

УДК 669.539.67

## ВЗАИМОСВЯЗЬ ВНЕШНЕГО И ВНУТРЕННЕГО ЭЛЕКТРОТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ ВО ФРИКЦИОННЫХ УЗЛАХ

А.И. ВОЛЬЧЕНКО<sup>1</sup>, М.Я. ДЖАВАДОВ<sup>2</sup>, Н.А. ВОЛЬЧЕНКО<sup>3</sup>,  
И.Я. ШИРАЛИ<sup>2</sup>, Д.Ю. ЖУРАВЛЕВ<sup>1+</sup>, П.А. ПОЛЯКОВ<sup>3</sup>

В статье рассмотрена взаимосвязь внешнего и внутреннего трения во фрикционных узлах трения тормоза. Внешнее трение исследовалось на границе раздела поверхностей пар трения с основными эксплуатационными параметрами: динамическим коэффициентом трения, удельными нагрузками, скоростью скольжения при упругом, пластическом, упругопластическом контакте с учетом класса шероховатости поверхностей трения и свойств контакта (омического, блокирующего и нейтрального). Оценены энергетические уровни микровыступов при их контакте с различными свойствами. Определена работа выхода частиц из микровыступов рабочих поверхностей металлополимерного сопряжения.

Внутреннее трение проявляется от действия импульсных нормальных усилий, возникающих на пятнах контактов микровыступов металлического элемента трения и в его приповерхностном слое. Рассмотрены дефекты структуры в этом слое и колебания кристаллической решетки с продольными и поперечными волнами под воздействием динамической и тепловой энергии.

Уделено внимание подбору состава компонентов металлического элемента трения с учетом разнообразия перестроек его структуры, а также трибологических, электронных и теплофизических свойств отдельных компонентов металла и их амплитудно-частотных характеристик.

**Ключевые слова:** тормоз, фрикционный узел, пара трения, фазовая граница раздела рабочих поверхностей; приповерхностный слой металлического элемента, внешнее и внутреннее трение, дефекты структуры, динамическая и тепловая нагруженность, энергетические уровни, кристаллическая решетка, колебание с продольными и поперечными волнами.

**Введение.** Качество и надежность создаваемых конструкций фрикционных узлов тормозных устройств зависят от процессов, явлений и эффектов, происходящих при фрикционном взаимодействии микровыступов поверхностей трения. Контакт микровыступов носит дискретный характер, его интенсивность оценивается динамическим коэффициентом взаимного перекрытия пар трения, а величина колеблется в пределах 0,15-0,75 в зависимости от типа фрикционных узлов тормозных устройств.

Динамическое взаимодействие микровыступов поверхностей трения тормозов наиболее полно объясняет молекулярно-механическая теория трения, предложенная *I.V. Kragelski* [1]. Согласно этой теории происходит внедрение жестких микронеровностей металлического элемента трения в поверхность менее жесткой полимерной накладке в зонах их фактического контакта вследствие различия физико-механических свойств и микропрофилей контактирующих участков поверхностей, а также их структурной неоднородности. Это сопровождается деформированием поверхностных слоев пар трения тормозов.

<sup>1</sup> Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа (г. Ивано-Франковск, Украина)

<sup>2</sup> Азербайджанская Инженерная академия (г. Баку)

<sup>3</sup> Кубанский государственный технологический университет (г. Краснодар, Россия)

+ Zhuravlev Dmitriy, E-mail: dmytro.2103@ukr.net

Наряду с деформированием поверхностных слоев при внешнем трении в сближенных участках на достаточно близкое расстояние ( $10^{-7}$  мм) происходят заметные межмолекулярные взаимодействия, в результате чего возникает сопротивление относительному скольжению, получившее название молекулярной составляющей силы трения.

**Анализ литературных источников и состояние проблемы.** В [2] показано, что независимо от механизма изнашивания (усталостного, адгезионного и т.д.) поверхностное (или подповерхностное) разрушение, как правило, начинается в местах концентрации напряжений. Следовательно, факторы, обуславливающие износостойкость, должны обеспечивать деконцентрацию неоднородных деформаций микровыступов и контактных напряжений при их поверхностной локализации. Износостойкость тесно связана с реологическими (релаксационными) свойствами трибосистемы. Подводимая при внешнем трении механическая энергия передается в материал трибоэлементов посредством волн деформаций-напряжений, трансформируясь во внутреннее трение, которое обусловлено неупругими явлениями и характеризует способность твердого тела необратимо рассеивать энергию механических колебаний, превращая ее в теплоту. Механизмы диссипации энергии внутреннего трения являются динамическими механизмами релаксации напряжений, возникающих в приповерхностных слоях трибоэлементов. Релаксация напряжений в зонах контакта, обусловленная внутренним трением, приводит к более равномерному перераспределению напряжений по объему и предотвращает необратимое накопление дефектов, способствующее концентрации напряжений. Доказано, что чем большая часть подводимой при трении механической энергии рассеивается в форме теплоты, тем выше должна быть износостойкость трибосопряжения. Учитывая, что температурная и амплитудная зависимости внутреннего трения твердых тел часто имеют экстремальный характер, следует ожидать, что при увеличении температуры, скорости трения или нормальной нагрузки до уровней, соответствующих тому или иному пику внутреннего трения, будет наблюдаться снижение износа трущихся поверхностей. Действительно, эффект минимизации износа в определенном нагрузочно-скоростном диапазоне трения или резания является общим свойством конструкционных и инструментальных материалов.

Однако в исследованиях не установлена взаимосвязь между параметрами внешнего и внутреннего трения.

В [1] контакты при взаимодействии твердых тел разделяются на следующие типы: упругий, пластический и упруго-пластический. Каждый из них может быть насыщенным и ненасыщенным. Приведены зависимости для определения контурных удельных нагрузок и величин внедрения микровыступов в поверхности пар трения.

Фрактальная размерность является метахарактеристикой нестабильности функционирования сложных систем. Применение теории фракталов в области современного материаловедения позволило успешно решать задачи составления рецептур материалов с заданными свойствами. Теория фракталов органично связана с представлениями структур. Она служит базой для количественного описания диссипативных структур, формирующихся в условиях, далеких от равновесных состояний. Такой подход позволил выделить в науке о материалах магистральное направление – фрактальное материаловедение. Оно предложено и успешно развивается в Институте металлургии и материаловедения РАН. С применением теории фракталов стало возможным установление связей между составом, фрактальной структурой и свойствами материала, что весьма важно при исследовании процесса формирования поверхности. Анализ скрытых закономерностей и нахождение основных параметров, влияющих на характер динамики системы, позволяет в терминах фрактальной геометрии характеризовать некоторые важные особенности и ее эволюцию [1-4].

Колебания фрактальной дефектной структуры упругого твердого тела рассмотрено в [3]. Здесь предложена фрактальная теория колебания на фрактальных структурах; исследованы упругие колебания фрактальных кластеров и свойства собственных колебаний фрактальных материалов. Однако в указанных исследованиях не учтено внутреннее трение с заданной дефектной структурой металлического элемента, находящегося под воздействием электротермомеханического трения с различными амплитудами деформаций, поверхностных и объемных температур, а также частот колебаний частиц материала. В связи с этим значительно снижена степень

полноты информации о расположении дефектов в материале; энергетических уровнях компонентов материала при взаимодействии дефектов; перестройках в микроструктурах материала.

В [4] проведено диагностирование контактного взаимодействия твердых тел при трении с применением методов фрактального анализа. Уделено внимание следующим вопросам: возникновение фрактальных структур в ходе эволюции сложных структур; закономерности изменения контурных удельных нагрузок в зависимости от шероховатости микровыступов поверхности при упругом и пластическом контактах; определение фрактальной размерности кривой опорной поверхности микровыступа при пороговых значениях величины внедрения микровыступа; оценка спектра мощности профиля шероховатости и прогнозирование свойств контакта металлических тел. Однако, здесь не учтена температура Дебая, которая приблизительно указывает температурную границу, ниже которой начинают сказываться квантовые эффекты; а также не уделено внимание избыточной энергии поверхностного слоя металлического элемента трения.

Из анализа [1-4] следует, что для прогнозирования поведения материалов при трении необходимо установить взаимосвязь внешнего и внутреннего трения в приповерхностном слое металлического элемента тормозного устройства.

**Постановка задачи.** В статье рассмотрены следующие вопросы применительно к проблеме:

- закономерности изменения основных эксплуатационных характеристик пар трения тормозов;
- оценка избыточной энергии поверхностного слоя металлического элемента трения и его структурных составляющих;
- работа выхода частиц из микровыступов поверхностей трения металлополимерного сопряжения;
- энергетические уровни микровыступов с различными свойствами контактов;
- колебания кристаллической решетки металлического элемента трения при динамической и тепловой нагруженности пар трения;
- подбор компонентов для металлического элемента трения с учетом спектра их энергетических уровней.

**Цель работы** – установить взаимосвязь параметров внешнего и внутреннего трения в металлополимерных парах трения.

**Закономерности изменения основных эксплуатационных параметров пар трения тормозов.** Внешнее и внутреннее трение во фрикционных узлах тормозных устройств обусловлено электронными и ионными процессами, происходящими в приповерхностных слоях рабочих поверхностей.

На рис. 1 приведена диа-

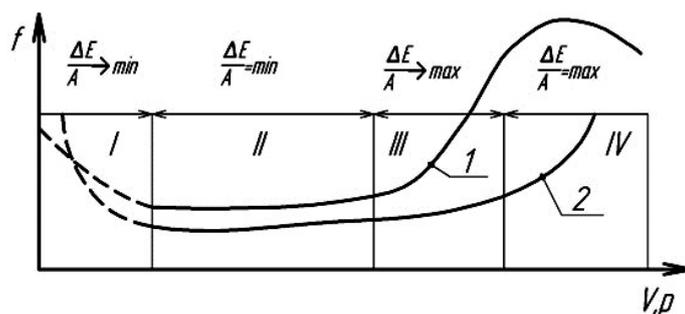


Рис. 1. Энергетические соотношения для различных зон трения при изменении динамического коэффициента трения от: 1 – удельной нагрузки ( $\rho$ ); 2 – скорости скольжения ( $V$ )

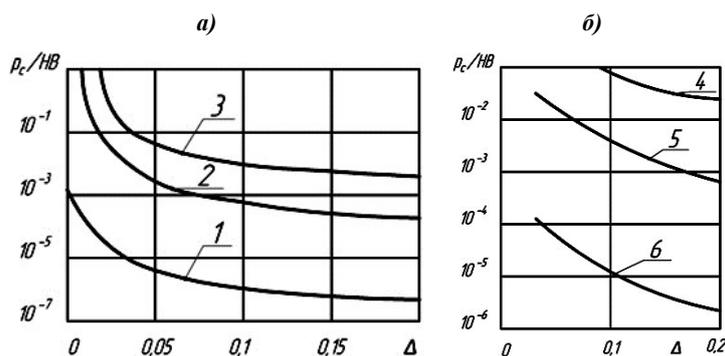


Рис. 2 а, б. Зависимость удельных нагрузок  $\rho_c$  от шероховатости  $\Delta$  поверхности трения при упругом (а) и пластическом (б) контактах:

$$1 - \frac{HB}{E} = 0,01; \mu = 0,3; 2 - \frac{HB}{E} = 0,05; \mu = 0,5; 3 - \frac{HB}{E} = 0,1; \mu = 0,5;$$

$$4 - \frac{HB}{E} = 0,1; \mu = 0,5; 2 - \frac{HB}{E} = 0,05; \mu = 0,5; 5 - \frac{HB}{E} = 0,05; \mu = 0,5;$$

$$2 - \frac{HB}{E} = 0,01; \mu = 0,3.$$

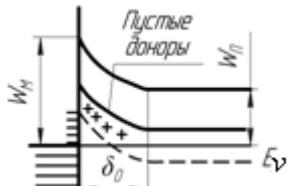
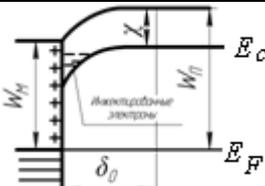
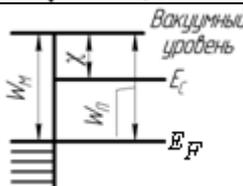
грамма (по данным Б. И. Костецкого) энергетического соотношения для различных зон трения на единицу контурной площади ( $A$ ) при изменении динамического коэффициента трения ( $f$ ) от удельной нагрузки ( $p$ ) и скорости скольжения ( $V$ ). Процесс фрикционного взаимодействия пар трения разделен на четыре зоны. В первой и второй зонах происходит накопление тепловой энергии.

На рис. 2 приведены закономерности изменения удельных нагрузок  $p_c$  в зависимости от шероховатости ( $\Delta$ ) рабочей поверхности металлического элемента трения при упругом (а) и пластическом (б) контактах. Графические зависимости получены с помощью формул 1 и 3, приведенных в табл. 1 [1]. Из рис. 2 б следует, что разброс данных весьма значителен.

Колебания механических свойств стали 35ХНЛ при изменении температурно-скоростного режима эксплуатации являются характерными не только для электротермомеханического трения. При исследовании влияния температурно-скоростных режимов на деформации пятен контактов микровыступов и сопротивление деформации стали 35ХНЛ в температурном интервале (200 – 300 °С) отмечено повышение ее твердости (рис. 3), обусловленное развитием динамического деформационного старения.

Таблица 1

Тип контакта и его свойства при оценке энергетических уровней микровыступов пар трения

Класс шероховатости	Допустимые удельные нагрузки, $p$ , МПа	Тип контакта	Работа выхода частиц, $W$ , эВ
10-ый и выше	>10	упругий	
10-ый и ниже	<10	пластический	
8-ой и выше	≥8	упругопластический	
Расчетная зависимость	Свойства контакта	Энергетическое условие	
$\frac{p_c}{HB} \leq \frac{1}{2} \left( \frac{2,4}{\Delta} \right)^v \left[ \frac{HB}{E} (1 - \mu^2) \right]^{2v}$ (1)	омический	$W_m > W_n$ : м – металл; n – полимер	
$\frac{p_c}{HB} \leq \frac{1}{2} \left[ \frac{5,4}{\Delta} \left( \frac{HB}{E} \right)^2 (1 - \mu^2)^2 \right]^v$ (2)	блокирующий	$W_m < W_n$	
$\frac{p_c}{HB} \leq \frac{1}{2} \left[ \frac{2,4}{\Delta} \left( \frac{HB}{E} (1 - \mu^2)^2 \right) \right]^v$ (3)	нейтральный	$W_m = W_n$	

**Избыточная энергия поверхностного слоя металлического элемента трения и его структурные составляющие.** При исследовании процессов, явлений и эффектов, возникающих при внешнем трении и изнашивании пар трения тормозных устройств, необходимо учитывать поверхностную энергию, характеризующую активность атомов поверхностного слоя.

Известно, что у большинства металлов каждый атом в объеме окружен 12-ю соседями, а на поверхности – 6-ю. При этом поверхностная энергия должна быть равна 1/6 энергии сублимации, т. е. энергии, необходимой для разделения поверхностного слоя металла на независимые атомы. Чем выше поверхностная энергия, тем прочнее адгезионные связи и тем больше сопротивление относительно перемещению металлического элемента трения тормоза [5].

Упругие свойства ( $E$  и  $G$ ) материала в поверхностных слоях незначительно отличаются от объемных. Пластические свойства, в том числе и микротвердость, изменяются по глубине.

Известно, что механическая обработка деталей сопровождается деформацией слоев и упрочнением (наклепом). В результате наклепа образуется сильно деформированная кристаллическая решетка металла, что приводит к повышению пределов прочности и текучести, а также микротвердости. Низлежащие слои имеют искаженную кристаллическую решетку, что обуславливает возникновение неоднородно-распределенных внутренних напряжений между отдельными зернами, неустойчивых, неуравновешенных положений атомов, а также упругих искажений плоскостей скольжения кристаллов. Все это на определенной глубине придает металлу структурно неустойчивое состояние.

Структура поверхностного слоя материала детали после ее механической обработки или внешнего трения одной детали относительно второй может быть представлена в виде пяти слоев (рис. 4 а, б, в).

При исследовании процессов трения и изнашивания особое значение имеет усталостная прочность материалов и деталей. Усталость – это изменение состояния металла детали в результате многократного (циклического) деформирования, приводящее к его прогрессирующему трещинообразованию и разрушению.

Усталостную прочность учитывают при определении числа циклов  $N_{кр}$  до разрушения материала при его циклическом нагружении.

На рис. 4 в представлена закономерность изменения температуры Дебая, при которой возбуждаются все моды колебаний в данном твердом теле. Дальнейшее увеличение температуры не приводит к появлению новых мод колебаний, ведет к увеличению уже существующих амплитуд, то есть средняя

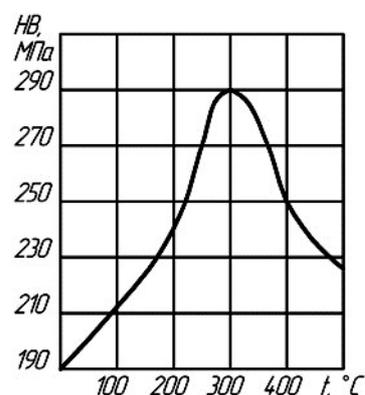


Рис. 3. Закономерности изменения твердости микровыступов металлического элемента трения от поверхностной температуры деформации для стали 35ХНЛ

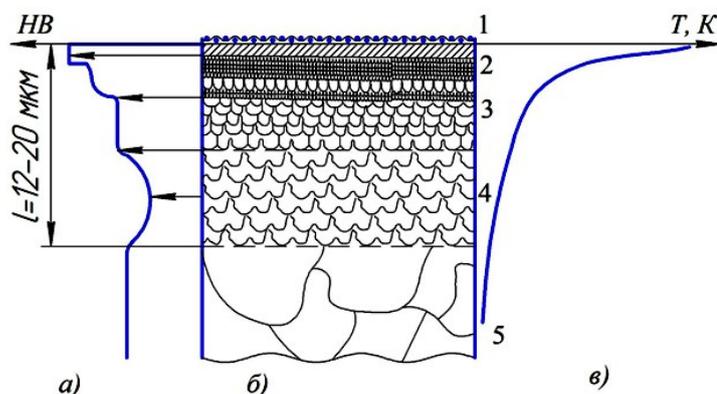


Рис. 4. Структура поверхностного слоя металлического элемента трения:

1 – комбинированный слой, состоящий из пленок влаги, газов и загрязнений; 2 – слой окисла, имеющий повышенную твердость; 3 – слой с сильно деформированной кристаллической решеткой в результате наклепа; 4 – более глубокий слой с искаженной кристаллической решеткой; 5 – металл с исходной структурой

**Примечание:** для третьего слоя характерно наличие ориентированных в определенном порядке зерен; для четвертого слоя характерно наличие большого числа вакансий и дислокаций

энергия колебаний с ростом температуры растет.

При трении усталостное поверхностное разрушение происходит в такой последовательности: возникновение дефектов в структуре решетки; появление микротрещин; разрушение поверхности при выходе микротрещин наружу. Все изменения свойств в кристаллических материалах, которые обычно происходят при пластической деформации, могут быть устранены только в процессе рекристаллизации при соответствующей их термообработке.

### Работа выхода частиц из микровыступов рабочих поверхностей металлополимерного сопряжения.

Рассмотрим связь работы выхода электронов и ионов с рабочими поверхностями металлополимерных пар трения с их поверхностной температурой и импульсными удельными нагрузками, действующими на пятна контактов микровыступов (рис. 5 а, б, в, г). Поверхностные температуры полимерных накладок были ниже (рис. 5 а, б, в) и выше (рис. 5 г) допустимой для их материалов.

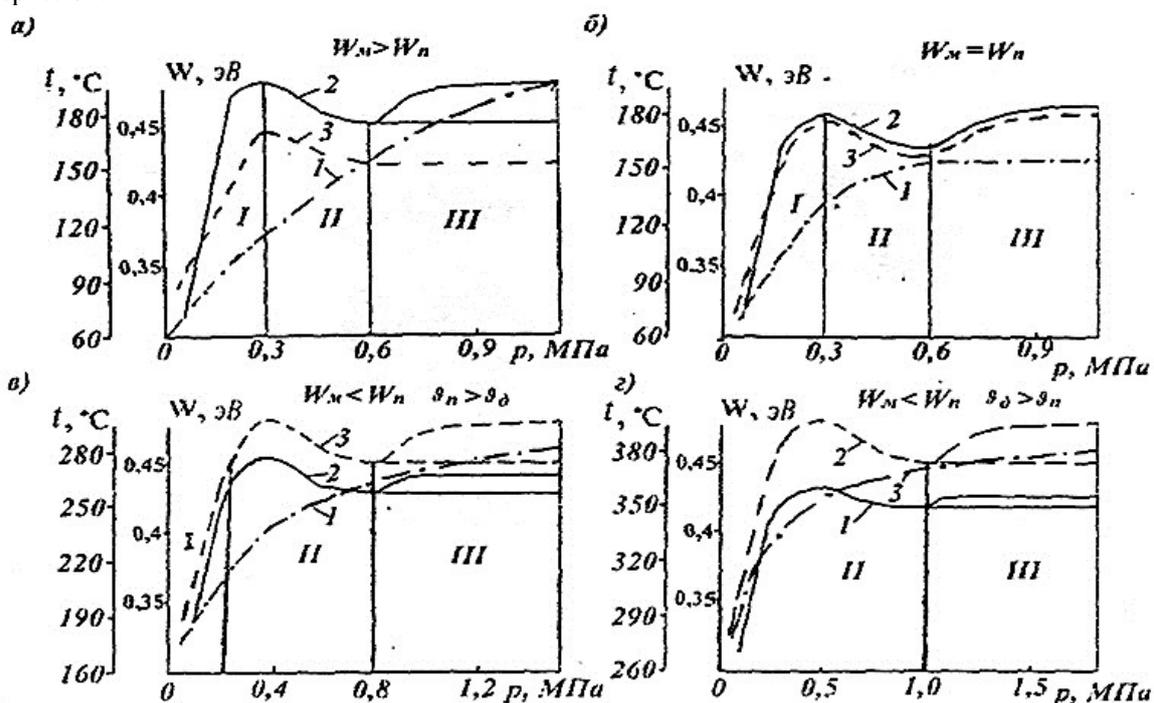


Рис. 5 а, б, в, г – Закономерности изменения работы выхода электронов и ионов с рабочими поверхностями металлополимерных пар трения (кривая 1) и их поверхностной температурой ниже (а, б, в) и выше допустимой (г) для материала накладки (кривая 2) от импульсных удельных нагрузок (кривая 3), действующих на пятна контакта микровыступов

Проанализируем температуры, возникающие на пятнах контакта микровыступов в процессе фрикционного взаимодействия (рис. 5). Участок I соответствует, в основном, области упругой деформации поверхностных слоев материалов элементов трения, участки II и III – преимущественно области пластических деформаций без и с насыщенной плотностью дислокаций.

Участок I (рис. 5 в) смещен влево, на рис. 5 г участок I вообще отсутствует, расширяясь при этом на участке II. Объясняется это тем, что в первом случае начинаются деструктивные процессы выгорания связующих компонентов из поверхностного слоя полимерной накладки и имеет место образование пятен жидкости на ее поверхности. Во втором случае деструктивные процессы заканчиваются увеличением количества пятен жидкости на рабочей поверхности полимерной накладки. Третий участок на всех рисунках характеризуется динамическим равновесием между процессами размножения и ангильции дефектов с образованием микропор и микротрещин в поверхностных слоях металлополимерных пар трения. При этом толщина теплового слоя при больших импульсных удельных нагрузках в металлополимерных парах трения на один-два порядка превышает толщину поверхностного и подповерхностного слоев их элементов.

Рассмотрим, как влияют указанные выше три участка на изменение поверхностной температуры, удельных нагрузок и работы выхода электронов и ионов с рабочих поверхностей металлополимерных пар трения. Поверхностная температура и удельные нагрузки влияют на величину работы выхода электронов. На участке I (рис. 5 а) с ростом удельных импульсных нагрузок работа выхода электронов и ионов возрастает.

При дальнейшем увеличении температуры и удельных нагрузок работа выхода электронов и ионов почти не изменяется. Наличие жидкой фазы вызывает увеличение удельных нагрузок в парах трения (рис. 5 в, з). Работа выхода ионов больше работы выхода электронов в связи с эффектом сродства электрона и иона (происходит преобразование электронов в ионы). Поверхностная температура монотонно увеличивается в данном диапазоне удельных нагрузок, не имеет экстремумов и коррелируется с работой выхода электронов и ионов (рис. 5 а, б, в, з).

На III-их участках (рис. 5 б, з) при  $W_M = W_{II}$  и  $W_M < W_{II}$  в интервале температур ниже и выше допустимой для материалов полимерной накладки имели место, соответственно, постоянная и термостабилизационная температуры. Первая возникает, когда кратковременное количество теплоты, генерируемое на поверхностях трения, отводится от матовых поверхностей металлического элемента трения в окружающую среду. Его термостабилизационное состояние является продолжительным, когда градиент температуры минимален по толщине его полированной поверхности.

**Энергетические уровни контактов микровыступов с различными свойствами.** В материале полимерных накладках, составленном из неоднородных компонентов, присутствуют аморфные и кристаллические фазы, в связи с чем на межфазных границах возникает захват иного рода. Накапливание зарядов на границах обусловлено разницей в проводимостях рассматриваемых фаз (эффект Максвелла-Вагнера). При электризации такого материала носители будут собираться вблизи межфазной границы или удаляться от нее в зависимости от того, какой из двух токов проводимости (притекающий к границе зарядов или уходящий от нее) преобладает. Различия в локальных токах проводимости приводят также к диссипации зарядов при возникновении термостимулированного разряда, так как в этом случае токи текут уже в противоположном направлении.

Для процессов нейтрализации зарядов немаловажную роль играют также свойства рабочей поверхности металлического элемента трения. Взаимосвязь между энергетическими уровнями определяется при исследовании фрикционного контактного взаимодействия микровыступов поверхностей трения.

В табл. 1 в последней строке условно показано различие между омическим, блокирующим и нейтральным контактами.

Рассмотрим случаи возникновения нейтральных контактов на микровыступах металлополимерных пар трения.

**Первый случай:** поверхностные температуры не превышают допустимую температуру для материал фрикционной накладки. Согласно табл. 1 величины работ выхода электронов и ионов с рабочих поверхностей металлического и полимерного элементов трения равны между собой. Большую прибавку к работе выхода ионов из поверхностного слоя накладки дает их сродство с электроном. В связи с этим появляется способность некоторых атомов и молекул присоединять добавочный электрон и превращаться в положительные ионы.

Мерой сродства иона к электрону служит выделяющаяся при этом энергия. Целенаправленная переориентация электронов в ионы позволяет достичь равенства работ выхода частиц.

**Второй случай.** При достижении рабочей поверхностью полимерной накладки температуры, превышающей допустимую, происходит выгорание в поверхностных и подповерхностных слоях связующих компонентов, что ведет к образованию жидкостных островков на рабочей поверхности накладки. При контакте поверхности трения металлического элемента с жидкостью происходит переход ионов из металла в жидкость (табл. 1, кривая 1).

При взаимодействии металла с раствором жидкости он входит в раствор либо в виде положительных ионов, либо комплексных отрицательных ионов. При этом поверхность металла приобретает некоторый специфический потенциал, устанавливающий равновесие между процессом выделения и осаждения ионов. Этот потенциал зависит как от природы металла, так и от

концентрации ионов в жидкости. При некотором значении кислотности ( $pH$ ) металл не посылает в раствор ионы, а наоборот, принимает их из раствора, приобретая заряды до наступления электрического равновесия.

Как известно, металлы располагаются в электрохимический ряд по отношению к положительному иону водорода  $H^+$ . При погружении в жидкость двух различных металлов каждый из них имеет определенный потенциал по отношению к жидкости. При контакте металлов возникает электрический ток до тех пор, пока в растворе не будут исчерпаны все ионы металлов или раствора. Электрические токи могут протекать и между различными точками одной металлической поверхности, если она заряжена и неоднородна.

Кроме химического механизма электрических явлений в контакте металла и жидкости возможен и другой механизм – электризация поверхностей металла и жидкости при ее движении, т.к. слой жидкости, перемещаясь, уносит с собой ионный заряд. Расчеты показывают, что значительное накопление зарядов при движении жидкости происходит при ее удельном сопротивлении выше  $10^9$  Ом·см. Считается, что при этом на поверхности металла, соприкасающейся с жидкостью, образуется двойной электрический слой.

Поверхность металла в результате потерь или захвата ионов приобретает незначительный химический потенциал, и по ней распределяется некоторый заряд. Противоположный по знаку заряд находится в жидкости. Распределение зарядов в жидкости может характеризоваться потенциалом  $\varphi_3$ , который меняется с расстоянием от поверхности в соответствии с электростатическими силами и распределением Больцмана (см. табл. 1). Аналитическое выражение для расчета величины потенциала  $\varphi_3$  получаем решением уравнения Пуассона в предположении, что существует экранирующий двойной слой [6]:

$$\varphi_3 = \frac{4\pi\bar{\sigma}}{\varepsilon k} \exp k(d-x), \quad (4)$$

где  $\bar{\sigma}$  – плотность заряда поверхностного слоя;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $k$  – постоянная Больцмана;  $d$  – толщина слоя;  $x$  – расстояние.

При электротермомеханическом трении металлополимерных пар энергонагруженность рабочей поверхности полимерной накладке играет решающую роль в формировании нейтрального контакта в зоне фрикционного взаимодействия. Наиболее часто в металлополимерных парах трения тормозных устройств встречается омический (инжектирующий) контакт (см. табл. 1). Особенно это характерно для двухслойных структур.

**Колебания кристаллической решетки металлического элемента трения под воздействием динамической и тепловой нагруженности тормоза.** Законы упругости, имеющие место в паре трения «металл - полимер» при их фрикционном взаимодействии, при продольных и поперечных деформациях отражают взаимно однозначные зависимости между (текущими) мгновенными значениями деформаций и колебаний кристаллической решетки приповерхностного слоя металлического элемента трения.

Кванты энергии упругих колебаний называются фононами. Звуковые волны в кристаллах рассматриваются как распространение квазичастиц фононов, а тепловые колебания кристаллической решетки – как термическое возбуждение фононов.

Дисперсия волн зависит от фазовой скорости  $v_\phi$  гармонической волны и ее частоты  $\omega$ . Последняя зависит от волнового числа  $k$  плоской гармонической волны  $\omega = \omega(k)$ . Дисперсионное уравнение может иметь несколько ветвей, которым соответствуют различные типы волн (моды), т. е. продольные и поперечные.

В большинстве случаев дисперсия продольных и поперечных волн обусловлена мик-

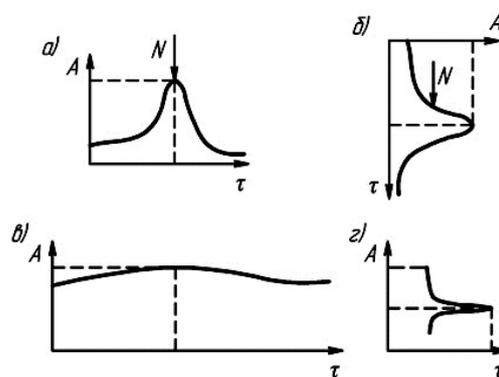


Рис. 6 а, б, в, г – Продольная (а) и поперечная (б) волна при колебании: кристаллической решетки и их искажения (в, г) при действии нормальных сил

ро-наномасштабными свойствами приповерхностных слоев металлического элемента трения (колебаниями атомов и молекул, их тепловым движением, структурой кристаллической решетки). В диспергирующих средах различают временную (частную) и пространственную дисперсию в зависимости от режима торможения. Временная дисперсия характерна для экстренного и единичных торможений циклического режима нагружения. Она определяется запаздыванием (инерцией) отклика какой-либо физической величины (например, электрической или тепловой поляризации) механическому смещению.

Пространственная дисперсия продольных и поперечных волн возникает при длительном режиме торможения, когда поведение приповерхностного слоя металлического элемента трения зависит от динамического и теплового нагружения не только дискретных микровыступов поверхностей трения, но и соседних микровыступов, т. е. имеет место нелокальность отклика микровыступов поверхности на внешнее воздействие.

На характер колебаний кристаллической решетки приповерхностного слоя металлического элемента трения влияют ее дефекты и теплонагруженность. Если в кристалле много дефектов, то локальное колебание, возбужденное на одном дефекте, может перейти на другой. В этом случае локальные колебания обладают узкой полосой частот, т. е. образуют примесную зону частот колебаний. Амплитуда колебаний тем больше, чем выше температура поверхностного слоя металлического элемента трения, но она всегда существенно меньше постоянной кристаллической решетки. На тепловые колебания (фон) могут налагаться звуковые колебания, вызванные распространением в кристалле упругих волн. Они порождаются внешним воздействием в виде нормальной силы, действующей аperiодически и являющейся составляющей динамического коэффициента трения.

На рис. 6 *a*, *б* показаны продольная (*a*) и поперечная (*б*) волна при колебании кристаллической решетки и их искажение (*в*, *г*) при действии на нее нормальной силы (*N*) при электротермомеханическом трении. Отмечено существенное изменение амплитуды (*A*) во время (*τ*) действия нормальных сил (*N*). В первом случае (рис. 6 *в*) волна удлиняется, во втором (рис. 6 *г*) она сплющивается, однако амплитуда волны остается прежней. Амплитуда поперечной волны колебаний увеличивается за счет продольной волны колебаний.

Рассмотрим влияние температуры Дебая ( $T_D$ ) на частоту колебания частиц в кристаллической решетке металлического элемента трения. Температура Дебая является физической константой металлов, характеризующая такие их свойства как теплоемкость, теплопроводность, электропроводность, уширение линий рентгеновских спектров, упругость и другие. Максимальная частота ( $\nu_D$ ) колебания атомов металлов определялась по следующей формуле:

$$\nu_D = \frac{T_D - k_B}{h}, \quad (5)$$

где  $k_B$  – постоянная Больцмана;  
 $h$  – постоянная Планка.

В табл. 2 представлены результаты расчетов по формуле (5) при следующих исходных данных:

$$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}; \quad h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}.$$

$$k_B/h = 0,208 \cdot 10^{11} \text{ К}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Анализ частот колебаний частиц в элементах структуры металлов показал следующее:

- максимальное отношение  $\nu_D$  характерно для восьмого и первого элементов, оно равно 1,59, а минимальное – для восьмого и седьмого элементов, которое равно 1,08;
- находящиеся рядом элемен-

**Таблица 2**

**Значение температуры Дебая для некоторых металлов и частота колебаний их частиц**

№ п/п	Металл	Температура Дебая, $T_D$ , К	Частота колебаний частиц, $\nu_D \cdot 10^{11}$ , $\text{с}^{-1}$
1	Pb	295,0	60,76
2	Zn	300,0	62,44
3	Cu	344,5	71,71
4	Ni	375,0	78,05
5	Mo	380,0	79,1
6	Ti	420,0	87,42
7	Al	429,0	89,29
8	Fe	464,0	96,58

ты структуры с большим числом отношения  $v_D$  создают локальную колебательную перегрузку в приповерхностном слое металлического элемента трения, что существенно влияет на его локальную деформацию.

**Подбор материалов пар трения с учетом спектра их энергетических уровней.** На данном этапе исследования пока что не установлено влияние каждого отдельного легирующего элемента на величину работы выхода электронов и его теплофизического параметра на термодинамическое состояние фрикционного элемента.

На первом этапе работы были исследованы образцы чистых металлов: от легкого – алюминия, до тяжелого – никеля. В качестве эталонных металлов использовали стержни из Al, Ni, Fe и Cu. Эти металлы отличаются работой выхода электронов, плотностью свободных носителей и энергией Ферми [7-9].

В табл. 3 приведены усредненные экспериментальные значения трибоЭДС металлов вышеперечисленных эталонов, работы выхода электронов  $\phi_F$ , энергии Ферми  $E_F$  и плотности электронов проводимости  $N/V$ . Из приведенных в табл. 3 данных видно, что величина и знак трибоЭДС для всех контролируемых металлов различна и зависит от их природы. Наименьшими значениями контактной разности потенциалов обладает алюминиевый эталон, наибольшими – медный.

Таблица 3

Трибологические и электронные свойства металлов

Металл	$\phi_F$ , эВ	$E_F$ , эВ	$N/V$ , $\times 10^{28}$ , м <sup>3</sup>	ТрибоЭДС, мкВ, для эталонов из			
				Al	Ni	Fe	Cu
Al	4,25	11,7	18,1	0	+34	+40	-30
Ti	3,95	-	-	-6	+16	+36	-10
Fe	4,31	11,1	17,0	+24	+80	0	+40
Ni	4,50	-	-	-24	0	-28	-32
Cu	4,40	7,0	8,47	+4	+20	+100	0
Zn	4,24	9,47	13,2	+6	+40	+18	-25
Mo	4,30	-	-	+8	+48	+32	+45
Pb	4,00	9,47	13,2	-0,4	-20,8	+15	-30

В табл. 3 использованы следующие обозначения:  $\phi_F$  – работа выхода электронов, эВ;  $E_F$  – энергия Ферми;  $N/V$  – плотность электронов проводимости.

Известно [9, 10, 11], что абсолютная величина трибоэлектрического потенциала пропорциональна разности работ выхода электронов  $\delta\phi_F$  с поверхности трения при фрикционном взаимодействии материалов. Так, если разность  $\delta\phi_F$  для никеля по отношению к алюминию составляет 0,25 эВ, то трибоЭДС у этих металлов различается на 50 мкВ. Однако в некоторых случаях контактная трибоЭДС напрямую зависит от работы выхода электронов.

Например, для железа и молибдена работы выхода электронов близки (4,31 и 4,30 эВ, соответственно), а трибоЭДС сильно различается.

При сопоставлении величин трибоЭДС для всех исследуемых металлов составлен ряд, в котором каждый последующий металл более электроотрицателен предыдущего. Для эталона из никеля ряд имеет следующий вид: Fe, Mo, Zn, Al, Cu, Ti, Pb. Этот ряд заметно отличается от рядов Фарадея, Вольта, и Гезехуса [8], что значительно расширяет возможности рационального выбора материалов для металлополимерных пар трения.

Анализ трибоэлектрических характеристик металлов показал, что в сплавах на основе железа можно ожидать изменения трибоЭДС в зависимости от вида легирующего элемента и его

количества в сплаве.

В табл. 4 приведены теплофизические характеристики металлов, наиболее часто применяемых в качестве примесей для металлополимерных пар трения тормозных устройств. При сопоставлении величин параметров ( $\rho$  – плотности;  $c$  – теплоемкости;  $\lambda$ ,  $\alpha$  – коэффициентов теплопроводности и температуропроводности) всех исследуемых металлов составлены ряды. Первый ряд (для  $\rho$ ): Mo, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn, Ti, Al; второй (для  $c$ ): Al, Ti, Fe, Cu, Ni, Zn, Mo, Pb; третий (для  $\lambda$ ): Cu, Al, Mo, Zn, Fe, Pb, Ni, Ti; четвертый (для  $\alpha$ ): Cu, Mo, Zn, Pb, Ni, Fe, Ti; пятый (для температуры Дебая): Pb, Cu, Ni, Mo, Ti, Al, Fe. Полученные ряды используются при определении теплоемкости кристаллической решетки металлов, а также для оценки частоты колебаний их частиц.

Таблица 4

Теплофизические характеристики некоторых металлов

Металл	$t, ^\circ\text{C}$	$T$ Дебая, К	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$
Fe	0	464	7900	0,44	74,5	21,42
	400		9100	0,523	48,5	10,26
	800		10900	0,645	30,8	4,38
Mo	0	380	10250	0,251	141	54,8
	400		10650	0,264	129	45,9
	1000		10750	0,281	104	34,4
Zn	0	300	7150	0,385	112,8	41,0
Al	0	429	2680	0,894	209	87,2
	400		2740	0,913	213	85,1
	300		2810	0,953	225	84,1
	500		2840	0,996	235	83,1
Cu	0	344,5	8950	0,389	393	112,9
	400		9000	0,406	265	100,1
	1000		9150	0,431	326	81,1
Ti	20	420	4500	0,528	15,1	6,36
	100		4500	0,544	15,7	6,41
	300		4500	0,586	16,9	6,41
	500		4500	0,616	18,0	6,49
Ni	0	375	8100	0,427	61,6	17,81
Pb	0	195	7250	0,222	66,0	41,1

**Обсуждение результатов исследований.** Теоретические и экспериментальные исследования взаимосвязи внешнего и внутреннего электротермомеханического трения во фрикционном узле проведены с выделением из его структуры фазовой границы рабочих поверхностей и приповерхностного слоя металлического элемента трения, подвергавшегося динамическому и тепловому нагружению. Это позволило установить:

- закономерности прохождения процессов, явлений и эффектов на нестабильных иерархических уровнях электротермомеханического фрикционного нагружения в трибосопряжении

при увеличении общей энтропии приповерхностных слоев с одновременным уменьшением их свободной энергии при упругом, пластическом и упруго-пластическом контакте;

- работу выхода частиц из микровыступов поверхностей трения металлополимерного сопряжения в зависимости от поверхностной температуры и удельных нагрузок с учетом энергетических уровней приповерхностных слоев пары трения «металл - полимер». Отмечена стабилизация работы выхода частиц при температуре выше 380 °С, т. е. когда имел место крекинг-процесс в приповерхностном слое полимерной накладки. Изучены свойства контактов (омического, нейтрального и блокирующего) и установлено, что пары трения работают при упругом контакте с омическими свойствами в интервале поверхностных температур ниже допустимой для материала полимерной накладки;

- влияние температуры Дебая на энергетический уровень структурных компонентов стали 35ХНЛ, а также частоту колебаний с продольными и поперечными волнами и их взаимодействие в кристаллической решетке.

Использование рядов различных металлов с учетом их основных термодинамических параметров (трибоЭДС, теплофизических характеристик и температуры Дебая) позволяет целенаправленно составлять рецептуру материалов металлических фрикционных изделий с наперед заданными эксплуатационными характеристиками.

**Заключение.** Изучение взаимосвязи внешнего и внутреннего трения в металлополимерной паре с одновременным исследованием дефектов структуры металлического элемента трения с учетом продольных и поперечных амплитуд деформаций, поверхностных и объемных температур и частот колебаний частиц исследуемого материала позволяет получить следующую информацию:

- о расположении дефектов и их взаимодействии в приповерхностном слое, создании в нем локальных напряженно-деформированных зон, способствующих возникновению микротрещин;

- об интенсивности диссипации механической энергии в тепловую энергию, воздействующую на энергетический спектр с продольными и поперечными волнами колебаний частиц в кристаллической решетке, и изменении их амплитудно-частотных характеристик;

- о разнообразии перестроек в микроструктуре металлического элемента трения с учетом трибологических, электронных и теплофизических свойств отдельных компонентов металла и их амплитудно-частотных характеристик.

## REFERENCES

1. **Kragelskij I.V.** Trenie i iznos / I.V. Kragelskij // M.: Mashinostroenie, 1968. – 480 s.
2. **Shevelya V.V., Oleksandrenko V.P., Kalda G.S.** O roli relaksacionnyh yavlenij i substrukturnyh prevrashchenij pri trenii metallov / V.V. Shevelya // *Problems of tribology, Hmelnickij*, 2003, №2 (28). – S. 3-11.
3. **Kurbanov R.A., Dyshchin O.A., Panahova N.D.** Kolebanie na fraktalnoj defektnoj strukture uprugogo tverdogo tela / R. A. Kurbanov // *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*. T.7, №1, 2015. – S. 7-28.
4. Diagnostirovanie kontaktnogo vzaimodejstviya tverdyh tel pri trenii s primeneniem metodov fraktalnogo analiza / A.M. Pashaev, A.Kh. Janahmadov, M.Y. Javadov [i dr.] // *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*. T. 7, №2, 2015. – S. 22-38.
5. **Penkin N.S., Penkin A.N.** Osnovy tribologii i tribotekhniki / N.S. Penkin // Severo-Kavkazskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, Stavropol, 2004, – 223 s.
6. **Janahmadov A.Kh., Volchenko A.I., Volchenko N.A. [i dr.]** Tribologiya: trenie, iznos, smazka. - Baku: «Apostrof - A», 2019. – 640 s.
7. **Fomenko V.S.** Emissionnye svoystva materialov. Spravochnik / V.S. Fomenko. – K.: Naukova dumka, 1981, – 336 s.
8. **Belokur I.P.** Defektoskopiya materialov i izdelij / I.P. Belokur, V.A. Kovalenko – K.: Naukova dumka, 1989. – 192 s.
9. **Grigoryev S.V.** Primenenie termoelektricheskogo metoda sortirovki promyshlennyh stalej / S.V. Grigoryev, N. V. Rusanova, V.M. Ershov. – Sbornik nauchnyh trudov DonGTU. – Alchevsk: Lado, 2008. – №27. – S. 324-329.

10. **Sopronyuk P.M.** Diagnostika materialov i sred. Energeticheskie karakteri-stiki poverhnosti sloev / P.M. Sopronyuk, V.M. Yuzevych. – Lvov: FMI im. G.V. Karpenko NAN Ukrainy, izd-vo «SPOLOM». – 2005. – 292 s. – Na ukr. yaz.
  11. **Kindrachuk M.V., Volchenko A.I., Volchenko D.A., Skrypnik V.S., Voznyj A.V.** Energeticheskie urovni razlichnyh tipov kontaktov mikrovystupov par treniya. *Fiz.-him. mekhanika materialov*. – 2018. – №6. – S. 83-90.
- 

## **FRIKSIÓN DÜYÜNLÖRDƏ XARİCİ VƏ DAXİLİ ELEKTROTHERMOMEXANİKİ SÜRTÜNMƏNİN QARŞILIQLI TƏSİRİ**

A.İ. VOLÇENKO, M.Y. CAVADOV, N.A. VOLÇENKO, İ.Y. ŞİRƏLİ,  
D.Y. JURAVLYOV, P.A. POLYAKOV

Məqalədə əyləcin sürtünən friksion düyünlərində xarici və daxili sürtünmənin qarşılıqlı əlaqəsinə baxılıb. Xarici sürtünmə - sürtünmə cütlərinin səthləri ilə əsas istismar parametrləri arasındakı hissədə: sürtünmənin dinamik əmsalı, xüsusi yüklər, sürtünmə səthinin kələ-kötürlük sinfi və təmas xüsusiyyətləri (omik, bloklayıcı və neytral) nəzərə alınaraq elastik, plastik, elastoplastik təmas zamanı sürüşmə sürəti ilə tədqiq edilib. Mikro kələ-kötürlüklərin onların müxtəlif xüsusiyyətlərlə təması zamanı enerji səviyyələri qiymətləndirilmişdir. Metal-polimer işçi səthinin mikro kələ-kötürlüklərindən çıxan hissəciklərin işi təyin edilmişdir.

Daxili sürtünmə – sürtünmə zamanı metal elementinin və onun üst təbəqəsinin mikro kələ-kötürlüklərinin təmas ləkə nöqtəsində əmələ gələn impuls normal qüvvələrin təsiri zamanı özünü göstərir. Bu təbəqədəki struktur qüsurları və kristal qəfəsin rəqslərinin dinamik və istilik enerjisinin təsiri altında uzununa və eninə dalğalarla vibrasiyası nəzərdən keçirilib.

Məqalədə sürtünmə zamanı metal elementinin onun strukturunun yenidən quruluşunun müxtəlifliyi, həmçinin ayrı-ayrı metal komponentlərinin triboloji, elektron və termofiziki xüsusiyyətləri və onların amplituda-tezlik xüsusiyyətləri nəzərə alınaraq, komponentlərinin tərkibinin seçilməsinə diqqət ayrılmışdır.

**Açar sözlər:** *əyləc, friksion düyün, sürtünmə cütü, işçi səthlərin sahəsinin faza sərhəddi, metal elementinin üst təbəqəsi, xarici və daxili sürtünmə, strukturun qüsurları, dinamik və istilik yüklənməsi, enerji səviyyələri, kristal qəfəs, uzununa və eninə dalğalarla rəqslər.*

## **INTERCONNECTION OF EXTERNAL AND INTERNAL ELECTROTHERMOMECHANICAL FRICTION IN FRICTIONAL UNITS**

A.I. VOLCHENKO, M.Y. JAVADOV, N.A. VOLCHENKO, İ.Y. SHIRALI,  
D.Y. ZHURAVLEV, P.A. POLYAKOV

The article examines the relationship of external and internal friction in friction units of brake friction. The external friction was investigated on the face-to-face interface of friction pair surfaces with the main operational parameters: dynamic coefficient of friction, specific loads, sliding speed at elastic, plastic, elastic-plastic contact, taking into account the class of roughness of friction surfaces and contact properties (ohmic, blocking and neutral). The energy levels of microprotrusions at their contact with different properties are estimated. Operation of particle outlet from microprotrusions of working surfaces of metal-polymer coupling is determined.

The internal friction is manifested by the effect of pulsed normal forces arising on the contact spots of the microprotrusions of the metal friction element and in its near-surface layer. The structure defects in this layer and the vibrations of crystal lattice with the longitudinal and continuous waves under the influence of dynamic and thermal energy are considered.

Attention is paid to the selection of the composition components of metallic friction element taking into account variety of restructuring of its structure, as well as tribo-logical, electronic and thermophysical properties of individual metal components and their amplitude-frequency characteristics.

**Key words:** *brake, friction unit, friction pair, phase boundary of working surfaces interface; near surface layer of metal element, external and internal friction, structure defects, dynamic and thermal loading, energy levels, crystal lattice, oscillation with longitudinal and transverse waves.*

---

<i>Поступило:</i>	<i>30.03.2020</i>
<i>После доработки:</i>	<i>14.12.2020</i>
<i>Принято к публикации:</i>	<i>18.12.2020</i>