

Вестник научно-технического развития

Bulletin of Science and Technical Development

Номер 169, 2023г.

DOI: 10.18411/vntr2023-169



Издается с 2007 года

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации Эл. № ФС77-29768.

ISSN 2070-6847

*Журнал выпускается под научным руководством Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН*

ОГЛАВЛЕНИЕ № 169, 2023

Расим Султанович Ахметханов, Евгений Федорович Дубинин, Александр Анатольевич Шульженко. Некоторые результаты исследований тепловых полей графитового стержня...
.....стр. 3 - 13

Лидия Ивановна Куксенова, Дмитрий Александрович Козлов. Анализ зависимости триботехнических свойств медных сплавов от структурно-фазовых превращений в поверхностном слое.....стр. 14 – 28

*Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации Эл. № ФС77-29768.*



ISSN 2070-6847

УДК 663.952.1

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ГРАФИТОВОГО СТЕРЖНЯ

© Расим Султанович Ахметханов, Евгений Федорович Дубинин,
Александр Анатольевич Шульженко
Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия
mibsts@mail.ru, aa_shulzhenko.01@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования тепловых свойств графитового стержня (грифеля). Были получены тепловые поля, отличающиеся своими характеристиками, при различных уровнях приложенного напряжения постоянного тока. Структура теплового поля менялась с изменением приложенного напряжения, изменялись и статистические характеристики теплового поля, что свидетельствует о неоднородности электрических свойств углеродного стержня, а также о влиянии технологического процесса их изготовления.

Ключевые слова: углеродный (графитовый) стержень, тепловое поле, кластеризация, связность Минковского, статистические характеристики, фрактальный размер.

SOME RESULTS OF STUDIES OF THERMAL FIELDS OF A GRAPHITE ROD

© R.S.Akhmetkhanov, E.F.Dubinin, A.A.Shul'zhenko
Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Moscow, Russia
mibsts@mail.ru, aa_shulzhenko.01@mail.ru

Abstract. The paper presents the results of the study of the thermal properties of a graphite rod (lead). Thermal fields with their own characteristics were obtained at different levels of the applied DC voltage. The structure of the thermal field changed with the change of the applied voltage, the statistical characteristics of the thermal field also changed, which showed the heterogeneity of the electrical properties of the carbon rod and also the influence of the technological process of their production.

Keywords: carbon (graphite) rod, thermal field, clustering, Minkowski connectivity, statistical characteristics, fractal size.

При расчете теплового поля, создаваемого объектом, обычно применяют идеализацию геометрии, свойств материала, например, используют цилиндрическую модель для объектов, имеющих конфигурацию близкую к цилиндрической проволоке. Однако при проведении испытаний реальное тепловое поле часто значительно отличается от расчетного.

Существенно то, что тепловое поле любого материала отражает структуру этого материала [1].

На рис.1 приведено расчетное тепловое поле указанной модели тепловыделяющего элемента в виде стержня [2].

В реальности тепловое поле выглядит иначе. На рис. 2а приведено тепловое поле графитового стержня, а на рис. 2б – углеродной нити.

Тепловое поле графитового стержня более гладкое с характерными волнами температурных изменений по длине стержня. Эти два рисунка показывают зависимость характеристик теплового поля от структуры материала, которая не учитывается при идеализации объекта исследования и теплофизических свойств материала объекта исследования.

При различном уровне подведенного постоянного напряжения статистические характеристики теплового поля изменяются.

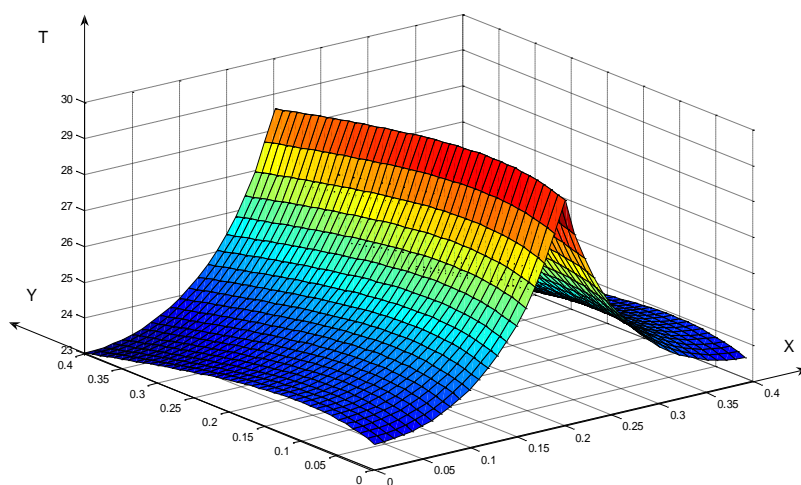
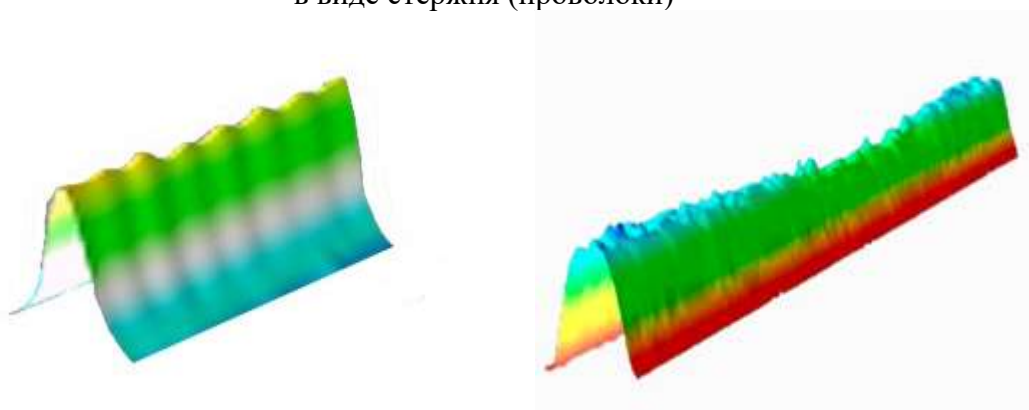


Рис. 1. Суммарное расчетное тепловое поле идеализированного тепловыделяющего элемента в виде стержня (проволоки)



а

б

Рис. 2. Трехмерное изображение теплового поля графитового стержня (а) и углеродной нити (б)

Например, в ранее рассмотренной углеродной нити, которая обычно состоит из нескольких тысяч филаментов, располагающихся по сечению нити. Макроструктура углеродной нити неоднородна, и как было показано [1], она представляет собой фрактальную структуру. Основным принцип распределения филаментов по сечению носит случайный характер. Случайный характер в структуре имеет и распределение филаментов вдоль нити, так как длины филаментов разные, чаще всего короче длины нити, используемой в качестве тепловыделяющего элемента в нагревателе. При воздействии на нить различных напряжений источника постоянного электрического тока происходит изменение сил взаимодействия между филаментами. В результате происходит изменение расположения филаментов как по сечению нити, так и по длине. Изменения в макроструктуре, взаимное расположение филаментов, влияют как на электрические, так и на тепловые характеристики углеродной нити, например, на максимальную температуру [1,3].

Предметом исследований в данной работе является изучение поведения структуры графитового стержня (грифеля), имеющего круглое сечение. Методика исследования предполагает проведение анализа тепловых полей, создаваемых графитовым стержнем под воздействием различного уровня напряжения от источника постоянного электрического тока.

При рассмотрении результатов экспериментов следует учесть, что графит является полупроводниковым материалом. Согласно [4], тепло передается благодаря фонон-фононному взаимодействию, носящему равновесный характер при некоторой внешней температуре. При воздействии внешнего источника энергии происходит процесс возбуждения неравновесных фононов. Это воздействие приводит не только к изменению температуры, но и смещению максимума частотного спектра всех фононов в сторону более высоких частот. При подаче на графитовый стержень возрастающего напряжения от внешнего источника происходит не только генерация дополнительных фононов, но и изменение их распределения по частоте, смещение максимума количества участвующих в процессе фононов в сторону больших частот. Это явление влияет на формирование теплового поля грифеля, и, следовательно, на структурные изменения, происходящие при изменении напряжения, которые выводятся из состояния теплового поля грифеля.

Рассмотрим более подробно структуру графитового стержня, грифеля. Грифель является композиционным материалом, где наполнителем является графит, а матрица состоит из глины. Как известно, электропроводность чувствительна к изменениям в структуре композиционного материала. При рассмотрении тепловыделяющих элементов на основе графита наряду с электрическими свойствами следует учитывать теплофизические характеристики компонентов материала, существенно влияющие на создаваемые тепловые поля.

Графит, который является наполнителем в грифеле, встречается в природе в виде минерала, но его можно и синтезировать. Он довольно мягкий и имеет серовато-черную окраску с маслянистым блеском, хорошо проводит электрический ток. Кроме того, графит обладает превосходными смазочными свойствами и поэтому используется как смазочное средство в движущихся частях машин. Обожженная смесь графита с глиной используется для изготовления карандашных грифелей. Хорошая электропроводность графита позволяет применять его для изготовления электродов.

Оксиды алюминия и оксиды кремния составляют значительную часть химического состава глины жёлтого, коричневого, синего, зелёного, лилового и даже чёрного цветов. Глины имеются повсюду, что и неудивительно – глина, осадочная порода, – это камень, перетертый временем и внешними воздействиями до состояния порошка, последняя стадия эволюции камня (камень – песок – глина).

Электропроводимость грифеля зависит от количества порошка графита, однородности смеси, подготовленной для формовки, и особенностей технологии формообразования.

Грифель карандаша производится из смеси порошков графита и специальной глины. Сам же графитовый порошок изготавливается из глинистого сланца. Он представляет собой уплотненную глину с метаморфическими изменениями. Графитовый порошок состоит из мелких глинистых минералов, не размокает в воде, цвет его может быть черным, темно-серым, иногда красноватым или зеленоватым. Если рассматривать его под микроскопом, то можно увидеть там и кристаллы серного колчедана, и прожилки кварца, и зерна известкового шпата. Кроме того, в структуре материала есть вкрапления в виде зерен кварца, листочков слюды, иголочек рутила и др. В зависимости от минералогического состава и его физических свойств различают следующие виды глинистого сланца: кровельный, аспидный, грифельный, точильный, рисовальный и квасцовый сланец. В нашем случае используется грифельный сланец.

Смесь графита и грифельного сланца тщательно перемешивается с водой, потом высушивается, затем снова перетирается в порошок, а в конце вновь добавляется небольшое количество воды до образования густой пасты. От соотношения графита и глины (сланца) в этой пасте будет зависеть твердость карандаша. Что, в свою очередь, зависит не только от общего соотношения графита и глины (сланца) в пасте образца, а и от технологического процесса, влияющего на это соотношение в локальных частях образца. Затем эта паста поступает на специальное оборудование, похожее на экструдер. Графитовая паста продавливается через формообразующие отверстия штампа и на выходе можно увидеть всем знакомый стержень карандаша. Получившуюся заготовку грифеля просушивают. Затем обжигают при высоких температурах в специальной печи. Во время обжига графит и глина соединяются, а стержень твердеет. Чем выше температура обжига – тем тверже будет карандаш. Чем меньше глины в составе грифеля и чем меньше температура обжига – тем карандаш будет мягче.

Приведенное тепловое поле грифеля на рис. 2а показывает наличие волнообразного изменения электрических и тепловых свойств по его длине, как результат особенностей технологического процесса изготовления.

В проведенном исследовании грифель подключался к источнику постоянного тока. Подавались напряжения различного уровня: от 5В и до 20В. В таблице 1 и на рис. 3 и 4 приведены данные по эксперименту.

Изображения тепловых полей при этих значениях напряжений были получены с помощью тепловизора с разрешением 240x360.

Таблица 1

Характеристики теплового поля грифеля при различном уровне подведенного напряжения

Характеристики	Подведенное напряжение, В			
	5	10	15	20
Ток в грифеле, А	0,03	0,07	0,11	0,16
Максимальная температура, °С	28,7	48,1	79,4	116,6
Сопротивление грифеля, Ом	166,66	142,86	136,36	125,0
Фрактальная размерность теплового поля, D	2,448	2,242	2,377	2,472
Среднеквадратическое отклонение, ρ_k	24,504	30,39	25,377	20,021
Математическое ожидание, ρ_k	123,685	129,923	143,562	150,268
Коэффициент вариации, %	19,81	23,39	17,68	13,32

При росте электрического напряжения на рис. 3 виден рост электрического тока, а на рис. 4 наблюдаются падение электрического сопротивления с 166,66 Ом при 5В до 125 Ом при 20В напряжения и рост температуры, что соответствует свойствам полупроводников (уменьшение электрического сопротивления на 24,99%). При этом шаг изменения напряжения 5В, а уменьшение электрического сопротивления происходит не пропорционально этому изменению.

Температура окружающей среды 22,2°C, гистограммы распределения температур показаны на рис. 5.

Наилучшие статистические данные по температурному распределению показало тепловое поле при 20В – имеет наименьший коэффициент вариации 13,32%, а наихудший показатель при напряжении 10В – 23,39%.

Температурные распределения визуально не похожи друг на друга, отличаются и в статистических характеристиках распределения – стандарт (среднеквадратичное отклонение), медианное (срединное значение) и математическое ожидание. Среднеквадратичное отклонение наибольшее при напряжении в 10В.

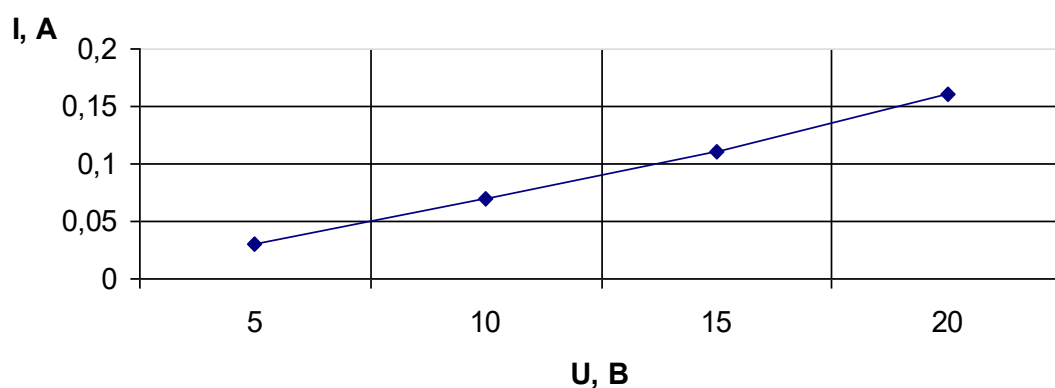


Рис. 3. График зависимости электрического тока в графитовом стержне от изменения уровня электрического напряжения

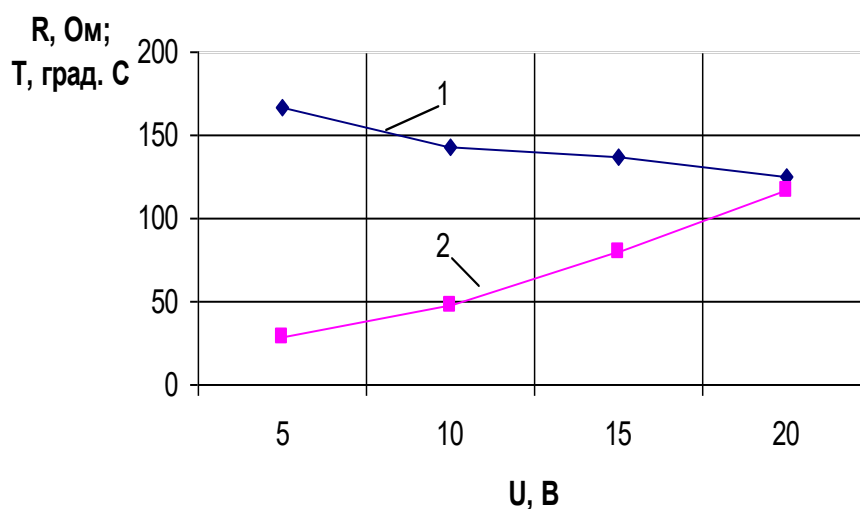


Рис. 4. Графики зависимости электрического сопротивления (1) и температуры (2) от уровня электрического напряжения

Рассмотрим фрактальные оценки изображений теплового поля. Фрактальная геометрия используется для описания самоподобных множеств, называемых фракталами [5]. Фрактальная размерность характеризует неравномерность и сложность структуры множества и является важной метрикой для анализа изображений с самоподобной структурой. Например, в работе [6] рассматриваются различные алгоритмы измерения фрактальной размерности, и производится численная оценка фрактальной размерности неподвижных цветных и черно-белых изображений двумя методами: методом триангуляции и дифференциальным методом подсчета клеток. Показано, что рассматриваемые методы оценки дают удовлетворительные результаты, погрешность которых не превышает 5%. Для практического использования рекомендуется использовать среднее арифметическое значений фрактальной размерности, найденных методом триангуляции и дифференциальным методом подсчета клеток.

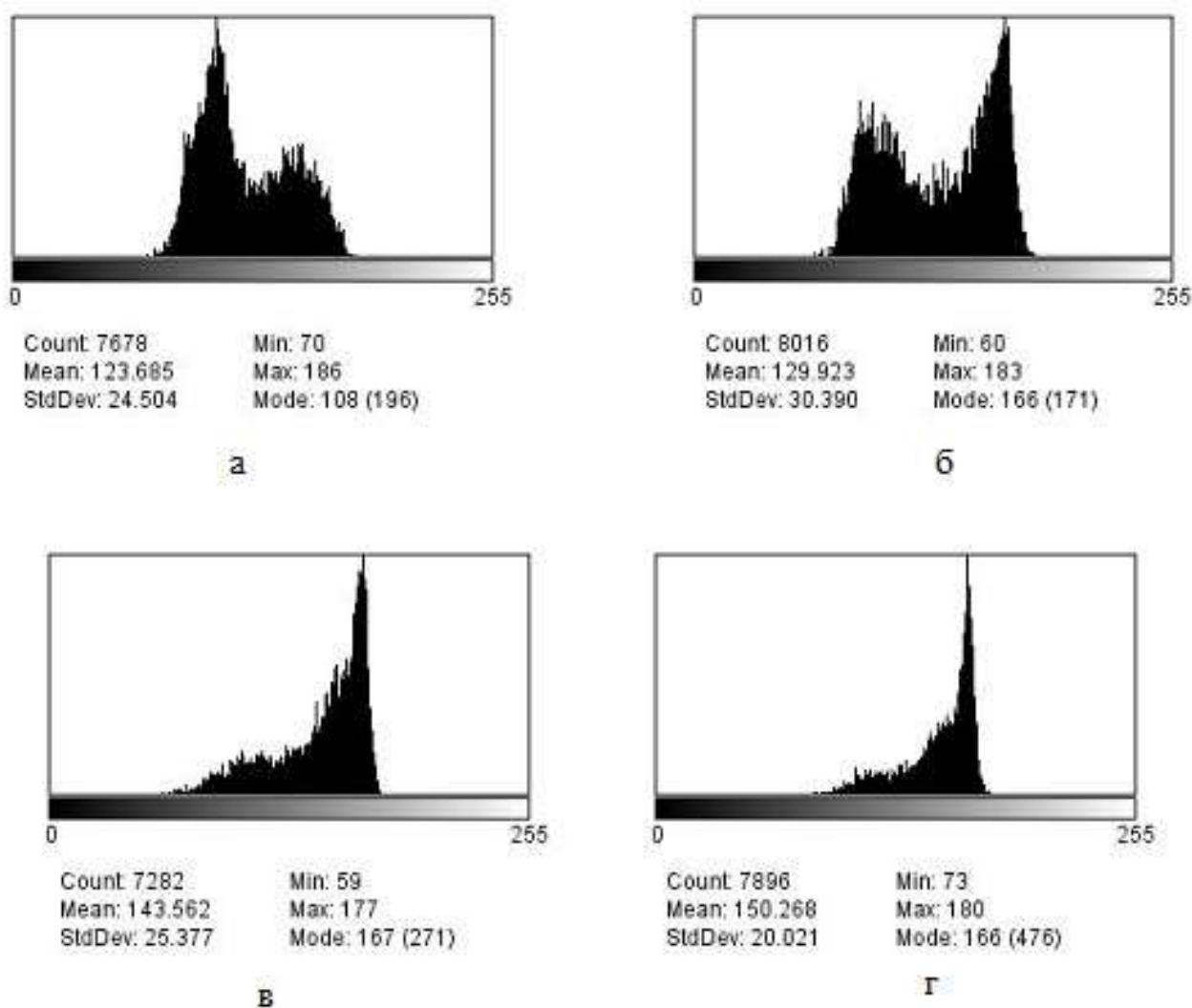


Рис. 5. Гистограммы распределения температур в тепловом поле графитового стержня: а – 5В; б – 10В; в – 15В и г – 20В

В нашем исследовании изображений тепловых полей используем результаты этих двух методов определения фрактальной размерности. Были получены следующие фрактальные размерности изображений теплового поля грифеля: 2,511, 2,507, 2,365 и 2,4482 [7]. Из сравнения этих величин следует, что гладкость профиля поверхности теплового поля несколько лучше при напряжении 15В.

Рассмотрим профили линий (рис.6), которые проходят вдоль стержня по оси симметрии изображения по вертикали. Они отличаются друг от друга. В зависимости от поданного напряжения меняется распределение температуры по линии профиля.

Рассмотрим структуру теплового поля графитового стержня – срединной области поля (рис. 2а). Для этого используем метод кластеризации изображения – определение близких областей с одинаковыми тепловыми характеристиками (температурами). Используем метод кластеризации K -средних, это простой метод разделения множества данных на K различных непересекающихся кластеров. Для выполнения кластеризации сначала нужно определить желаемое число кластеров K , затем алгоритм K -средних будет относить каждое наблюдение в точности к одному из K кластеров. Для своих исследований мы выбрали 10 кластеров. На рис. 7 приведены изображения этих кластеров по тепловому полю грифеля. Изображения тепловых полей использовались в области максимальных температур (центральная область теплового поля). Визуально видно, что изображение при подведенном напряжении 15В имеет структуру теплового поля более однородную, с мелкими кластерами. Если визуально изображения кластеров на рис. 7а и 7б похожи друг на друга, то изображение теплового поля на рис.7в отличается от них.

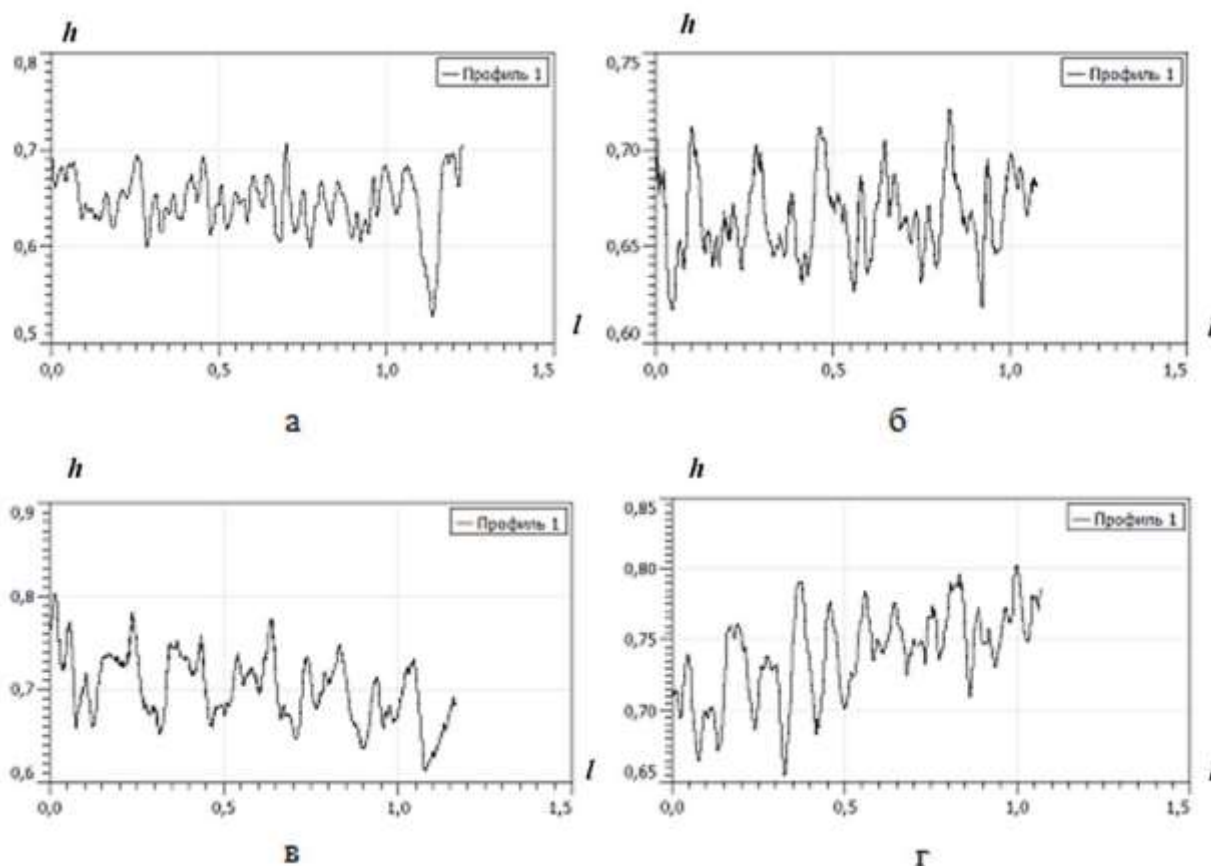


Рис. 6. Распределение температур по линии в относительных единицах h (профиль центральной линии теплового поля) при подведенном напряжении:

а – 5В, б – 10В, в – 15В, г – 20В

Для того чтобы определить различия в распределении кластеров по уровню температуры рассмотрим функцию связности Минковского, которая определяет отношение количества кластеров с различным уровнем температуры в диапазоне изменений от минимальной температуры и до максимальной в уровнях окрашенности пикселей.

На рис. 8 приведены графические изображения функции связности Минковского χ [7] для изображения тепловых полей при различном напряжении. Функции связности не являются гладкими, в отличие от гладких функций связности для однородных изображений [8]. Но при напряжении 15В она более приближена к гладкой функции связности. Это значит, что структура изображения более равномерная. Функции связности квазисимметричны. Максимальные значения функции связности χ отличаются незначительно. Срединная нулевая точка связности χ в районе (0,65-0,75) относительного температурного диапазона тепловых полей в окрашенности пикселей серого формата при различном напряжении (температурный диапазон в используемом относительном формате $z = 0 \dots 1,0$).

Изменения в температурном поле графитового стержня от подаваемого напряжения объясняются тем, что грифель является композиционным материалом, структура грифеля двухкомпонентна – матрица глина, наполнитель графит. У этих материалов физические свойства отличны друг от друга – электропроводность, теплопроводность, теплоотдача и тепловое расширение. К тому же электрическая проводимость монокристаллов графита анизотропна; в направлении, параллельном базисной плоскости, близка к металлической, в перпендикулярном – в сотни раз меньше. Минимальное значение проводимости наблюдается в интервале 300-1300К, причём положение минимума смещается в область низких температур для совершенных кристаллических структур. Наивысшую электрическую проводимость имеет рекристаллизованный графит.

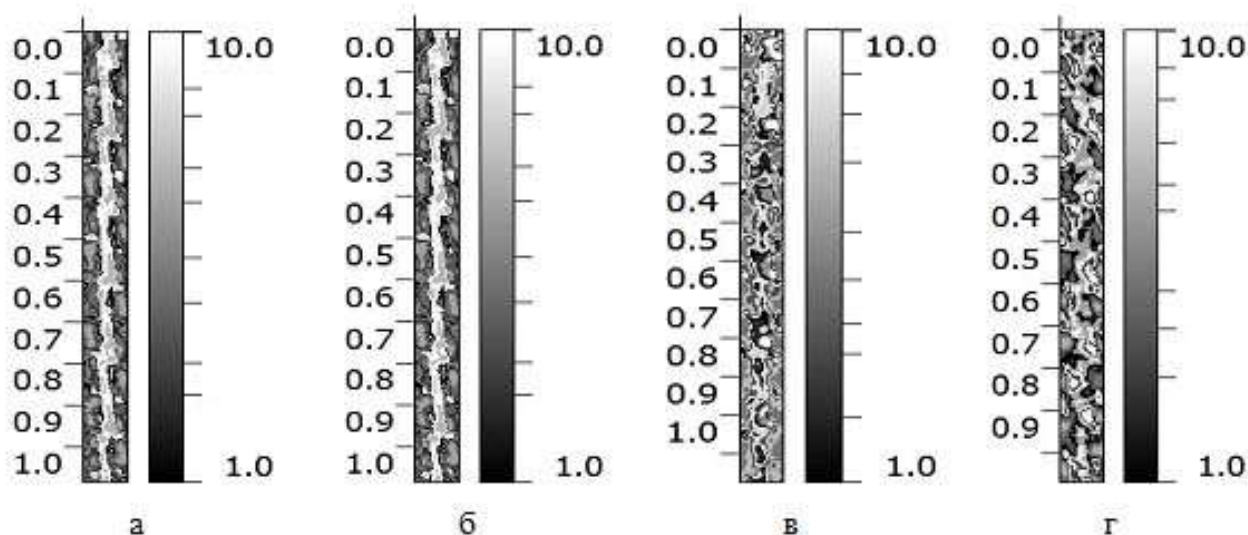


Рис. 7. Изображения распределения кластеров тепловых полей графитового стержня при различном уровне подведенного напряжения U : а – 5В, б – 10В, в – 15В, г – 20В

Коэффициент теплового расширения графита до 700К отрицателен в направлении базисных плоскостей (графит сжимается при нагревании), его абсолютное значение с повышением температуры уменьшается. Выше 700К коэффициент теплового расширения становится положительным. В направлении, перпендикулярном базисным плоскостям, коэффициент

теплового расширения положителен, практически не зависит от температуры и более чем в 20 раз выше среднего абсолютного значения для базисных плоскостей.

«Глинистые» материалы представляют собой сложные соединения из алюминия, кремния и воды. Они не только включают воду в свою структуру (такая вода называется химически связанной), но и удерживают ее в виде прослоек между частичками (такую воду называют физически связанной). В глине есть примеси таких веществ, как карбонат кальция, кварц, сульфид железа, гидроксид железа, оксид магния, оксид кальция и т.д. В зависимости от химического состава, выделяют такие глинистые материалы, как каолиниты, галлуазиты, иллиты и монтмориллониты.

Исходя из предназначения сырья, его нормируют в зависимости от того, каков процент оксидов железа, кварцевого песка, различных примесей. Степень огнеупорности материала зависит от содержания в нем глинозема.

Изменение электрического сопротивления графита в диапазоне изменения максимальной температуры стержня (при напряжении в интервале от 5В и до 20В) приблизительно на 10% [9]. Объяснение данного эффекта было дано выше. А у грифеля электрическое сопротивление в эксперименте изменилось на 24,99%. Эти отличия объясняются тем, что протекающий через систему электрический ток заставляет, с одной стороны, так ориентироваться частицы графита, что направление, в котором их проводимость максимальна, стремится приблизиться к направлению силовых линий электрического поля [10]. С другой стороны, степень неоднородности материала и тепловые процессы (тепловое расширение глины) влияют на проводимость. Описание этих эффектов возможно в рамках теории перколяции, фиксирующей порог проводимости [11] и ее изменение при определенном значении концентрации частиц графита.

Такое изменение электрического сопротивления вполне реально при различных соотношениях между неоднородностями (наполнителя и матрицы) в структурированных материалах, т.е. зависит от внешних и внутренних условий.

Теория перколяции (теория протекания или теория просачивания) – математическая теория, используемая в физике, химии и других областях науки для описания возникновения связанных структур в случайных средах (кластерах), состоящих из отдельных элементов [12].

Теория перколяции является наиболее общим подходом к описанию процессов переноса в неупорядоченных системах. В качестве примера перколяции в непрерывной среде может выступать прохождение жидкости через объёмный пористый образец (например, воды через губку из пенообразующего материала), в котором происходит постепенное надувание пузырьков до тех пор, пока их размеров не станет достаточно для просачивания жидкости от одного края образца до другого.

Совокупность элементов, по которым происходит протекание (воды, электричества, газа и т.д.), называется перколяционным кластером. Будучи по своей природе связным случайным графом, в зависимости от конкретной реализации он может иметь различную форму. В нашем случае при подведении напряжения каждого различного уровня образуется свой упорядоченный перколяционный кластер, тому способствуют различные физические свойства (электрическое сопротивление, теплоотдача, тепловое расширение) структурного состава грифеля.

Электрическое сопротивление грифеля уменьшается при повышении напряжения. Эта зависимость нелинейная. Полученные данные экспериментов с грифелем показали, что его электрические свойства зависят от концентрации частиц графита и их ориентации в стержне грифеля и подаваемого напряжения.

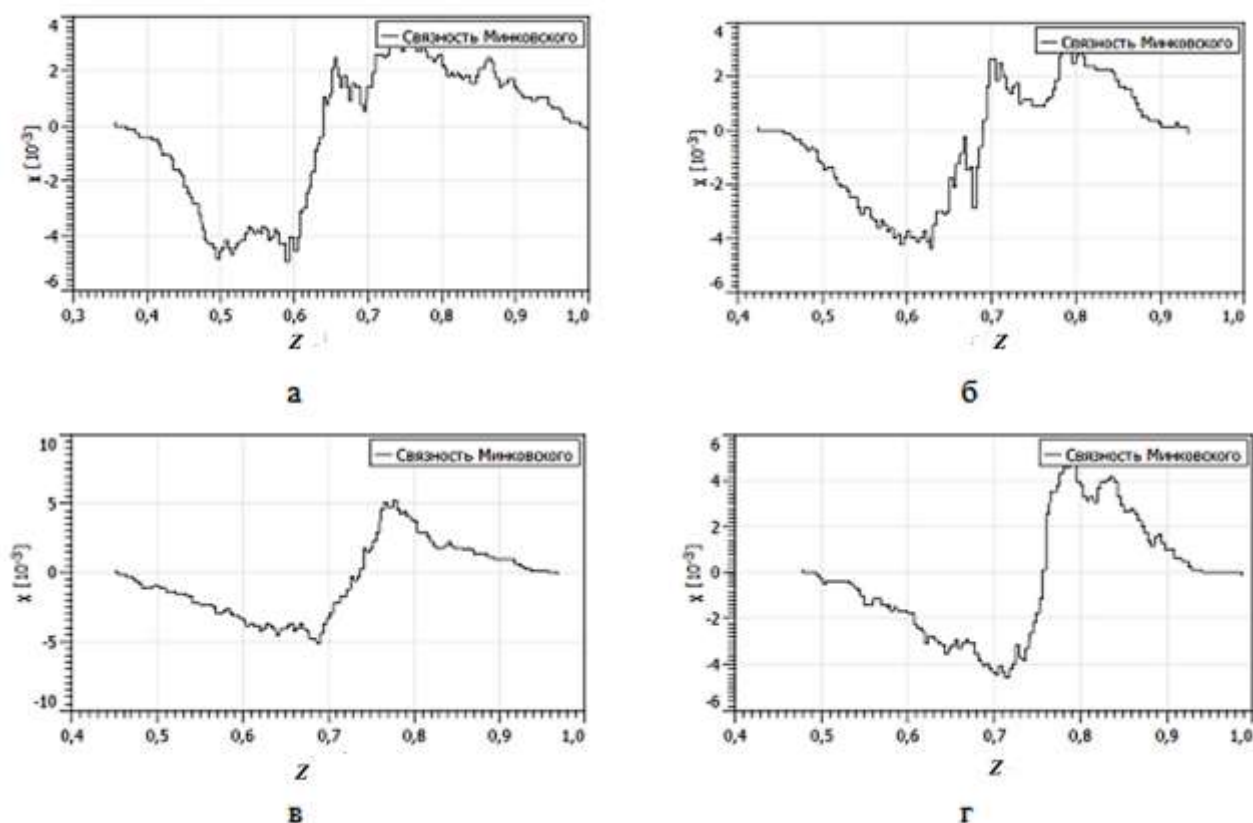


Рис. 8. Функции связности Минковского χ при различном уровне постоянного подведенного напряжения U : а – 5В, б – 10В, в – 15В, г – 20В

Выводы. Из полученных данных видно, что в зависимости от подведенного напряжения меняются характеристики теплового поля графитового стержня – из-за разных теплофизических свойств глины и изменяющейся электропроводности графита структура грифеля изменяется в зависимости от температуры самого стержня – меняется перколяционная структура электрической проводимости графитового стержня. С повышением подводимого напряжения сопротивление грифеля снижается, что соответствует свойствам полупроводниковых материалов.

Наиболее однородно тепловое поле для грифеля в выбранном диапазоне подводимого напряжения при 20В, а гладкость изменений температурного профиля линий по центру изображения грифеля проявилась при напряжении 15В. Это наглядно видно по функции связности Минковского и самому температурному профилю.

Также получено характерное изменение теплового поля вдоль стержня грифеля – волнообразное изменение электрического сопротивления, которое зависит от процесса экструдирования – волнообразное изменение плотности грифеля и как следствие этого волнообразное изменение локального электрического сопротивления.

По своей структуре грифель является композиционным материалом, у которого физические свойства зависят от параметров наполнителя и матрицы, их взаимодействия в электрическом и тепловом поле.

Список литературы

1. Ахметханов Р.С., Шульженко А.А. Анализ особенностей тепловых полей углеродных нитей разных типов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2021. – № 4. – С. 103 – 112.
2. Шульженко А.А., Андрианов Н.А., Модестов М.Б. Особенности работы тепловыделяющего элемента на основе углеродной нити // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. – № 2. – С. 97 – 103.
3. Ахметханов Р.С., Шульженко А.А. Электропроводность и фрактальные свойства углеродных нитей // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2019. – № 6. – С. 99 – 105.
4. Гуревич А.Г. Физика твердого тела. Учебное пособие для вузов. – С-Пб.: Невский Диалект, 2004. – 320 с.
5. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. – Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2001. – 528 с.
6. Шелухин О.И., Магомедова Д.И. Анализ методов измерения фрактальной размерности цветных и черно-белых изображений // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2017. – Т. 9, № 6. – С. 6 – 16.
7. Клапетек П., Нечас Д., Андерсон К. Руководство пользователя Gwyddion: [сайт]. – 2004 – 2023. – URL: <http://gwyddion.net/documentation/user-guide-ru> (дата обращения: 22.03.2023).
8. Ахметханов Р.С. Фотометрический метод анализа многокомпонентных сред и конструкционных материалов // Вестник научно-технического развития. – 2022. – № 2 (165). – С. 1 – 11.
9. Физические свойства графита при заданной температуре (таблица) // Infotables.ru. Справочные таблицы: [сайт]. – 2014 – 2023. – URL: <https://infotables.ru/materialy/487-fizicheskie-svoystva-grafita-tablitsa> (дата обращения 22.03.2023).
10. Кенжалиев Б.К., Черноглазова Т.В., Мофа Н.Н., Дегтярева А.С., Курапов Г.Г., Сулейменов Э.Н. Локализация пластической деформации и неравновесные структурно-деформационные превращения. Избранные труды. – Алматы: Комплекс, 2004. – 271 с.
11. Аракелян С.М., Антипов А.А., Кучерик А.О., Кутровская С.В., Бухаров Д.Н. Особенности электропроводности наноструктурированных систем: учебное пособие. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2015. – 108 с.
12. Эфрос А.Л. Физика и геометрия беспорядка. – М.: Наука, 1982. – 268 с.

Дата поступления: 22 мая 2023 г.

УДК621.891

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕДНЫХ СПЛАВОВ ОТ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ

Лидия Ивановна Куksenова, Дмитрий Александрович Козлов

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
им. А.А.Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Россия*

lkukc@mail.ru, koslov74@mail.ru

***Аннотация.** Рассмотрены триботехнические характеристики пар трения медный сплав – сталь и сталь – сталь при испытаниях в разных смазочных средах. Основываясь на особенностях структурно-фазовых превращений, являющихся вследствие процесса восходящей диффузии, стимулированной внутренними напряжениями в материале в зоне контактной деформации, сформулированы рекомендации по составу медных сплавов для реализации износостойкого структурного состояния. С позиций реализации правила положительного градиента механических свойств материала зоны контактного взаимодействия проанализирована тенденция улучшения триботехнических характеристик пар трения сталь – сталь после обработки поверхности методами электроискрового легирования бронзой и имплантации ионов меди. Структурные принципы формирования износостойкого состояния материала зоны контактной деформации состоят из микромодифицирования подповерхностных слоев и формирования тонкого покрытия меди, которое, благодаря активному воздействию смазочной среды, подвергается пластифицированию. Этот эффект возрастает с увеличением контактного давления. Покрытие меди, которое характеризуется особым структурным состоянием, формируется как при использовании в контакте медного сплава, так и в парах сталь-сталь, когда поверхность одного из составляющих пары подвергается предварительной обработке с созданием поверхностно-модифицированного слоя меди или медного сплава, а также применяется эффект металлоплакирования.*

***Ключевые слова:** медные сплавы, покрытия, триботехнические характеристики, износ, повреждаемость, поверхность, металлоплакирующие смазочные материалы.*

ANALYSIS OF THE DEPENDENCE OF THE TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF COPPER ALLOYS ON STRUCTURAL-PHASE TRANSFORMATIONS IN THE SURFACE LAYER

L.I. Kuksenova, D.A. Kozlov

*Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Mechanical Engineering named after
A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAS), Moscow, Russia*

lkukc@mail.ru, koslov74@mail.ru

Abstract. *The tribotechnical characteristics of friction pairs copper alloy - steel and steel - steel during tests in different lubricating media are considered. Based on the features of structural-phase transformations, which are due to the process of ascending diffusion stimulated by internal stresses in the material in the contact deformation zone, recommendations are formulated for the composition of alloys for the implementation of a wear-resistant structural state. From the point of view of the implementation of the rule of the mechanical properties the positive gradient of the contact interaction zone material, the trend of improving the tribotechnical characteristics of friction pairs steel - steel after surface treatment by electrospark alloying with bronze and by implantation of copper ions is analyzed. The structural principles of the formation of the wear-resistant state of the contact deformation zone material consist of micromodification of subsurface layers and the formation of a thin copper coating, which due to the active influence of the lubricating medium undergoes plasticization. This effect increases with increasing contact pressure. The copper coating, which is characterized by a special structural state, is formed both when using a copper alloy in contact, and in steel-steel pairs, when the surface of one of the components is subjected to pre-treatment to create a surface-modified layer of copper or copper alloy, as well the metal cladding effect is applied.*

Keywords: *copper alloys, coatings, tribotechnical characteristics, wear, damageability, surface, metal-cladding lubricants.*

Введение. Проблема повышения надежности, долговечности и безопасности эксплуатации машин тесно связана с задачами обеспечения работоспособности узлов трения, износостойкости конструкционных материалов, их поверхностной прочности. При этом в общей проблеме ресурса работоспособности изделий особая роль принадлежит поверхностным слоям, которые оказывают существенное влияние на процессы хрупкого и усталостного разрушения, ползучести, схватывания материалов, а в условиях контактного взаимодействия, трения и изнашивания они являются определяющими [1,2].

Нарушение работоспособности узла трения может происходить в результате комплексного воздействия ряда факторов на поверхность трения: изнашивания (которое может быть механическим, коррозионно-механическим, абразивным и др.); усталостных процессов (вязкого или хрупкого излома); коррозии (атмосферной, в электролитах, газовой, контактной и др.). Так как процессы трения и износа реализуются в поверхностных слоях сопряжений, то основным решением проблем их работоспособности является как научно-обоснованный выбор составов применяемых антифрикционных материалов и совместимых смазочных материалов, так и применение упрочняющих и модифицирующих технологий обработки поверхности трущихся тел. Следует заметить, что для технических приложений понятие поверхности определяется понятием поверхностный слой или поверхностный микрообъем, размер которого по нормали к свободной поверхности составляет доли миллиметра. Опыт реальной эксплуатации свидетельствует, что сочетание указанных подходов к решению триботехнических задач с позиций законов трибологии является средством повышения показателей ресурса и надежности изделия в целом.

Фундаментальные представления о правилах выбора материалов триботехнического назначения лежат в основе материаловедческого аспекта снижения трения и изнашивания, связанного с оптимальным структурным состоянием сплавов, наличием в них гетерофазных структур, обеспечивающих высокую износостойкость. Подбирая сочетания конструкционных и смазочных материалов, необходимо предусматривать условия для реализации положительного градиента механических свойств по нормали к поверхности трения. В этом случае сдвиговые деформации концентрируются в тонком приповерхностном

слое материала, что обеспечивает минимальную интенсивность изнашивания сопряжения [3,4].

Медные сплавы находят широкое применение в качестве антифрикционных материалов в разных парах трения. В результате того, что при эксплуатации пар трения медный сплав – сталь в условиях граничного трения, как правило, обеспечивается правило положительного градиента свойств поверхностного слоя, применение сплавов и покрытий на основе меди постоянно расширяется. Распространено применение меди, например, в композитных материалах триботехнического назначения. Благодаря меди достигается существенное позитивное изменение механизма формирования топографии поверхности [5]. Покрытия меди, созданные методом гальванического осаждения, обеспечивают снижение потерь на трение и износ пар скольжения [6], а медные покрытия, полученные газодинамическим напылением, предотвращают схватывание [7]. Распространение получила финишная антифрикционная безабразивная обработка, которая заключается в нанесении на поверхности трения стальных и чугунных деталей тонкого слоя мягкого металла (меди, латуни, бронзы) для придания материалам антифрикционных свойств и повышения долговечности пар трения [8]. Известна практика применения меди в качестве легирующего элемента в порошковых покрытиях, полученных направленным высокоэнергетическим воздействием, в частности, лазерной обработкой [9], электроискровым легированием [10].

Для тяжело нагруженных пар трения в проблеме износостойкости и антифрикционности наиболее эффективным проявил себя подход, основанный на том, что в условиях штатной эксплуатации в металлоплакирующих смазочных средах происходит микромодифицирование поверхности металлосодержащими продуктами (на основе мягких металлов Cu, Pb, Sn, бронз, латуней), которые, находясь в зоне контактирования под воздействием выделяемой при трении энергии формируют микропокрытия, локализуя сдвиговые деформации в более мягком материале и предотвращая схватывание [11].

В данной работе представлены результаты сравнительной оценки износостойкости антифрикционных медных сплавов, покрытий и пленок на основе меди и их анализ с позиций способности материалов реализовывать правило положительного градиента механических свойств в нагруженном трибосопряжении. Описаны три группы лабораторных испытаний: 1 – в качестве основного антифрикционного материала использовали медь и медные сплавы (латуни, бронзы); 2 – изучали покрытия на основе медных сплавов, напыленных методом электроискрового легирования, и модифицированные слои, полученные методом имплантации ионов меди в сталь; 3 – пары сталь–сталь, на поверхности трения которых формировались пленки на основе меди при трении в среде поверхностно-активного медьсодержащего металлоплакирующего смазочного материала.

Материалы и методики исследования. В группе лабораторных испытаний 1 исследовали пару трения медный сплав – сталь. В качестве антифрикционного сплава использовали медь, сплавы на основе Cu-Zn, Cu-Al, Cu-Sn. В качестве смазочного материала применяли глицерин, минеральные масла, гидравлические жидкости на основе глицерина и пластичные смазочные материалы, в состав которых входили ПАВ. Триботехнические испытания проводили на машине реверсивного трения МТ-8 в диапазоне давлений до 40 МПа и средней скорости скольжения 0,19 м/сек. Условия испытаний характеризуют тяжело нагруженные трибосопряжения: рабочие поверхности испытывают воздействие знакопеременных сдвиговых деформаций, что обуславливает повышенную концентрацию дефектов кристаллического строения материала зоны деформации. При этом имеет место

интенсификация механохимических процессов и эффекта пластифицирования на поверхностях реверсивного трения [12].

Сравнительная триботехническая эффективность покрытий, полученных методом электроискрового легирования, и модифицированных слоев после имплантации ионов меди (группа 2) оценивалась по испытаниям на лабораторных установках КЕ-4 и УМТ-1 и специальном стенде, моделирующем эксплуатацию шарнирно-болтовых соединений при давлениях до 350 МПа.

В группе 3 испытывали стальные пары трения в трех смазочных материалах: в пластичной литиевой смазке Буксол, являющейся наиболее распространенной при эксплуатации буксовых узлов; в полужидкой литиевой смазке Пума, применяющейся для смазывания пары колесо – рельс; в моторном масле М-14В₂, используемой в дизелях. Эти смазочные материалы испытывались с медьсодержащей металлоплакирующей присадкой Валена (ТУ 0257-001-17368431-05). Следует заметить, что вопрос об антогонизме и синергизме разных противоизносных присадок к смазочным материалам мало изучен [13]. Трудность заключается в том, что антогонизм и синергизм даже однотипных по эксплуатационным свойствам присадок есть комплексное явление, затрагивающее проблемы различных, далеких друг от друга областей знаний. Поэтому в практике исследований с целью оценки совместимости присадок применяется эмпирический подход, что было сделано в данной работе. Триботехническую эффективность металлоплакирующей медьсодержащей присадки оценивали по трем показателям: степени разрушения сопряженных поверхностей (образованию задиров), потерям на трение (интенсивности изнашивания) и несущей способности пары P_d (предельно допустимому давлению, предшествующему катастрофическому износу пары) [14].

Для более достоверной оценки эффективности присадок испытания проводили на реверсивной машине трения в условиях тяжело нагруженного контакта. В среде Буксол испытывали образцы с плоской поверхностью из стали ШХ15. В смазке Пума испытывали пары колесная сталь – рельсовая сталь (образцы вырезаны из реальных изделий) и сталь ШХ15 – сталь ШХ15 при ступенчато повышаемых давлениях до 40 МПа. В масле М-14В₂ испытывали пары трения, имитирующие пару компрессионное поршневое кольцо (сталь 50ХФА) – гильза цилиндра (чугун СЧ24), вырезанные из реальных изделий, при ступенчатом нагружении до 140 МПа [15].

Роль среды как способа реализации положительного градиента механических свойств для триботехнических материалов и достижения явления избирательного переноса при трении выявляли с использованием критериальных подходов [16,17], основанных на экспериментально полученной совокупности макроскопических интегральных критериев (феноменологических показателей потерь на трение и износ) и микроскопических (микроструктурных) критериев (физического уширения рентгеновских линий, периода кристаллической решетки, элементного состава материала зоны контактной деформации, определенных с применением методов электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и оже-спектроскопии). Анализ результатов базировался на связи между феноменологическими и структурными критериями состояния зоны контактной деформации, установленной в рамках системно-структурного анализа [16].

Результаты исследований и обсуждение. Правило положительного градиента механических свойств по нормали к поверхности трения, сформулированное И.В.Крагельским, является условием обеспечения внешнего трения, при котором, в отличие от внутреннего трения, деформация сдвига локализуется в тонком поверхностном слое, а образовавшаяся фрикционная связь является менее прочной, чем прочность нижележащего

слоя. Внешнее трение обеспечивается при выполнении правила положительного градиента хотя бы одного элемента пары трения, имеющего меньшее сдвиговое сопротивление по сравнению с сопряженным телом. Известно, что работоспособность пары трения повышается и достигает наивысших значений, когда в паре трения реализуется явление избирательного переноса при трении. С позиций реализации правила положительного градиента и явления избирательного переноса проведем сравнительный анализ триботехнической эффективности антифрикционных медных сплавов в разном состоянии при испытаниях в сопряжениях медный сплав – сталь и сталь – сталь.

На рис.1 приведены результаты оценки изменения основных фундаментальных характеристик структуры материала в деформированном состоянии: физического уширения рентгеновских линий ($\beta_{(hkl)}$) и периода кристаллической решетки материала зоны контактного взаимодействия (a), в совокупности отражающие дислокационную структуру материала и его фазовый и элементный состав. Видно, что при трении материала в минеральном масле с пакетом присадок (кривая 1) в зоне деформации при приближении к поверхности происходит увеличение физического уширения рентгеновских линий и, следовательно, плотности дислокаций, $\rho = A\beta_{(hkl)}^2$, что вызывает упрочняющий эффект: здесь ρ - плотность дислокаций, $[\rho]=\text{см}^{-2}$, A - размерная постоянная, $[A] = (\text{см}\cdot\text{рад})^{-2}$. При наличии в смазочной среде ПАВ (кривая 2) величина $\beta_{(hkl)}$ в поверхностном слое резко падает, свидетельствуя о снижении плотности дислокаций в нем и понижении твердости, т.е. создается пластифицированный поверхностный слой. В этом случае в зоне трения реализуется правило положительного градиента механических свойств и эффект избирательного переноса (интенсивность изнашивания составляет $\sim 10^{-11}$ [4].

Следует заметить, что смазочная среда может оказывать на реологическое поведение деформированного материала не только пластифицирующее, но и упрочняющее влияние [18]. Выражается это в повышении предела текучести и/или коэффициента упрочнения, в уменьшении скорости ползучести материала под постоянной нагрузкой. На молекулярном уровне упрочняющее действие среды обусловлено уменьшением подвижности приповерхностных дислокаций в результате их адсорбционной блокировки [18,19], тормозящего действия оксидных и пассивирующих пленок [20] и электрохимических явлений на поверхности твердых тел, протекающих в таких средах [21]. В реальных трибосопряжениях в качестве присадок к смазочным материалам используют активные вещества, которые могут оказывать как поверхностно-пластифицирующее, так и поверхностно-упрочняющее действие, рис.1а.

Наличие в антифрикционном сплаве легирующих элементов усиливает эффект смазочного действия разных по природе смазочных материалов, рис.1 б – г. При трении латуни Л90 (10%Zn) (рис.1 б) в среде с ПАВ создается двухслойная структура зоны деформации, состоящая из пластифицированной пленки меди и подповерхностного α -твердого раствора Cu-Zn. Как показали исследования латуней с более высокой концентрацией цинка, в подповерхностном слое формируются локальные концентрационные неоднородности, приводящие к понижению износостойкости бронз: интенсивность изнашивания увеличивается в последовательности: Л90–I_н $\sim 10^{-11}$; Л80 $\sim 10^{-10}$; Л63 $\sim 10^{-9}$. Особенность антифрикционных свойств латуней состоит в том, что сплавы, состав которых соответствует области концентраций от 3 до 30% Zn, показывают снижение износа с ростом внешней нагрузки. Это свойство является отличительным признаком эффекта избирательного переноса, поэтому при эксплуатации тяжело нагруженных узлов реализация в паре трения этого явления дает наилучший результат [22].

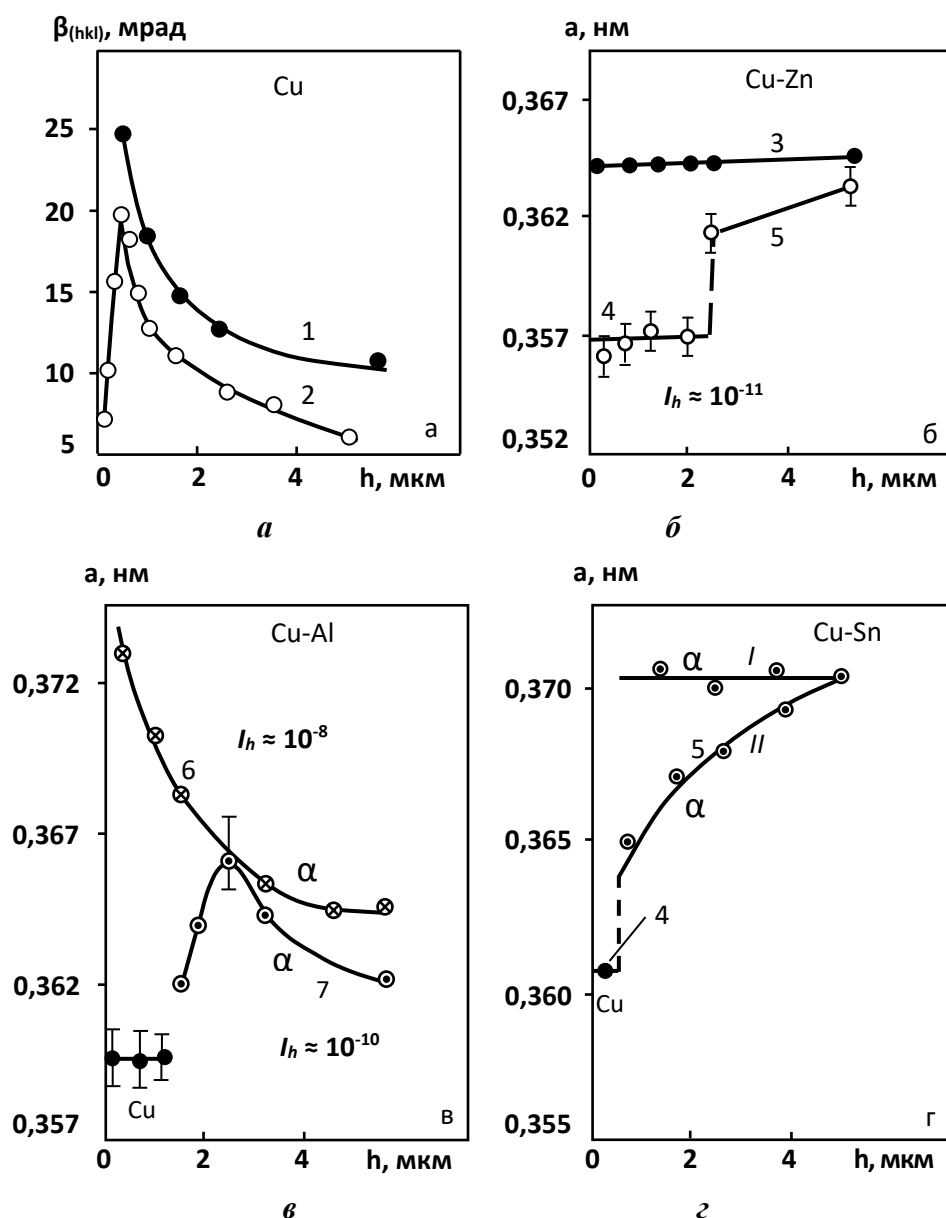


Рис.1. Характеристики структуры меди и медных сплавов при трении:

а – изменение физического уширения рентгеновских линий $\beta_{(hkl)}$ меди по глубине зоны деформации при трении в паре со сталью в среде минерального масла (1) и глицерина (2);
б – изменение периода a кристаллической решетки α -твердого раствора Cu-Zn (латуни Л90) по глубине зоны деформации при трении в среде глицерина (3– α -твердый раствор до трения; 4– пленка меди, 5– α -твердый раствор после трения; I_h – интенсивность изнашивания); **в** – изменение периода кристаллической решетки α -твердого раствора Cu-Al (бронзы БрАМц9-2) по глубине зоны деформации при трении в среде этиленгликоля, кривая 6, и кривая 7 – в глицерине; **г** – изменение периода кристаллической решетки α -твердого раствора Cu-Sn бронзы (БрОФ4-0,25) по глубине зоны деформации в среде на основе глицерина: I – до трения; II – после трения

Уменьшение области α -твердого раствора (сплавы Cu-Al) находит отражение в изменении картины перераспределения состава материала зоны деформации при трении в смазочной

среде, рис.1в. Трение в среде глицерина бронзы БрАМц9-2 (кривая 7) сопровождается омеднением поверхности контакта, подповерхностный слой при этом обедняется атомами алюминия до глубины ~ 2 мкм. На глубинах более 2 мкм во внутриобъемной, не пластифицированной зоне, действуют растягивающие остаточные напряжения [23], приводящие к увеличению концентрации алюминия в ней (период решетки твердого раствора увеличивается). Спектральный анализ подтверждает, что эта зона обогащена легирующими элементами. В подповерхностной зоне имеет место структурная неоднородность материала. В макромасштабе этот случай хотя и соответствует режиму избирательного переноса, но износ, вследствие структурной неоднородности, несколько выше, чем, например, бронзы БрА7 с меньшей концентрацией алюминия в исходном состоянии. Интенсивность изнашивания алюминиевых бронз в средах, обеспечивающих пластифицирующий эффект, изменяется в зависимости от увеличения концентрации алюминия в последовательности: БрА7 - $I_h \approx 10^{-11}$ (7%Al); БрАМц9-2 - $I_h \approx 10^{-10}$ (9%Al); БрАЖМц10-3-1,5 - $I_h \approx 10^{-9}$ (10%Al).

При трении БрАМц9-2 в этиленгликоле картина структурных изменений другая (кривая 6, рис.1в). Марганец, оказываясь на межфазных границах и являясь сильным раскислителем, способствует образованию на поверхности бронзового образца плотной пассивирующей оксидной пленки. В этих условиях двухатомный спирт уже не в состоянии оказывать пластифицирующее действие на слой образца под оксидной пленкой. Наоборот, этот слой под влиянием оксидной пленки оказывается более упрочненным, чем подповерхностная внутриобъемная зона. В результате механического воздействия при трении в приповерхностном микрообъеме бронзы возникают растягивающие напряжения, приводящие к увеличению концентрации алюминия в нем (период решетки твердого раствора увеличивается). В макромасштабе такие процессы приводят к повышенному износу пары трения, нарушается правило положительного градиента свойств, и режим избирательного переноса не реализуется.

Заметим, что для бронз БрАЖ9-4, БрАЖН10-4-4 достигается только стадия формирования структурных предпосылок для реализации полноценного режима избирательного переноса, поэтому износ бронз в данном случае оказывается выше.

На рис.1г приведены результаты анализа зоны деформации при трении оловянных бронз. Установлено, что под влиянием поверхностно-пластифицирующей смазочной среды при трении бронз в поверхностном слое формируется не только направленный к поверхности диффузионный поток атомов олова с последующим их растворением в смазочной среде, создающий положительный градиент периода кристаллической решетки a по толщине слоя и приводящий к формированию приграничной медной пленки. Одновременно в приповерхностном слое бронзы происходят локальные диффузионные процессы, приводящие к образованию/росту в системе новых метастабильных фаз. Такие структурные фазовые переходы инициируются флуктуационным («спинодальным») изменением концентрации атомов олова в соседних микрообъемах деформированной зоны и последующей структурной перестройкой этих микрообъемов с образованием кристаллической решетки новой фазы. Эти процессы изменения фазового состава материала могут происходить в неблагоприятном для его механической стабильности направлении и зачастую являются причиной его повышенного износа [4].

Основываясь на особенностях структурно-фазовых превращений, являющихся следствием процесса восходящей диффузии, стимулированной внутренними напряжениями в материале зоны контактной деформации при трении пары медный сплав – сталь в разных средах [23],

сформулированы следующие рекомендации по выбору состава медного сплава, обеспечивающего наиболее высокую износостойкость:

- предпочтительны сплавы с широким температурным и концентрационным интервалом α -твердого раствора;
- для оловянных бронз необходимо исключить возможность деформационного распада нестабильного α -твердого раствора (за счет направленного легирования и/или применения бронз с низкой концентрацией олова типа БрОФ4-0,25);
- при выборе состава алюминиевой бронзы следует руководствоваться тем, что для этих материалов существует несколько вариантов реализации явления избирательного переноса: 1 – при малой концентрации алюминия (БрА5, БрА7) возможность реализации высокой износостойкости наиболее вероятна; 2 – для бронз типа БрАМц9-2, БрАЖ9-4 в зависимости от свойств среды и механических свойств сопряженного контртела возможны три типа структуры зоны деформации: неоднородный твердый раствор, когда условия организации износостойкого структурного состояния нарушаются; два изоструктурных твердых раствора, обеспечивающие создание предпосылок износостойкой структуры; пленка меди и подповерхностный неоднородный α -твердый раствор, что создает условия нестабильного режима избирательного переноса; 3 – для высокопрочных бронз типа БрАЖМц10-3-1,5 и БрАЖН10-4-4 создание износостойкого состояния поверхностного слоя осуществляется в две стадии, состоящей из образования двух изоструктурных α -твердых растворов и вытеснения на поверхность обогащенной медью фазы с последующим созданием пластифицированной медной пленки и реализации явления избирательного переноса.

Рассмотрим триботехнические свойства меди и медных сплавов в состоянии модифицированного слоя и покрытия (группа испытаний 2).

При выборе метода нанесения покрытия или модифицирования поверхности на первый план встает вопрос о составе металла или сплава, который будет формировать защитный поверхностный слой. Известно, что объемные механические свойства материалов деталей узла трения неоднозначно характеризуют свойства их поверхностных слоев. Поэтому для обеспечения надежной работы трибосопряжения, кроме материала покрытия, важную роль играет обеспечение предварительной организации процесса формирования структуры и механических свойств поверхностного слоя, которые в условиях контактной деформации будут соответствовать требуемым уровням износостойкости конструкционного материала и несущей способности сопряжения.

Известно, что в наибольшей степени повышению триботехнических показателей способствуют пластичность материала и его способность к релаксации напряжений. При этом наиболее высокую работоспособность проявляют те конструкционные материалы, которые в процессе контактной деформации создают условия для реализации правила положительного градиента механических свойств по нормали к поверхности трения, т.е. условия для создания на поверхности мягкого антифрикционного слоя. Если не соблюдается правило градиента сдвигового сопротивления, то деформационные процессы ведут к увеличению коэффициента трения, износу и заеданию, т.е. к основным причинам понижения работоспособности узла [3]. С точки зрения реализации правила положительного градиента свойств при трении стальных сопряжений покрытия на основе меди или медных сплавов являются наиболее предпочтительными.

Исследовали пару сухого трения скольжения сталь 30ХГСН2А — сталь 30ХГСН2А. Для формирования покрытия на основе меди использовали метод электроискрового легирования бронзами БрАЖМц10-3-1,5 и БрМцФ3-6; ионного легирования — медь. Создание покрытий осуществляли на установке ЕЛФА-512М. Режимы электроискрового легирования: количество импульсов тока в минуту — 530; ток импульса 0,7—1,3 А; продольная подача —

0,5—1,8 мм/об; ёмкость конденсаторов — 10 мкФ; скорость вращения детали — 1,2 об/мин. Ионную имплантацию проводили на экспериментальной установке, формирующей полиэнергетический пучок ионов меди диаметром 200 мм. При обработке применяли ускоряющее напряжение 30 кВ, ток пучка 0,1 А, длительность и частоту импульсов 300 мкс и 17 Гц соответственно. Доза облучения $1 \cdot 10^{17}$ ион/см².

Если стальная деталь подвергается поверхностному модифицированию, в частности, нанесению покрытий, то сопротивляемость усталостному разрушению (универсальному механизму разрушения для условий контактного взаимодействия) по сечению неравномерна, в связи с чем при определенных условиях возможно развитие необратимых повреждений в подповерхностном слое, что резко снижает работоспособность нагруженных трибосопряжений. Поэтому для деталей с покрытиями, эксплуатация которых предполагается в условиях знакопеременных напряжений, например, шарнирно-болтовых соединений, важен предварительный контроль материала по характеристикам усталости для обоснования целесообразности поверхностной обработки деталей триботехнического назначения.

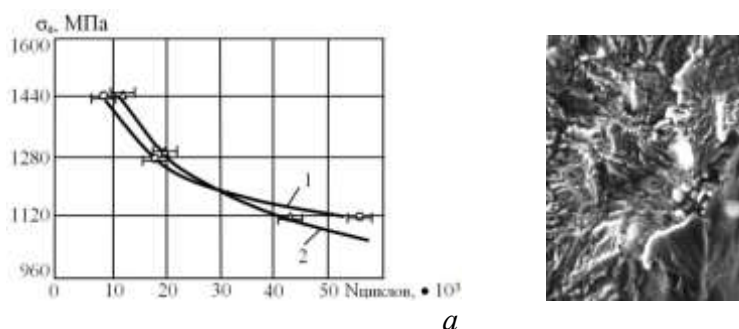


Рис.2. Результаты испытаний на малоцикловую усталость образцов из стали 30ХГСН2А: 1 – образцы без покрытия; 2 – покрытие из бронзы БрАЖМц10-3-1,5; а – вид излома

На рис.2 показаны результаты испытаний на малоцикловую усталость образцов стали 30ХГСН2А (на установке TIRA TEST-2300 с частотой нагружения 8 циклов/мин; диаметр рабочей части образцов круглого сечения составляет 5мм, длина 25 мм, ГОСТ 23026-78). Установлено, рис. 2а, что разрушение носит вязкий характер, а покрытие из бронзы БрАЖМц10-3-1,5 не существенно изменяет усталостные характеристики стали. Поэтому, основываясь на известных литературных данных и приведенных выше экспериментальных результатах, можно полагать, что покрытие из медных сплавов, полученное методом электроискрового легирования, окажет положительное влияние на триботехнические характеристики тяжело нагруженного скользящего контакта.

На рис.3,4 приведены схемы основных установок для оценки триботехнических свойств. На универсальной машине КЕ-4 проводили оценку износостойкости стали 30ХГСН2А в лабораторных условиях (рис.3а). Сравнительная оценка значений коэффициента трения пар с поверхностным слоем разного состава проводилась по результатам триботехнических испытаний на машине трения УМТ-1 (рис.3б). Для оценки триботехнических характеристик макетных образцов применяли специальный стенд, моделирующий реальное шарнирно-болтовое соединение (рис.4).

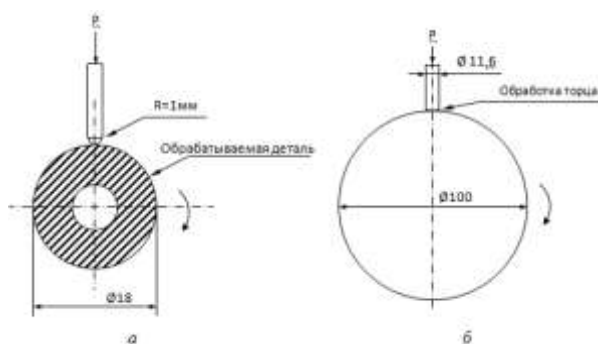


Рис.3. Схемы пар трения на лабораторных машинах КЕ-4 (а) и УМТ-1 (б)

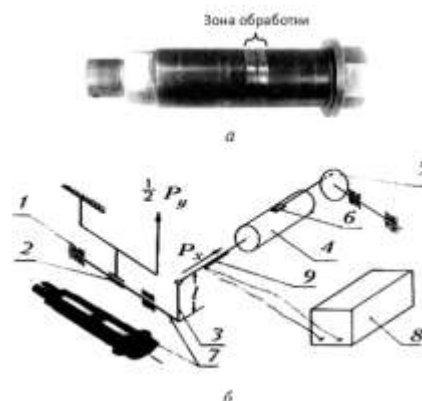


Рис.4. Внешний вид болта (а) и схема стенда для макетных испытаний шарнирно-болтовых соединений (б):

1 – подшипник качения; 2 – контртело; 3 – рычаг; 4 – бустер; 5,6 – золотники; 7 – испытуемый образец; 8 – осциллограф; 9 – тензодатчик

Рис.5 иллюстрирует результаты непосредственного наблюдения за движением деформированного металла в поверхностном слое при трении стальной пары без покрытия (рис.5 а,б) и с покрытием БрАЖМц10-3-1,5 (рис. 5в). Видно, что в результате большой нагрузки при крупномасштабном пластическом течении возникает система полос подвижек, рисунок 5а, которые расположены на разной глубине от поверхности контакта. С формированием подвижек материал поверхностный деформированный слой приобретает чёткие границы. При увеличении пути трения в полосах подвижки возникает система поперечных микротрещин, рис.5б. В результате при нагружении в поверхностном слое возникают неравномерные растягивающие напряжения, и микротрещины смыкаются, развивается повреждаемость и образуются фрагменты разрушения, которые формируют большие частицы износа. С увеличением пути трения износ растёт, достигая предельного значения, рис.6, кривая 1.

Нанесённое покрытие из пластичного медного сплава, рис.5в, вследствие реализации и поддержания положительного градиента механических свойств по глубине деформированного слоя, создает благоприятные условия для внешнего трения и тем самым смещает процесс формирования частиц износа в сторону увеличения пути трения, увеличивается ресурс работоспособности сопряжения, рис.6, кривая 2.

Среди способов создания предпосылок для реализации правила положительного градиента свойств в условиях контактного взаимодействия является также модифицирование поверхности деталей триботехнического назначения при ионной имплантации. Метод основан на взаимодействии потока ускоренных заряженных частиц (ионов) с поверхностью изделия из конструкционного материала. Ионы внедряются в кристаллическую решетку металла, изменяя его структуру и свойства. Обычно толщина легированных слоев составляет десятки - сотни нанометров. Однако возникающие искажения структуры имеют отклик по глубине от свободной поверхности на десятки микрометров, формируя более мягкий, чем сталь, слой, благоприятный для условий внешнего трения.

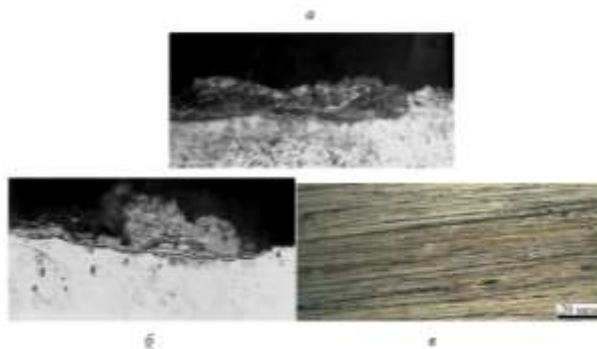


Рис.5. Микрофотографии поверхности трения: а, б -сталь без обработки; в-сталь покрытием

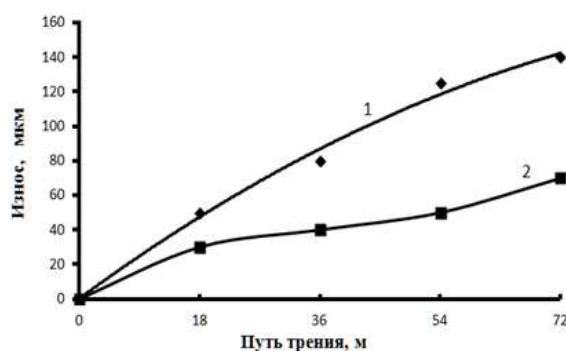


Рис. 6. Зависимость износа образцов стали 30ХГСН2А от пути трения: 1 – без покрытия; 2 – с бронзовым покрытием

Нами осуществлена попытка применения метода имплантации ионов меди для модифицирования поверхностей реальных тяжело нагруженных стальных узлов сухого трения. Сравнительные характеристики триботехнических свойств стали после электроискрового легирования и ионной имплантации поверхности приведены в табл.1 и на рис.7.

Таблица 1

Значения коэффициента трения

Образец /коэффициент трения	Число циклов					
	5	200	600	1000	1400	1800
Исходный	0,060	0,080	0,081	0,084	0,088	0,095
Покрытие бронзой БрАЖМц10-3-1,5	0,060	0,060	0,062	0,067	0,070	0,075
Покрытие бронзой БрМцФ3-6	0,050	0,050	0,055	0,060	0,051	0,063
Ионная имплантация меди	0,020	0,020	0,030	0,030	0,031	0,032

С позиций реализации правила положительного градиента механических свойств материала зоны контактного взаимодействия и экспериментально установленных изменений потерь на трение и износ становится понятной общая тенденция улучшения триботехнических характеристик пар трения сталь 30ХГСН2А — сталь 30ХГСН2А после обработки поверхности методами электроискрового легирования и ионной имплантации, табл.1, рис.7. Следует особенно подчеркнуть, что эта положительная роль обработки поверхности стали

мягким металлом (медным сплавом или медью) проявляется при принципиально отличающихся схемах испытаний на трибометрах КЕ-4, УМТ-1 и стенде, моделирующем эксплуатацию шарнирно-болтового соединения, что указывает на перспективность применения этих методов обработки для разных типов узлов трения, при этом уровень усталостных характеристик в результате обработки сохраняется. Проведенные в производственных условиях сравнительные оценки триботехнических характеристик показали повышение износостойкости стали в среднем в 1,5, 1,7 и 5,7 раза для покрытий бронзами БрАЖМц10-3-1,5, БрМцФ3-6 и Си соответственно. Коэффициент трения соответственно снижается в 1,3, 1,5 и 3,1 раза.

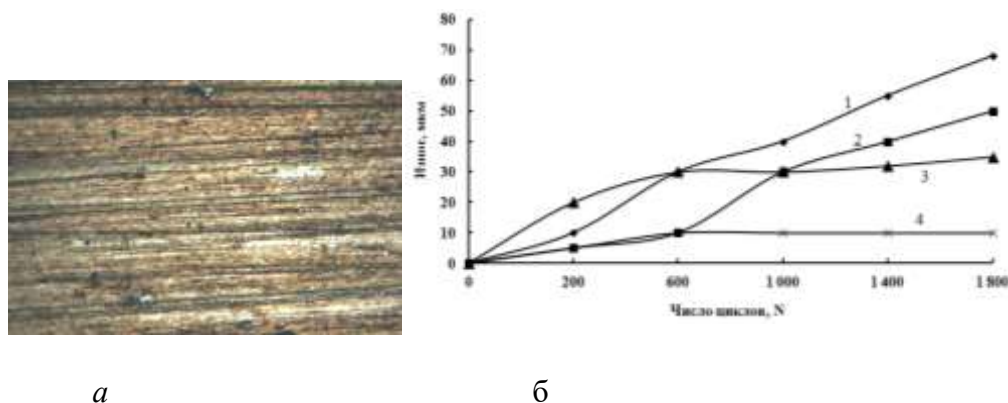


Рис. 7. *a* - Микрофотография поверхности стали 30XГСН2А после имплантации ионов меди и испытаний на трение в установившемся режиме; *б* – изменение износа образцов, испытанных в производственных условиях:
1 – без обработки; 2,3 – электроискровое легирование бронзой БрАЖМц10-3-1,5 (2), БрМцФ3-6 (3); 4 – ионная имплантация меди

Важным фактором в обеспечении правила положительного градиента механических свойств зоны деформации при трении является применение поверхностно-активных смазочных материалов, обладающих способностью к физико-химическому взаимодействию с материалом поверхностного слоя при деформации в условиях трения [18]. Поверхностно-активная смазочная среда оказывает влияние на состояние пластически деформируемых поверхностных микрообъемов, вызывая в них структурные изменения, интенсивный массоперенос и ряд производных явлений, существенно влияющих на уровень поверхностного разрушения при трении [24].

В группе 3 испытывали стальные пары трения в трех поверхностно-активных смазочных материалах: в пластичной литиевой смазке Буксол; в полужидкой литиевой смазке Пума; в моторном масле М-14В₂. Эти смазочные материалы содержали активную медьсодержащую металлоплакирующую присадку Валена. На рис.8 представлены результаты оценки износа пар трения.

Показано, что триботехническая эффективность пластичной смазочной композиции Буксол-М, по сравнению с товарной смазкой Буксол, состоит в повышении несущей способности стального подшипникового сопряжения в 4 раза и в снижении интенсивности его изнашивания от 4 до 19 раз (рис. 8а). Для полужидкой смазочной композиции на основе смазки Пума предельно допустимое давление в паре «колесо–рельс» увеличивается в 2 раза, интенсивность изнашивания в пределах допустимых давлений уменьшается до двух раз (рис. 8б). Добавление металлоплакирующей присадки к моторному маслу приводит к

уменьшению интенсивности изнашивания трибосопряжения «поршневое кольцо–гильза цилиндра» ДВС не менее чем в 6 раз (рис. 8в). При этом снижение коэффициента трения в системе достигает более 20 %.

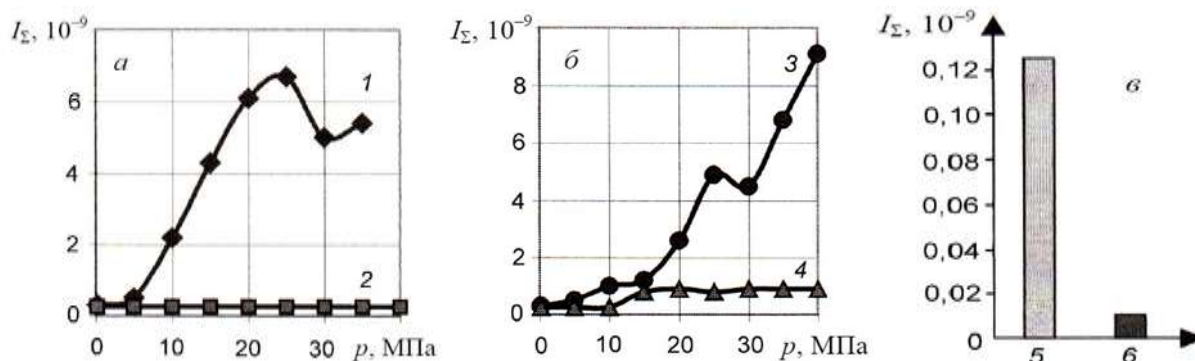


Рис.8. Зависимость интенсивности изнашивания I_{Σ} пары трения «ШХ15-ШХ15» (а), пары трения качения «колесная сталь–рельсовая сталь» (б) от величины контактного давления и пары «поршневое кольцо–гильза цилиндра» (в) при смазывании: 1 – пластичной смазкой Буксол; 2 – металлоплакирующей пластичной смазкой Буксол-М; 3 – смазкой Пума; 4 – металлоплакирующей смазкой Пума-М; 5 – моторным маслом М14В2; 6 – маслом М14В2 с присадкой

Следует отметить, что анализ морфологии поверхности с помощью светового микроскопа показал, что при испытаниях в товарном масле М-14В₂ на поверхности трения формируются участки, подверженные коррозии, их количество возрастает при увеличении внешнего давления. Наличие в смазочном масле медьсодержащей присадки в количестве 0,1% приводит к равномерному омеднению поверхности трения. Следов коррозии не обнаружено.

Заключение. Представленные результаты лабораторных испытаний пар трения, в которых медь и медные сплавы используются в качестве антифрикционного материала; покрытий на основе меди, формируемых при электроискровом легировании; стали, модифицированной методом имплантации ионов меди; пар трения в смазочных медьсодержащих металлоплакирующих смазочных материалах, показали общую, закономерность: поверхностный слой является композиционным (многослойным) материалом, в котором благодаря присутствию меди (медного сплава) в условиях контактной деформации создаются предпосылки для реализации правила положительного градиента механических свойств по нормали к свободной поверхности (необходимой характеристики внешнего трения), а при использовании смазочных материалов с присадками ПАВ возможна реализация повышенной износостойкости за счет внутренних субструктурных резервов металлов в условиях самоорганизации трибосистемы, приводящей пару трения в режим избирательного переноса.

Структурные принципы формирования износостойкого состояния материала зоны контактной деформации состоят из микромодифицирования поверхностных слоев и формирования тонкого покрытия меди, которое, благодаря активному воздействию смазочной среды, подвергается пластифицированию. Этот эффект возрастает с увеличением контактного давления. Покрытие меди, которое характеризуется особым структурным состоянием, формируется как при использовании в контакте медного сплава, так и в парах

сталь-сталь, когда поверхность одного из составляющих пары подвергают предварительной обработке с созданием поверхностно-модифицированного слоя меди или медного сплава, а также применение эффекта металлоплакирования.

Проведенные исследования показали, что создание многослойной структуры зоны деформации, в состав которой входит медь или медные сплавы, при этом свойства материала зоны контактной деформации подчиняются правилу положительного градиента механических свойств по нормали к свободной поверхности, обеспечивает повышение долговечности тяжело нагруженных пар трения.

Список литературы

1. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. - М.: Наука, 1983. - 280 с.
2. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К., Бершадский Л.И., Костецкая Н.Б., Ляшко В.А., Сагач М.Ф. Поверхностная прочность материалов при трении. / Под ред. Б.И.Костецкого. - Киев: Техника, 1976. - 296 с.
3. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. - М.: Машиностроение, 1977. - 526 с.
4. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. - М.: Машиностроение, 1982. - 212 с.
5. Дьячкова Л.Н., Фельдштейн Е.З., Витязь П.А., Блох Б.М., Воронежская Л.Я. Влияние содержания меди на трибологические характеристики композитов Fe-C-Cu // Трение и износ. - 2018. - Т. 39, № 1. - С.5-10.
6. Шелех В.К., Леванцевич М.А., Пилипчук К.В., Дема Р.Р. Исследование работоспособности медных покрытий, сформированных методами гальванического осаждения и деформационного плакирования гибким инструментом // Трение и износ. - 2018. - Т. 39, № 1. - С.11-17.
7. Сачек Б.Я., Мерзин А.М., Архипов В.Е., Лондарский А.Ф. Модифицирование поверхности трибосопряжений напылением металлических покрытий для повышения фреттингостойкости // Трение и износ. - 2018. - Т. 39, № 4. - С.376-381.
8. Потапов Г.К., Балабанов В.И. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) гильз цилиндров и шеек коленчатых валов двигателей //Эффект безызносности и триботехнологии. - 1994. - №3 – 4. - С.48 – 53.
9. Саврай Р., Малышина И.Ю., Макаров А.В., Осинцева А.Л., Роговая С.А., Колобылин Ю.М. Влияние лазерного легирования порошковыми смесями Cu-Zn-Ti и Si-Cu на структуру и свойства литейного алюминиевого сплава // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). - 2019. - Т. 21, № 4. - С.70-84.
10. Михайлов В.В., Агафий В.И., Янакевич А.И. Опыт применения электроискрового легирования для повышения износостойкости пар трения из нержавеющей стали X18H9T // Труды ГОСНИТИ. - 2013. - Т. 111, № 2. - С.63-65.
11. Кужаров А.С., Бурлакова В.Э., Задошенко Е.Г., Кужаров А.А., Бурлов А.С., Ураев А.И., Кравчик К., Гарновский А.Д. Триботехнические возможности координационных соединений меди при трении бронзы по стали // Трение и износ. - 2005. - Т. 26, № 6. - С.628-637.
12. Евдокимов В.Д. Реверсивность трения и качество машин. - Киев: Техника, 1977. - 146 с.
13. Радин Ю.А., Сулов П.Г. Безызносность деталей машин при трении. - Л.: Машиностроение, 1989. - 229 с.

14. Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Колмаков А.Г., Рыбакова Л.М. Методы испытаний на трение и износ. - М.: Интермет Инжиниринг, 2001. - 152 с.
15. Мамыкин С.М., Лаптева В.Г., Куксенова Л.И. Исследование триботехнической эффективности металлоплакирующей присадки «Валена» в смазочных материалах // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2007. - №2. - С.56-64.
16. Савенко В.И., Шукин Е.Д. О соотношениях между феноменологическими и структурными критериями работы узлов трения // Трение и износ. - 1987. - Т.8, № 4. - С.581-589.
17. Rybakova L.M., Kuksenova L.I. Physical criteria of wear resistance of metal materials in surface-active lubricating media. Proc. The Conference on Tribology «Friction, Lubrication and Wear – 50 years on». - London: IME, 1987. - P. 419-426.
18. Ребиндер П.А., Шукин Е.Д. Поверхностные явления в твердых телах // Успехи физических наук. - 1972 (108), вып.1. - С. 1-42.
19. A.R.C. Westwood, J.S. Ahern, J.J. Mills. Development in the theory and applications of chemomechanical effects // Colloids and Surfaces. - 1981. - V.2, №1. - P. 1 – 35.
20. Shchukin E.D., Kochanova L.A., Savenko V.I. On mechanism of environment-induced plasticizing under contact interaction // Advances in mechanics and physics of surfaces. Eds. R.M. Latanision, R.J. Courtel.- London: Harwood academic publishers, 1981. - V.1. - P.111-152.
21. Шукин Е.Д., Савенко В.И., Качанова Л.А. Роль поверхности и среды в переходах упругость-пластичность-хрупкость в металлических кристаллах // Поверхность. - 1982. - №2. - С.25-41.
22. Куксенова Л.И., Дякин С.И., Титов В.В., Громаковский С.Д., Вячеславова Л.А., Рыбакова Л.М. Влияние структурных изменений и свойств поверхностных слоев материалов на несущую способность и долговечность шарнирно-болтовых соединений // Трение и износ. - 1988. - Т.9, № 3. - С. 422-423.
23. Савенко В.И. Роль эффекта Ребиндера в реализации режима безызносности в триботехнике // Эффект безызносности и триботехнологии. - 1994. - №3-4. - С.26-38.
24. Куксенова Л.И., Рыбакова Л.М., Лаптева В.Г. Задачи инженерии поверхности при формировании износостойкого структурного состояния металлических материалов // МиТОМ. - 1999. - №7. - С.41-48.

Дата поступления: 29 июня 2023 г.