при числе циклов нагружения нижней шестерни $N=9,43 \times 10^6$ и верхней $N=8,48 \times 10^6$ для всех рассматриваемых концентраций торфяной пыли в масле. Снижение интенсивности износа после точки перелома можно объяснить резким повышением вязкости масла при его длительном старении, которая способствует увеличению толщины масляной пленки в контакте и расширению зоны жидкостного трения.

Как показали исследования, торфяная пыль в трансмиссионном масле снижает интенсивность изнашивания рабочих поверхностей зубьев. Причем чем выше концентрация торфяной пыли в масле, тем меньше износ. Процентное соотношение износов зубьев нижней и верхней шестерен при одинаковом по контактной выносливости числе циклов нагружения рабочих поверхностей зубьев и различной концентрации торфяной пыли в масле редукторов, а также процентное соотношение износов на одних и тех же шестернях для вышеуказанной долговечности приведены в таблице.

Объемная концентрация торфяной пыли в масле, %	Процентное соотношение износов зубьев		
	$\frac{h_{20} - h_{18}}{h_{20}} \times 100\%$	$\frac{h_o - h_i}{h_o} \times 100\%$	
		$z = 18$	$z = 20$
0	25,67	-	-
1,0	20,00	5,45	12,60
3,0	12,15	10,91	24,32
5,0	1,12	18,18	39,86

В таблице h_{18} – износ на зубьях нижней шестерни; h_{20} – износ на зубьях верхней шестерни; h_o – износ зубьев на чистом трансмиссионном масле; h_i – износ зубьев при соответствующей концентрации торфяной пыли в масле.

Анализируя данные таблицы, можно отметить, что при отсутствии торфяной пыли в трансмиссионном масле наибольший износ наблюдается на рабочих поверхностях зубьев верхней шестерни, который превышает износ зубьев нижней шестерни на 25,67%. С увеличением концентрации торфяной пыли это соотношение уменьшается, и при 5-процентной концентрации износ зубьев рассматриваемых шестерен почти выравнивается. Указанное явление можно объяснить тем, что нижние шестерни полностью погружены в масло и между контактируемыми зубьями образуется такой слой масла, при котором обеспечивается наименее возможный износ. Что касается верхней шестерни, то масляный слой в зацеплении будет тоньше из-за скудного поступления масла в зону контакта, осуществляемого зубьями промежуточного колеса, окунаемого в

масло, и масляного тумана, образуемого при разбрызгивании масла в картере. С увеличением концентрации торфяной пыли в трансмиссионном масле вязкость его возрастает, подача в зону контакта увеличивается, а следовательно, увеличивается и толщина масляного слоя между зубьями, что способствует снижению износа зубьев верхней шестерни.

Следует подчеркнуть, что наличие торфяной пыли в трансмиссионном масле может снизить износ. Так, при 5-процентной ее концентрации в масле износ зубьев верхней шестерни снижается на 39, 86 % при суммарном количестве циклов нагружения $N = 13,047 \times 10^6$ по сравнению с ее работой на чистом масле.

Агрессивное влияние на износ зубьев минеральных абразивных частиц, длительное время находившихся в торфе, не зафиксировано. По-видимому, это обстоятельство связано с недостаточной их прочностью, полученной в лабораторных исследованиях, и возможной изоляцией от трущихся поверхностей органическими компонентами торфяной пыли.

Результаты испытаний позволяют:

1. Определить долговечность зубчатых передач при различной степени загрязнения трансмиссионного масла.
2. Выявить влияние торфяной пыли и температуры на старение трансмиссионного масла.
3. Установить экспериментально обоснованную периодичность замены трансмиссионного масла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Товарные нефтепродукты, свойства и применение: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. В.М. Школьников. М.: Химия, 1973. С. 139-143.
2. Морозихина И.К. Стенд для испытания на долговечность цилиндрических зубчатых передач торфяных машин // XI научно-техническая конференция НТО Машпрома: Тез. докл. Калинин, 1987. С. 58-60.
3. Морозихина И.К. Исследование загруженности зубчатых передач привода фрезера МТФ-14 в производственных условиях // XIV научно-техническая конференция. Калинин, 1990.
4. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин: Уч. пособие для маш. спец. вузов. М.: Высшая шк., 1991. С.319.
5. Алгоритм оптимизации конструкции зубчатых передач с учетом температуры активной поверхности зубьев. Детали машин: Экспресс информация. 1987. № 13. С. 1-4.
6. Морозихина И.К. Исследование прочности абразивных частиц торфяной залежи с целью оценки их влияния на износ деталей машин // Совершенствование процессов добычи и переработки торфа: Сб. науч. трудов ВНИИТП. Л.: ВНИИТП, 1986. Вып. 57. С. 21-24.

А.Н. Болотов, Д.А. Зоренко
Тверской государственный технический университет

УЛУЧШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНА МЕТОДОМ НАНЕСЕНИЯ ОКСИДНОГО ПОКРЫТИЯ В АНОДНО-ИСКРОВОМ РЕЖИМЕ

Синтез пленок с заданными свойствами на металлах анодированием или плазменным осаждением имеет большое практическое значение. Однако указанные и другие традиционные методы формирования пленок на вентильных металлах не удовлетворяют всему многообразию требований современной техники: износостойкость, твердость, адгезия с металлом-подложкой, дешевизна и простота получения. В связи с этим возникает необходимость развития новых или малоизученных методик управляемого синтеза неорганических пленок на металлах.

Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов в электролитах является одним из таких методов. Особенность его в том, что в одном процессе на металлическом аноде синтезируется материал, компонентами которого являются составляющие металла и электролита, и производится обработка образующейся пленки электрическими разрядами [1-3].

В Тверском государственном техническом университете на кафедре физики проведены эксперименты по получению оксидного покрытия на поверхности титана (Ti). Для этого была использована установка, состоящая из ванны, являющейся катодом и имеющей водяное охлаждение. Ванна наполнялась электролитом, и в электролит погружалась деталь, являющаяся анодом.

В работе было исследовано четыре принципиально разных электролита на основе: 1) жидкого стекла и щелочи; 2) буры; 3) ортофосфорной кислоты; 4) ортофосфорной и серной кислот (табл.)

Результаты экспериментов

Номер электролита	$U_{\text{кон}}, \text{В}$	Микротвердость покрытия*, ГПа	Толщина покрытия, мкм Погрешность, $\pm 0,5 \text{ мкм}$
1	490	2,8	4
2	290	3,5	4
3	320	3,8	7
4	350	5,3	11

*Для сравнения: микротвердость сплава титана равна 2,4 ГПа.

Процесс образования покрытия на четвертом электролите характеризуется хорошей воспроизводимостью и высокой скоростью: процесс продолжается 5 ... 10 мин. Для данного покрытия были проведены триботехнические испытания. Испытания проводились на машине трения МТШ-М без смазочного материала. Схема трения шар – плоскость. Материал шаров – сталь ШХ15. Материал плоского образца – титан с оксидным покрытием. Давление в контакте шар-плоскость – 766 МПа. Для снижения температурного воздействия была принята линейная скорость скольжения, равная 0,52 м/с. Эксперименты проводились при комнатной температуре. Полный износ покрытия контролировался по скачкообразному изменению коэффициента трения, что позволило определить интенсивность линейного износа. В результате испытаний были получены следующие триботехнические характеристики данного покрытия:

коэффициент трения скольжения 0,06 ... 0,1;

интенсивность линейного износа $2 \times 10^{-9} \pm 15\%$.

Данное покрытие имеет ряд достоинств:

неплохо удерживает смазочный материал, так как имеет открытую и закрытую пористость;

в отличие от чистого титана не схватывается с лезвийным инструментом; отличается быстротой, простотой и дешевизной получения.

Исходя из перечисленных выше достоинств можно предложить следующие области применения:

для процессов статического трения в целях предотвращения схватывания; в процессах трения со смазкой;

в узлах, подверженных трению скольжения при невысоких контактных давлениях.

Проделанная работа подтверждает технико-экономическую целесообразность использования данного покрытия в узлах машин, требующих повышения твердости и износостойкости сопряженных, трущихся поверхностей деталей из титана в сочетании с повышенными требованиями к коррозионной стойкости и массе узла.

Библиографический список

1. Баковец В.В., Поляков О.В., Долговесова И.П. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов. Новосибирск: Наука, 1991. 152 с.
2. Демкин Н.Б. Физические основы трения и износа машин. Калинин, 1981. 115 с.
3. А. с. 2008369 СССР, МКИ С25D 11/ 02. Электролит для искрового анодирования / А.И. Мамаев (СССР). – 3 с.

РАСЧЕТ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УЗЛА ТРЕНИЯ ТИПА ВАЛ – ВТУЛКА С НИЗКОМОДУЛЬНЫМ ПОКРЫТИЕМ

В работах [1, 2, 3, 4, 5] показано, что для прогнозирования оптимальных режимов работы узла трения необходимо определить условия, в которых реализуется преимущественно упругий контакт. Задача о несущей способности узлов трения с низкомодульными покрытиями применительно к плоской модели шероховатой поверхности рассмотрена нами в работах [4, 5]. В качестве критерия, определяющего переход от преимущественно упругого контакта к пластическому, там принято номинальное давление, при котором упругая составляющая внедрения средней микронеровности равна его пластической составляющей [5]. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили справедливость полученных соотношений.

В подшипнике скольжения с низкомодульным покрытием типа вал – втулка будут иметь место те же механизмы контактного взаимодействия поверхностей при усталостном износе, что и в случае номинально плоского контакта. Отличие состоит в особенностях напряженно – деформированного состояния сопряжения вал с покрытием - шероховатая втулка.

На рисунке 1 приведена расчетная схема подшипника скольжения с покрытием. Примем материал втулки абсолютно жестким, а вал с нанесенным на него низкомодульным покрытием – упругопластическим.

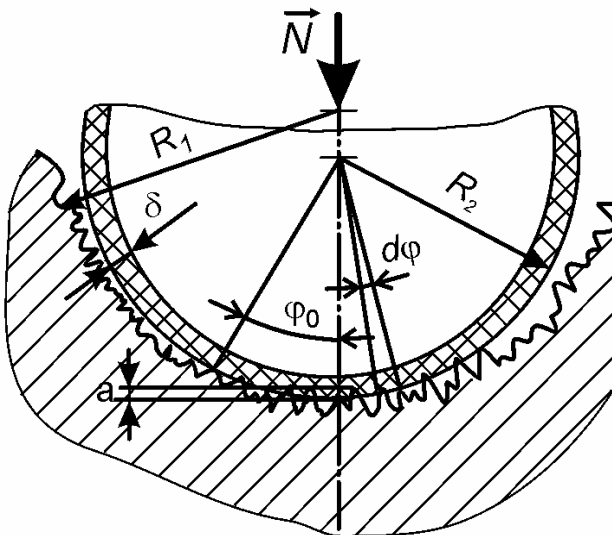


Рис. 1. Схема подшипника скольжения с ТСП

Из геометрических соображений можно получить:

$$a_\varphi = \Delta_r \cdot \left(\frac{1}{\cos \varphi_0} - \frac{1}{\cos \varphi} \right), \quad (1)$$

где $\varphi_0 = \arccos \left(\frac{\Delta_r}{\Delta_r + a} \right)$ – половина угла контакта; a_φ – радиальное внедрение вала в шероховатую втулку; a – максимальное внедрение вала в шероховатую втулку; Δ_r – радиальный зазор в сопряжении; φ – текущее значение угла, определяющего точку, в которой рассматривается контактное взаимодействие.

Условие равновесия для принятой модели можно записать в виде

$$N = 2 \int_0^{\varphi_0} q_y \cos \varphi L R_2 d\varphi; \quad (2)$$

где N – нагрузка на вал; q_y – радиальное давление, определяемое величиной внедрения a_y на данном участке; L – длина контакта; R_2 – радиус вала. Для принятой расчетной схемы радиальное давление q_y совпадает с нормальным давлением, рассчитанным для контакта шероховатой поверхности с гладким двухслойным полупространством при использовании расчетной схемы Демкина Н.Б. [6].

Моделируя реальную шероховатость шаровыми сегментами одинакового радиуса R , равного среднему приведенному радиусу микронеровностей, для нагрузки на вал получим:

$$N = L R_2 \frac{t_m \nu (\nu - 1)}{I_1} \left(\frac{R p}{R} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\Delta_r}{R p} \right)^{\nu+0,5} \cdot \int_0^{\varphi_0} \left(\frac{1}{\cos \varphi_0} - \frac{1}{\cos \varphi} \right)^{\nu+0,5} \times \\ \times \int_0^1 (1-t)^{1,5} t^{\nu-2} \frac{\Psi_N dt}{(1+\beta) I_1^\eta} \cos \varphi d\varphi. \quad (3)$$

Здесь R_p , ν , t_m – параметры шероховатости контактирующих поверхностей, β – коэффициент формы эпюры давления, I_1 – модуль упругости материала покрытия и I_1^η – приведенный модуль упругости материала покрытия, Ψ_N – функция пластичности [7].

В первом приближении для подшипника скольжения можно считать, что переход от упругого контакта к упругопластическому произойдет после того, как среднее контурное давление на контакте $q_{cp} = N/2R_2L\varphi_0$ достигнет величины критического номинального давления $q_{акр}$. Приравнявая их, получим выражение для критической нагрузки:

$$N_{кр} = 2R_2\varphi_{0кр}L \frac{\nu(\nu-1)t_m K_3}{5,657\pi} \left(\frac{R p}{R} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\delta^2 \nu}{R R p} \right)^{\nu+0,5} \cdot \frac{\xi_{кри}^{-2\nu-1} (1+\alpha_{кри})^{0,5} N_{кри}}{2^\nu \alpha_{кри}^{0,5+\nu} a_{кри} \rho_{кри}}; \quad (4)$$

где $K_3 = \Gamma(2,5)\Gamma(\nu+1)/\Gamma(\nu+1,5)$; Γ – гамма функция; $\xi_{кри}$, $\rho_{кри}$, $N_{кри}$, $\alpha_{кри}$ – усредненные характеристики упругого взаимодействия единичной микронеровности радиуса R и двухслойного полупространства при давлении на контакте, равном $q_{кр}$; δ – толщина покрытия.

Уравнение для $\varphi_{0кр}$ – критического угла контакта, при котором среднее давление на контакте превосходит предел $q_{кр}$, получим заменяя в соотношении (3) N соотношением (4):

$$\frac{1}{\varphi_{0кр}} \cdot \int_0^{\varphi_{0кр}} \left(\frac{1}{\cos \varphi_{0кр}} - \frac{1}{\cos \varphi} \right)^{\nu+0,5} \cos \varphi d\varphi = 0,71 \left(\frac{\delta^2 \nu}{R \Delta_r} \right)^{\nu+0,5} \times \frac{\xi_{кри}^{-2\nu-1}}{2^\nu \alpha_{кри}^{0,5+\nu} \nu (\nu-1)}, \quad (5)$$

Рассчитать $N_{кр}$ в динамическом режиме работы трибосопряжения позволяет замена констант физико-механических свойств материалов покрытия

на соответствующие операторы, являющиеся функциями температуры и времени [4].

Результаты экспериментальных исследований влияния нагрузки на интенсивность изнашивания материалов ВНИИНП-212, ВНИИНП-230, ЭОНИТ-3 для схемы вал – втулка представлены на рисунке 2. При увеличении нагрузки на сопряжение до значения, рассчитываемого по формуле (4), происходило резкое увеличение интенсивности изнашивания.

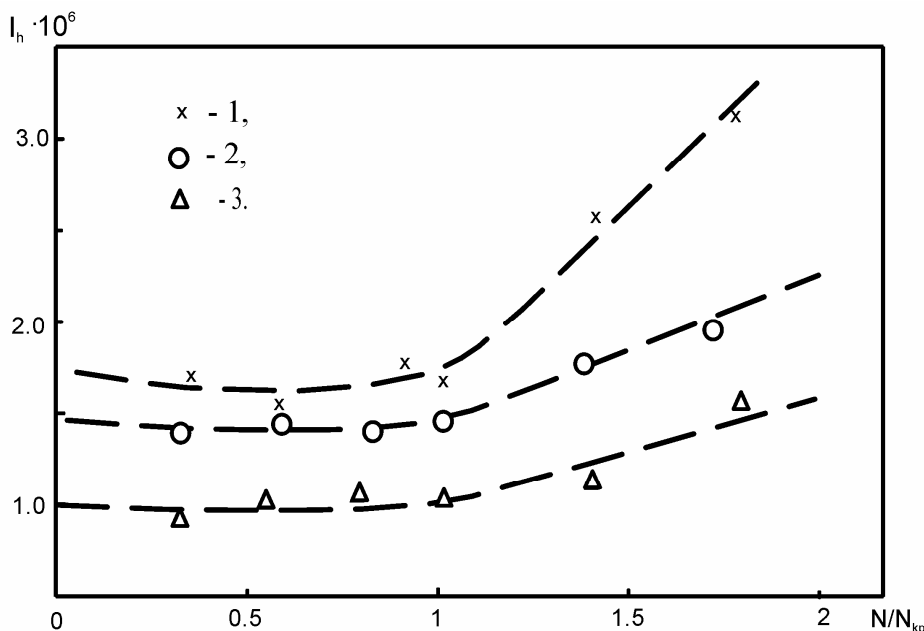


Рис.2. Зависимость интенсивности изнашивания в соединении вал – втулка от нормальной силы: 1 – материал покрытия ВНИИНП – 230; 2 – ВНИИНП – 212, 3 – ЭОНИТ – 3

Уравнения (4) и (5) позволяют рассчитать критическую нагрузку на подшипник для данных материалов покрытия и вала, параметров микрогеометрии обоймы, толщины покрытия, геометрических размеров подшипника и определить наиболее оптимальные режимы эксплуатации узлов трения.

Библиографический список

1. Булычев С.И., Алехин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
2. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 510 с.
3. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
4. Демкин Н.Б., Алексеев В.М., Туманова О.О. К разработке САПР узлов трения с покрытиями // Механика и физика фрикционного контакта: Межвузовский сборник научных трудов. Тверь, 1994. С.21-26.
5. Новикова О.О. Несущая способность узлов трения с низкомодульными покрытиями // Сборник научных трудов молодых ученых ТГТУ. Тверь: ТГТУ 1998. С. 113-115.

6. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.

7. Алексеев В.М., Туманова О.О., Алексеева А.В. Характеристики контакта единичной неровности в условиях упругопластической деформации // Трение и износ. 1995. Т16. №6.С.1070-1079.

УДК 620.179.112

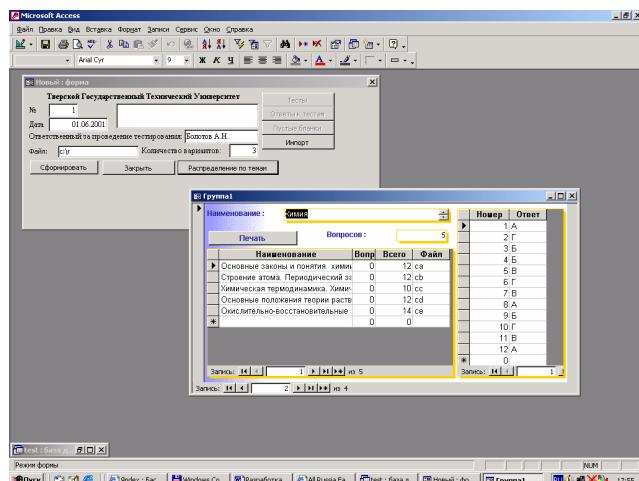
А.Н. Болотов, С.В. Удалов
Тверской государственный технический университет

РАЗРАБОТКА ТЕСТИРУЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕСТОВЫХ РАБОТ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ВУЗОВ ПО КУРСУ ТРИБОЛОГИЯ

Применение современных информационных технологий в учебном процессе стало обычным для большинства образовательных учреждений нашей страны: школ, вузов и т.д.

Контролирующие программы позволяют проводить текущий и итоговый контроль знаний и умений, приобретённых учащимися в процессе обучения. В основном это тестирующие программы с выбором ответа. Эти программы позволяют оперативно оценить и проанализировать знания больших групп учащихся. Некоторые программы ведут статистическую обработку ответов учащихся, что позволяет учителю понять, какие разделы курса требуют более тщательной проработки или повторения.

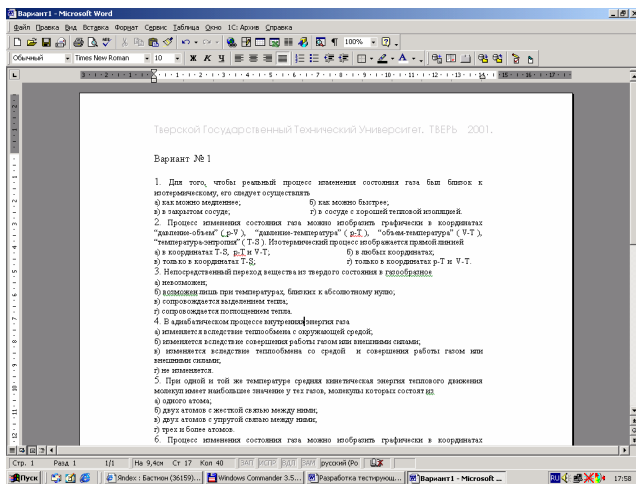
Для проведения тестирований и контроля знаний студентов на кафедре физики ТГТУ был создан пакет программ «АВТОТЕСТ». Пакет имеет ряд преимуществ перед аналогичными программными средствами.



На данном рисунке пользователь настраивает БД для проведения тестирования.

Из рисунка видно, что связующая программа разработана на Microsoft Access.

Использование данного программного средства позволяет оптимально хранить необходимую информацию.



Данный рисунок показывает результаты работы программы.

Сформирован текстовый WORD документ для варианта №1.

Применение VBA для создания систем автоматизированного тестирования

Разработка программы для автоматизации проведения контрольных работ, тестирований и других зачетных работ в вузах и школах - это достаточно нетривиальная задача. В данной области существует достаточно разнообразное программное обеспечения. Они отличаются по функциональным возможностям, но все имеют ряд следующих проблем:

- некоторые из них рассчитаны на определенные заложенные программистом варианты тестов, поэтому такие программные продукты не являются универсальными и имеют узкую возможность применения;
- технические требования к ПО совершенно разные: от 386 машин до компьютеров на базе РИП. Поэтому применение то или иного ПО ограничено техническими возможностями оборудования.

- Большая часть ПО данного класса создавалась под конкретные задачи и условия проведения тех или иных проверочных работ, т.е. можно выделить следующие виды программ:

- подготовки тестов на бумажных носителях
- программы тестирования через сеть Internet
- для использования в компьютерных классах (локальные версия)
- для использования в компьютерных классах (сетевая версия)

Многие программы из данного ПО имеют конструкторы для внесения изменений в исходные тексты тестов, но процесс внесения изменений в большинстве случаев построен неудобно.

Решение данных проблем стало возможным с применением офисного программирования. Применение Microsoft Word и Microsoft Access из пакета Microsoft Office позволяет решить следующие проблемы:

- Алгоритмы программы не меняются вне зависимости от того, нужна локальная или сетевая версия, будет использоваться Internet или бумажные носители. Эти возможности реализуются благодаря тому, что результатом работы программы создания тестов является Word документ с управляющим макросом на VBA. Таким образом, его можно распечатать, отправить по электронной почте, подвязать к сайту того или иного образовательного

учреждения, организовать работу в локальной сети, работать на домашнем или локальном компьютере.

- Проблемы с различным обеспечением техникой тех или иных образовательных учреждений программы позволяет решать за счет возможности сохранения результатов в любой формат : DOS, WINDOWS, WORD 2000, RTF, HTML.

- Отпадает проблема наличия конструктора, т.к. программа в качестве исходной информации использует те же WORD файлы. То есть. для создания тестовых задания преподавателю не нужно разбираться в правилах работы с конструктором тестов, а необходимо просто уметь работать в WORDe.

- Программа абсолютно универсальна т.к. написана с применением объектно-ориентированного VBA.

Возникает вопрос, зачем использовать VBA, когда это интерпретатор, можно взять любой язык программирования и, зная формат записи WORD файла, сделать практически то же самое. Ответ на этот вопрос заключается в том, что данная программа дает наибольшую универсальность, чем любая программа, написанная на обычных языках программирования.

Программа позволяет дополнительно конфигурировать себя конечному пользователю при условии, что он знаком с основами VBA, и подстроить систему в соответствии со своими требованиями.

Дальнейшее развитие тестирующих систем

Кроме проблемы создания хорошей платформы для тестирующей программы существует и другая проблема – оценка результатов тестирования.

Сейчас программное обеспечение в этой области работает по следующему принципу оценки результатов: высчитывается количество правильных ответов, и в зависимости от количества правильных ответов ставится оценка. Например, 75% и выше – 5; 50% и выше – 4;

25% и выше – 3. Некоторые программные продукты позволяют также изменять сложность вопросов и учитывать различные коэффициенты при постановке оценки.

Для принятия решений в оценке результатов и формировании результатов необходим подход в области создания искусственного интеллекта, управляющего данным процессом. Такой подход необходим из-за нетривиальности поставленной перед компьютером задачи.

Почему нельзя просто ввести определенные усложненные критерии оценки и таким образом решить проблему недостаточно объективной оценки результатов работы студентов. Ответом на этот вопрос являются два различных подхода к созданию систем искусственного интеллекта. Первый из них заключается в математическом моделировании результатов интеллектуальной деятельности человека, второй – в моделировании самого мыслительного процесса. Оба метода имеют свои недостатки и преимущества. Так, первый – более быстрый, экономически выгодный за счет быстрой окупаемости, но недостаточно универсальный, так как искусственный интеллект, построенный на данном принципе, может принимать решения, только ограниченные математической моделью того или иного мыслительного процесса человека.

Второй метод более общий и универсальный, но его сложно реализовать по следующим причинам:

- сложность математических моделей;
- недостаточное быстродействие компьютера среднего уровня;
- сложность обучения ИИ и внедрения системы.

Для применения искусственного интеллекта в тестирующих программах необходимо учитывать оба направления развития данной области информатики и вычислительной техники. Вопрос принятия компьютером решения о постановке задачи и оценке решения поставленной задачи необходимо решать с помощью создания математической модели принятия преподавателем решения об оценке знаний студента. Тогда программа сможет не формально, а объективно, аналогично человеку подойти к вопросу проверки знаний тестируемого.

Математическая модель должна быть в принципе похожа на математическую модель работы мозга человека. Мозг является самой сложной из известных нам систем переработки информации. Достаточно сказать, что в нем содержится около 100 миллиардов нейронов, каждый из которых имеет в среднем 10 000 связей. При этом мозг чрезвычайно надежен: ежедневно погибает большое количество нейронов, а мозг продолжает функционировать. Обработка огромных объемов информации осуществляется мозгом очень быстро, за доли секунды, несмотря на то, что нейрон является медленнодействующим элементом со временем реакции не менее нескольких миллисекунд. Пока не совсем понятно, как мозгу удастся получить столь впечатляющее сочетание надежности и быстродействия.

Математическая модель применительно к программе оценки результатов тестирования может выглядеть так: нейрон – это простейший элемент хранящий информацию о тех или иных входных данных. Принятие решения будет формироваться на базе динамического массива нейроподобных элементов, т.е. установившееся значение того или иного элемента динамического массива входных данных является фактором, влияющим на формирование оценки. Так как динамический массив данных, учитывающий математическую модель принятия решения, формируется индивидуально для каждого студента, можно считать, что оценка достаточно объективна.

УДК 621.315: 621.891

В.В. Измайлов, С.В. Новосёлов
Тверской государственный технический университет

Исследование фрикционных и электрических свойств фуллеренсодержащих образцов.

Широкое применение в технике находят скользящие электрические контакты (СК) – узлы трения, основной или дополнительной функцией которых является передача электрического тока между взаимоперемещающимися

частями машин, приборов, аппаратов. СК, как правило, являются одним из самых малонадёжных элементов электрооборудования, в связи с чем обеспечение его стабильности, безотказной работы всегда относилось к числу важнейших проблем, стоящих перед машиностроением. Ужесточение режимов работы современных узлов токосъёма за счёт повышения рабочих скоростей, плотностей тока, воздействия агрессивных сред выдвигает необходимость разработки новых материалов и конструкций СК, обладающих комплексом необходимых свойств. В настоящее время в области создания материалов для СК преобладает направление, которое можно назвать 'материаловедческим'. Представители этого направления идут по пути создания материалов для контактных пар, наиболее устойчивых к изнашиванию под действием электрического тока и обладающих необходимыми электрическими характеристиками.

Одним из распространённых видов скользящих электрических контактов являются СК электрических машин, конструктивно выполненные в виде узлов 'щётка – -коллектор' и 'щётка – контактное кольцо'. Важнейшими эксплуатационными характеристиками СК, как для всякого узла трения, являются коэффициент трения и интенсивность изнашивания. Одновременно должны быть обеспечены: надёжная коммутация электрического тока без искрения и дугообразования, минимальные электрические потери в зоне трения и минимальный нагрев контактных элементов, высокая стабильность электрических и фрикционных характеристик в течение всего срока службы.

В качестве материалов для щёток в основном используются многокомпонентные самосмазывающиеся композиции. Известны три основных класса электрощёточных материалов, взаимно дополняющих друг друга: металлографитный, угольнографитный и электрографитный. В последние годы появились принципиально новые щёточные материалы. Одним из видов таких материалов является фуллерен.

Фуллерен – природная форма углерода, существующая наряду с графитом и алмазом. Фуллерены – близкие родственники графита и наследуют его высокую термостойкость, антифрикционные свойства.

Для исследования электрофрикционных характеристик фуллеренсодержащих образцов была разработана специальная установка (рис.1).

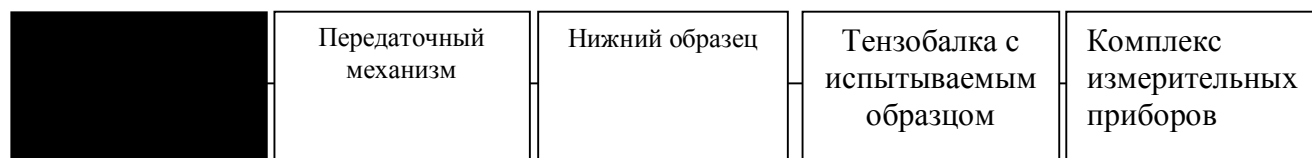


Рис.1. Блок – схема установки для измерения электрофрикционных характеристик испытываемых образцов

Измерительный узел установки (рис.2) состоит из металлической тарелки 3, в которой устанавливаются нижние образцы 4. Верхние образцы 7 закреплены в тензометрических балках 10. От тензометрических балок сигнал подаётся на регистрирующий прибор. Приложение нормальной нагрузки осуществляется набором грузов.

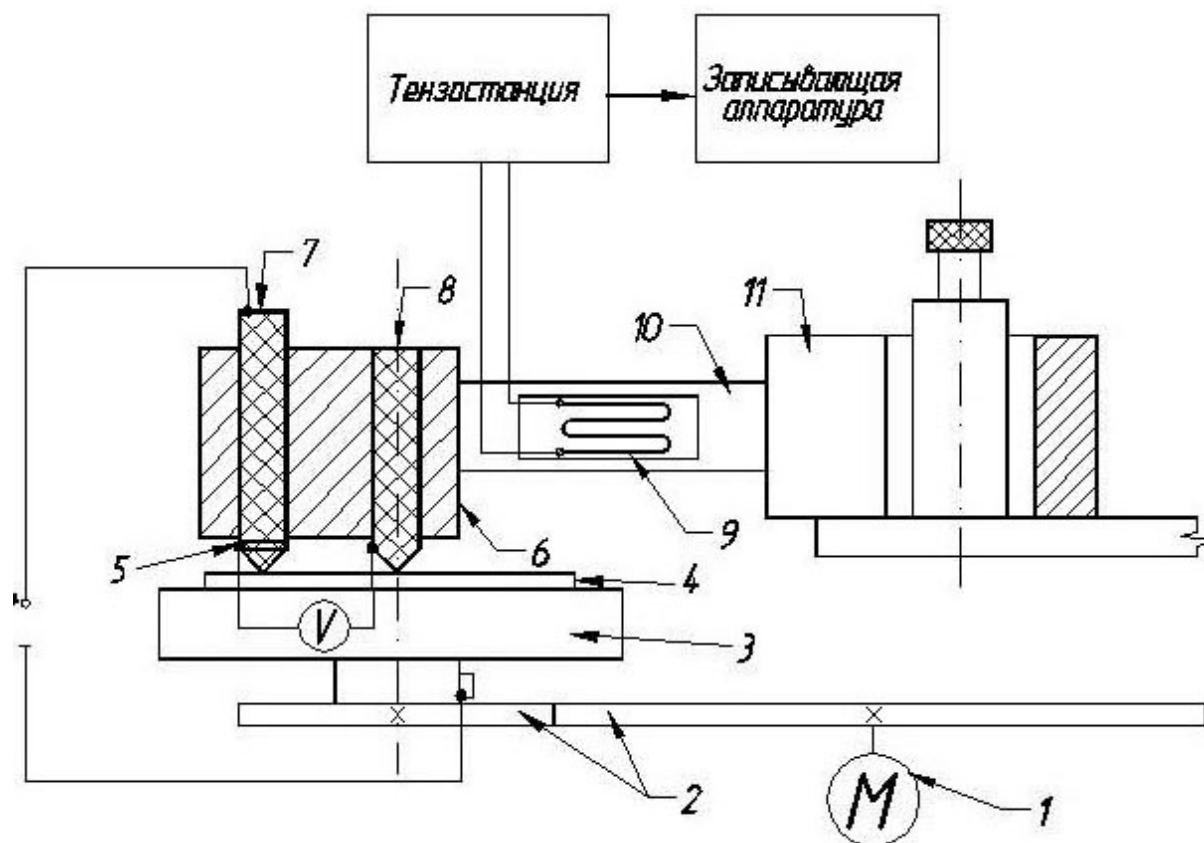


Рис.2. Подключение тензобалки с испытываемым образцом к комплексу измерительных приборов: 1 – электрический двигатель; 2 – передаточный механизм; 3 – металлическая тарелка; 4 – нижний образец; 5 – электропроводящее кольцо; 6 – оправка; 7 – испытываемый образец; 8 – металлический стержень; 9 – тензодатчик; 10 – тензометрическая балка; 11 – крепление для тензометрической балки

Измерение контактного сопротивления осуществляется следующим образом. На каждом образце 7 фиксируется специальное электропроводящее кольцо 5 электрически соединённое с вольтметром, а в отверстие каждой оправки вставлен стержень 8, который свободно контактирует с нижним образцом, закрепленным в тарелке.

При проведении экспериментов были установлены следующие параметры испытаний: нагрузка – 100 г, радиус дорожки трения $r = 15$ мм, частота вращения тарелки $n = 0.18 \text{ с}^{-1}$, сила тока через контакт $I = 1$ А.

Исследовали образцы с составляющими: С, С – фуллерен, С – Cu, С – Cu – фуллерен, С – Cu – Sn, С – Cu – Sn – фуллерен. Зависимости коэффициента трения, контактного сопротивления от времени работы для серии образцов приведены на рис.3,4.

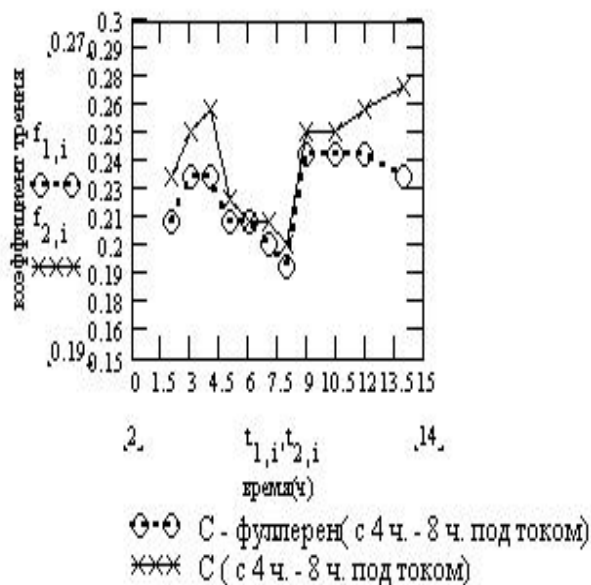
Анализируя полученные результаты, можно заключить, что величина коэффициента трения и контактного сопротивления для материалов,

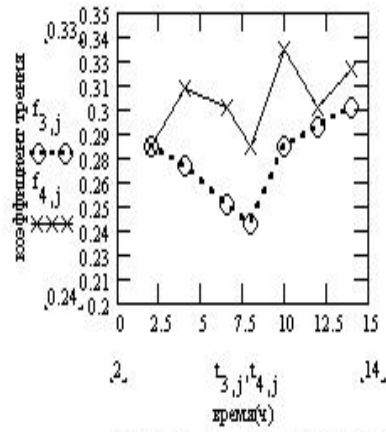
работающих в паре с медным образцом, несколько ниже у фуллеренсодержащих образцов. Следует также отметить, что у всех образцов наблюдалось снижение коэффициента трения при пропускании электрического тока через контакт.

Износостойкость образцов исследовали на соответствующей установке. Три образца каждой серии устанавливались в отверстия жёстко закреплённой втулки. Нижним образцом служила цилиндрическая контакт - деталь, выполненная из меди, которая приводилась во вращение с частотой $n = 6.7 \text{ с}^{-1}$. Нормальная нагрузка на каждый исследуемый образец составляла – 700 г. Интенсивность изнашивания образцов определяли по диаметру пятна износа, измеренному под микроскопом.

Результаты эксперимента приведены на рис.5. Интенсивность изнашивания у фуллеренсодержащих образцов несколько ниже.

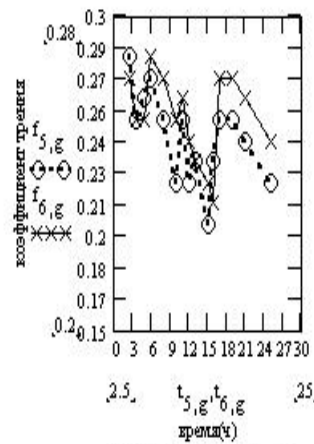
Полученные результаты не дают основания говорить о значительном улучшении электрофрикционных характеристик фуллеренсодержащих материалов по сравнению с соответствующими металлографитовыми образцами. Однако, чтобы сделать окончательные выводы о целесообразности применения фуллеренов в электрощёточных материалах, необходимо продолжить исследования с целью накопления более обширного экспериментального материала.





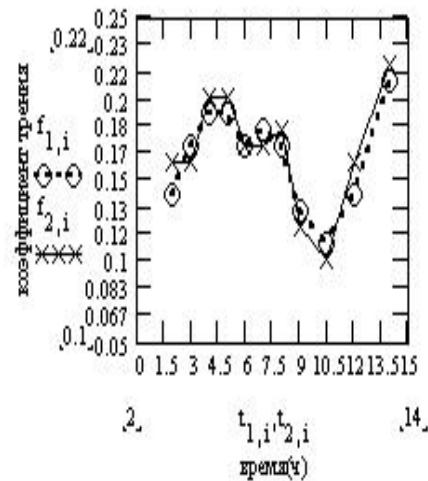
⊙•⊙ C-Cu-фуллерен (с 4ч. - 8ч. под током)

××× C-Cu (с 4ч. - 8ч. под током)



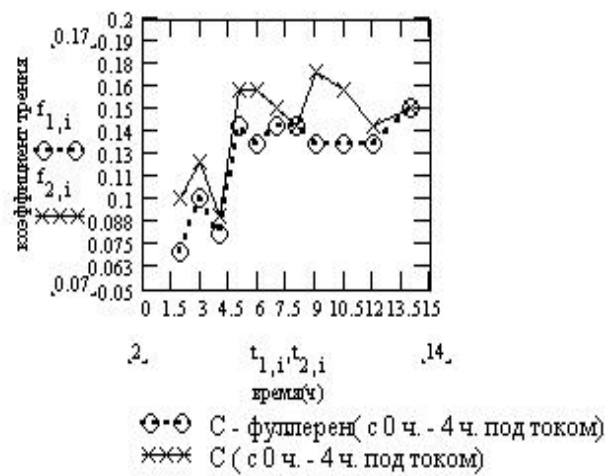
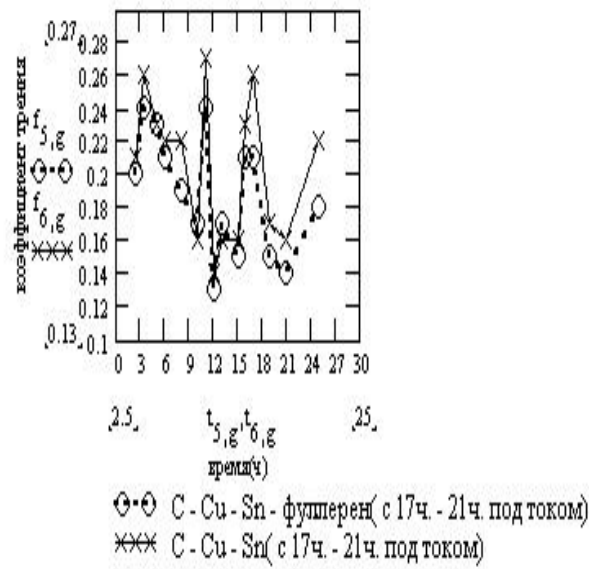
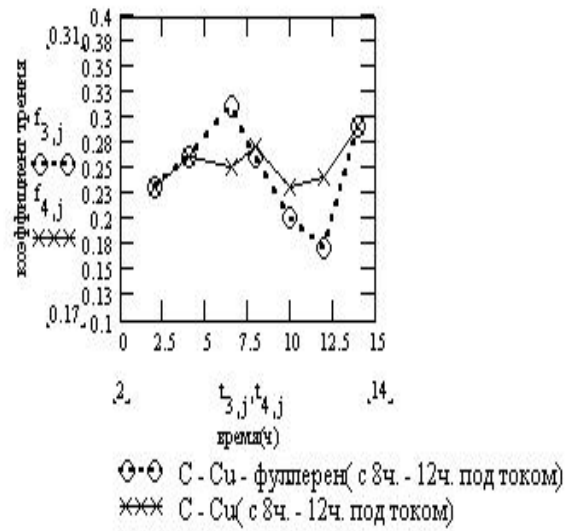
⊙•⊙ C-Cu-Sn-фуллерен (с 12ч. - 16ч. под током)

××× C-Cu-Sn (с 12ч. - 16ч. под током)



⊙•⊙ C-фуллерен (с 8 ч. - 12 ч. под током)

××× C (с 8 ч. - 12 ч. под током)



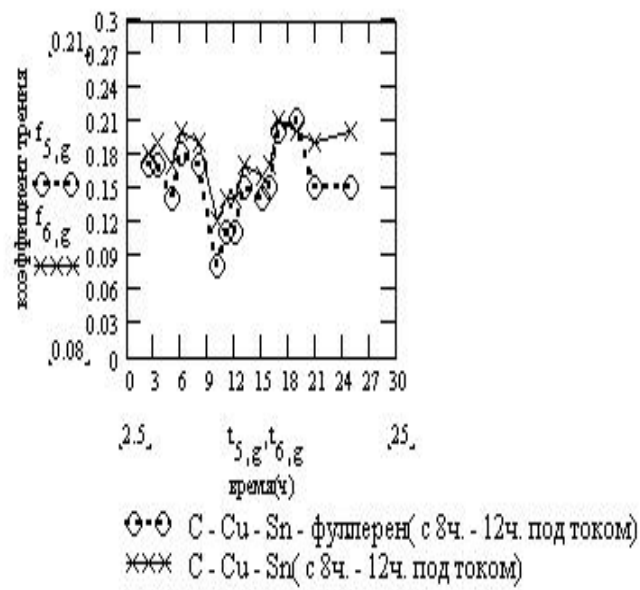
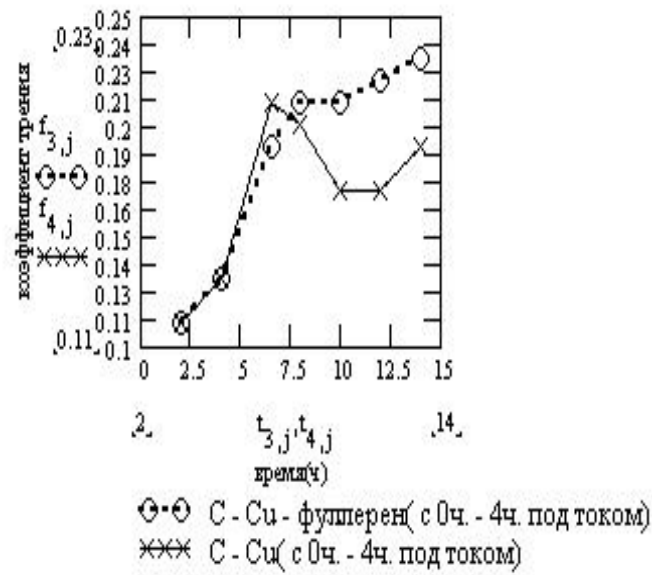
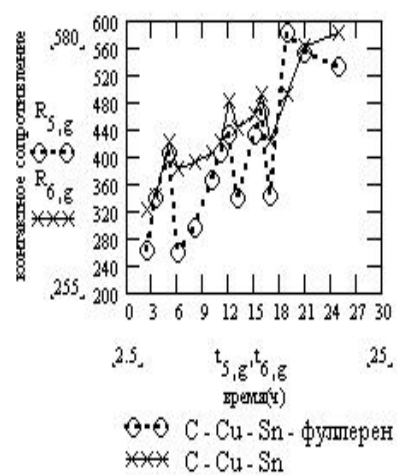
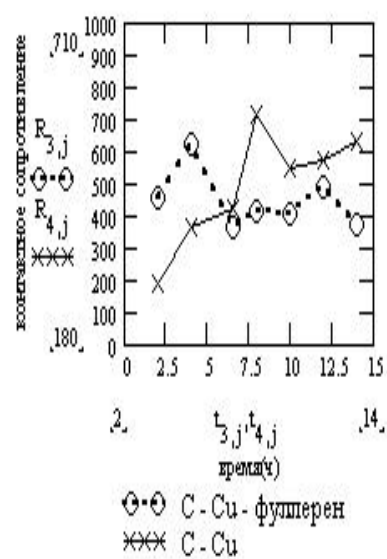
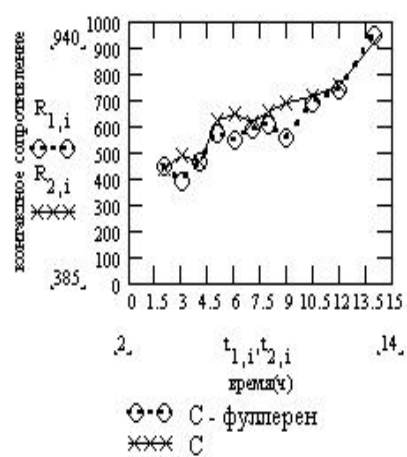
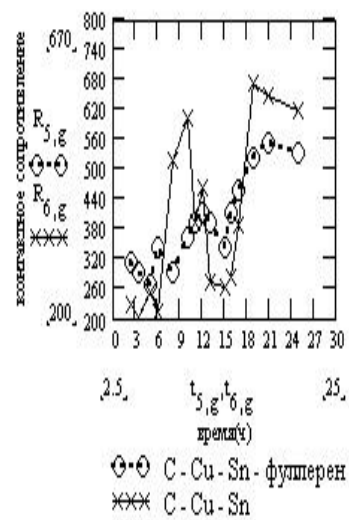
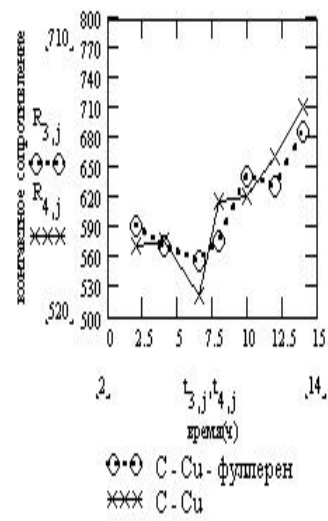
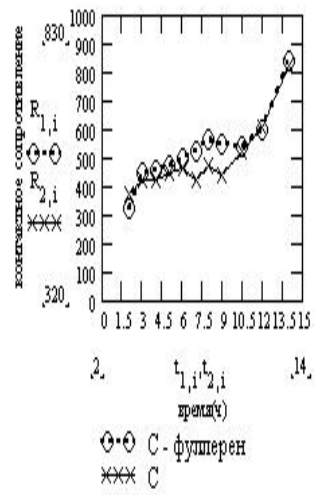


Рис.3. Зависимость коэффициента трения в зависимости от времени наработки для образцов различного состава





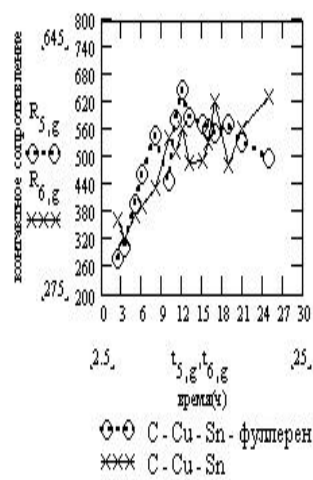
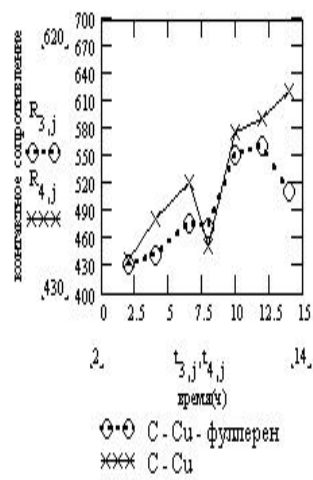
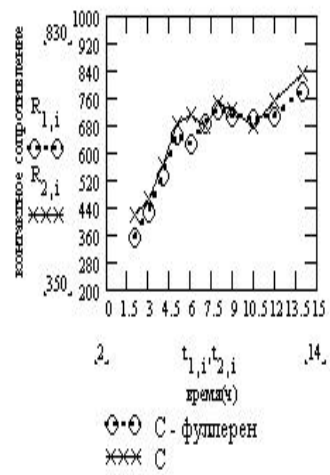
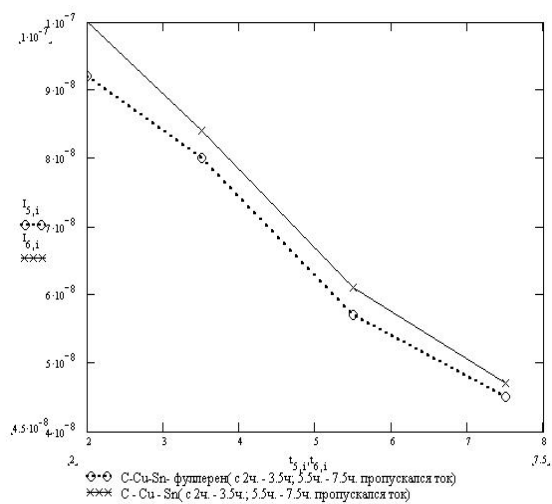
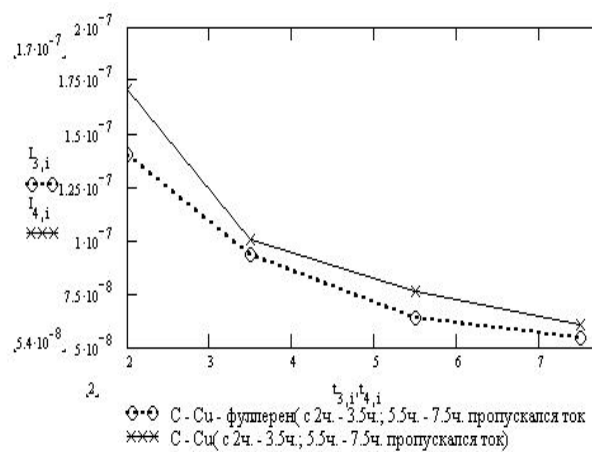
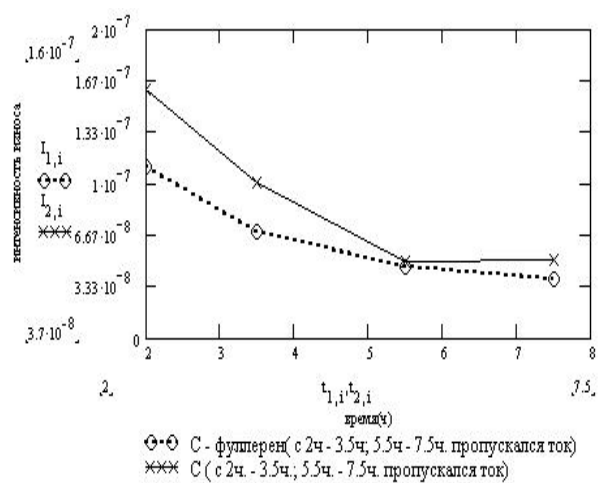
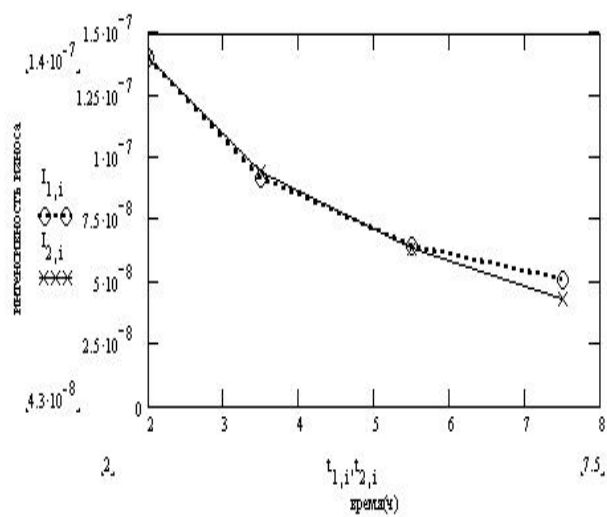
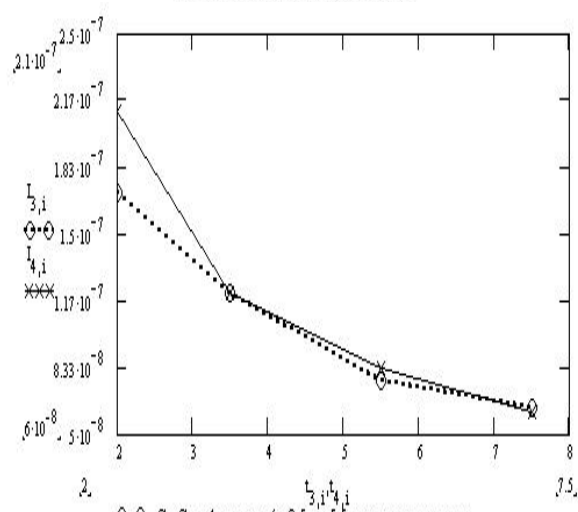


Рис.4. Контактное сопротивление в зависимости от времени наработки для образцов различного состава

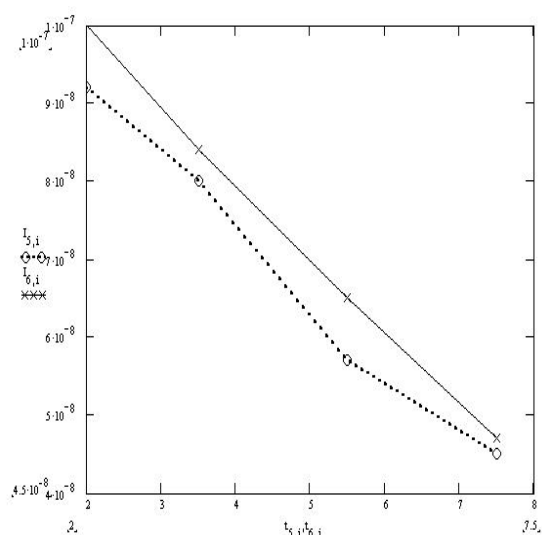




○●○ C - фуллерен (с 3.5ч. - 5.5ч. пропускался ток)
 *** C (с 3.5ч. - 5.5ч. пропускался ток)



○●○ C - Cu - фуллерен (с 3.5ч. - 5.5ч. пропускался ток)
 *** C - Cu (с 3.5ч. - 5.5ч. пропускался ток)



○●○ C-Cu-Sn- фуллерен (с 3.5ч. - 5.5ч. пропускался ток)
 *** C - Cu - Sn (с 3.5ч. - 5.5ч. пропускался ток)

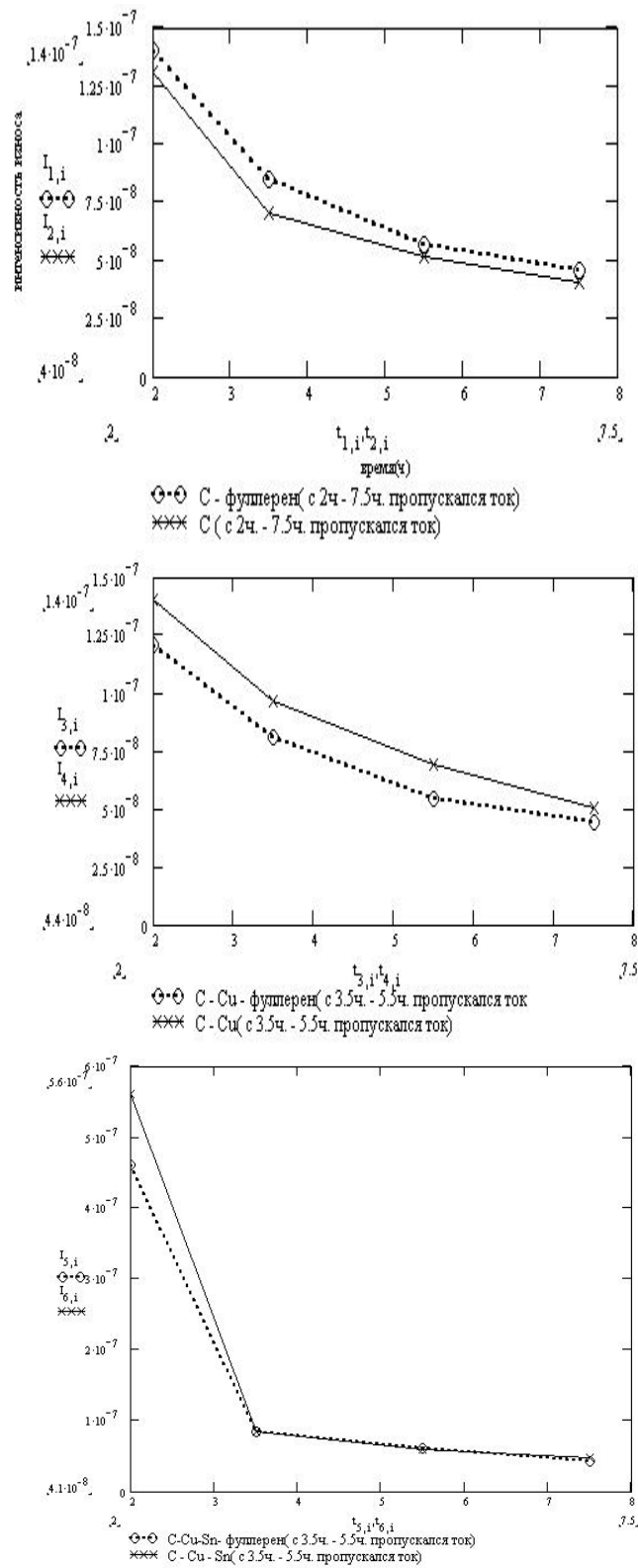


Рис.5. Интенсивность изнашивания в зависимости от времени наработки для образцов различного состава