

Д.А. Козлов  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова  
Москва, Россия, koslov74@mail.ru

## **ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ МЕДИ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ПАР СУХОГО ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ**

### **Аннотация**

Представлены результаты исследования триботехнической эффективности имплантации ионов меди в поверхность пары сухого трения скольжения. Показано, что при трении в установившемся режиме износостойкость стали с имплантированными ионами меди при дозе облучения  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> и  $5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> повышается в 2 и 1,5 раза. Предварительная имплантация ионов железа дозой  $10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> приводит к повышению износостойкости в 2,5 раза. Описаны структурные изменения в зоне поверхностной пластической деформации при трении скольжения стали с покрытием на основе меди. Обсуждается механизм «эффекта дальнего действия» в ионно-легированных металлических материалах в условиях контактной деформации.

*Ключевые слова:* ионно-лучевая обработка, имплантация, медь, сталь, структура, испытания на износ.

### **Введение**

При эксплуатации технических изделий надежность и безопасность их функционирования находятся в непосредственной зависимости от работоспособности входящих в их состав узлов трения. Поэтому проблеме износостойкости конструкционных материалов при проектировании узлов трения уделяется должное внимание наряду с решениями задач конструктивной прочности [1].

Как правило, для обеспечения требуемых эксплуатационных свойств трибосопряжений поверхности трения подвергают модифицированию – нанесению антифрикционных и износостойких покрытий различными способами: гальваническим механическим (ППД, метод ФАБО и др), а также обработкой высококонцентрированными потоками энергии (лазерные технологии, ионно-лучевая обработка и др.). Каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки, но все они направлены на изменение свойств поверхностных слоев, которые приводят к повышению эксплуатационных характеристик конструкционных материала и ресурса работы изделий в целом.

Для тяжело нагруженных узлов трения, особенно работающих без смазочного материала, вопросы износостойкости материала являются определяющими, и в первую очередь встают проблемы задиростойкости сопряженных поверхностей, минимизация задиры на которых в основном достигается подбором совместимых материалов для пар трения; созданием на контактирующих поверхностях протозадиристых и противоизносных соединений, например, с помощью методов химико-термической обработки; нанесением специальных антифрикционных и

износостойких покрытий (в частности с помощью разнообразных методов поверхностного легирования), способствующих реализации положительного градиента механических свойств по глубине слоя контактного взаимодействия при трении и локализации деформационных процессов в нем.

Одним из металлических элементов, способных эффективно при трении стальных пар создать предпосылки для реализации положительного градиента механических свойств по глубине приповерхностного слоя и, соответственно, локализовывать физико-химические и деформационные процессы в нем, является медь и сплавы на её основе [2].

Применение меди и медных сплавов в практике триботехнических исследований и испытаний реальных узлов имеет давнюю историю. Приведем несколько примеров.

Применение меди в структуре антифрикционного сплава повышает на 20-30% работоспособность пары трения антифрикционный сплав - сталь и увеличивает предельно-допустимое давление в зоне контакта на 1,2 МПа [3]. Покрытие на основе бронзы БрА7Н6Ф предотвращают схватывание в зоне контакта [4]. Значительное повышение износостойкости стали 30ХГСН2А при испытаниях в условиях тяжело нагруженного контакта получено при создании на поверхности трения покрытия на основе меди методом электроискрового легирования [5]. Медные покрытия, полученные газотермическим напылением, предотвращают схватывание. Отличительной особенностью трения такой пары является формирование не сервовитной пленки меди, а медно-цинкового третьего тела, которое обладает способностью быть перенесенным с образца на контртело и наоборот, обеспечивая защиту от разрушения поверхности контактного взаимодействия. Таким образом, высокая износостойкость материалов пары трения достигается благодаря прямому и обратному фрикционному массопереносу медного покрытия [6,7].

Высокие триботехнические показатели сопряжений достигаются благодаря физико-химическому воздействию поверхностно-активных веществ в смазочных материалах, содержащих соединения меди, когда процесс контактного взаимодействия переносится в сформированную межфазную область, разделяющую контактирующие тела, что сопровождается минимальными потерями на трение и практической безызносностью [8].

Широкое распространение в парах трения со сталями получили сплавы на основе меди (бронзы и латуни). Их триботехническая эффективность наиболее высока, если пара работает в смазочных средах, содержащих поверхностно-активные вещества, которые под действием эффекта Ребиндера обеспечивают реализацию режима безызносного трения.

Как отмечалось выше, для нанесения антифрикционных покрытий на основе меди существует множество методов как предварительного нанесения покрытия на изделие, так и формирование его в процессе эксплуатации. Практика применения таких методов широко известна [9].

В настоящее время одним из быстроразвивающихся способов модификации поверхностей трения является ионно-лучевая обработка, заключающаяся в облучении детали пучком ионов с целью изменения свойств материала поверхностного слоя и улучшения его эксплуатационных характеристик. Интерес к этому методу обработки объясняется, прежде всего его широкими технологическими возможностями, позволяющими осуществлять легирование поверхностных слоев практически любыми элементами.

В качестве примеров применения ионной имплантации для изменения свойств металлов и сплавов отметим данные некоторых работ. В [10] показано, что в результате имплантации ионов тантала в сплав ВТ6 происходит повышение его коррозионной стойкости, а имплантация ионов серебра приводит к увеличению износостойкости сплава ВТ1-00 [11]. Высокодозная имплантация ионов аргона в никель приводит к сохранению стабильности его субмикроструктурной структуры до температуры 500<sup>0</sup>С [12]. Экспериментальные исследования, опубликованные в [13], показали, что ионно-лучевое перемешивание тонкой пленки углерода, нанесенной на титановый сплав ВТ6, вызывает разупорядочение структуры углерода, формирование карбидов титана в переходном слое и перераспределение дислокационной структуры, что в совокупности приводит к увеличению микротвердости поверхности образцов.

Ионная имплантация находит применение и в качестве метода предварительной обработки конструкционных материалов, активизирующей диффузионные процессы при последующей химико-термической обработке. Например, в работе [14] установлено, что в результате предварительной обработки поверхности методом имплантации ионов азота сталей 40Х и 40ХН происходит формирование нитридного слоя, предотвращающего появление нитридной сетки при последующем азотировании, в результате чего повышается износостойкость обработанных деталей в 3-4 раза. Совмещение имплантации ионов серебра в титановые сплавы ВТ1-0 и ВТ6 с последующим ультразвуковым воздействием способствует более глубокому прониканию ионов, а также выравниванию концентрации имплантируемых частиц по толщине модифицированного слоя, что создает предпосылки для улучшения эксплуатационных характеристик [15].

Известно, что метод лучевой модификации поверхности не сопровождается нагревом изделия, что является его преимуществом. Однако, для триботехнических целей малая толщина модифицированного слоя (глубина проникновения заряженных частиц не превышает 1 мкм) служит существенным ограничением его применения. Поэтому в практике совершенствования метода были разработаны способы увеличения толщины модифицированных слоев. Одним из таких способов является нагрев деталей во время или после имплантации, за счет чего увеличивается диффузионная подвижность имплантированных ионов. Однако, температура, при которой существенно возрастает диффузионная подвижность, составляет ~550-600<sup>0</sup>С, что не для всех конструкционных материалов допустимо. Поэтому чаще применяется другой способ увеличения диффузионной подвижности легирующих элементов, и, соответственно, толщины модифицированного слоя, - это предварительная имплантация ионов инертных газов или ионов, являющихся одноименными с обрабатываемым материалом [16].

Целью данной работы является исследование триботехнической эффективности модифицированного медью слоя на поверхности стального образца, полученного методом ионной имплантации для повышения эксплуатационных характеристик сопряжения 30ХГСН2А-30ХГСН2А в условиях высоконагруженного сухого трения скольжения.

### **Материалы и методики исследования**

Объектом исследования служила одноименная пара трения скольжения сталь – сталь. Состав исследуемой стали приведен в табл. 1.

Таблица 1 – Химический состав стали 30ХГСН2А (ГОСТ 4543-71)

C	Mn	Cr	Si	Ni	S	P	Cu
0,27-0,34	1,0-1,3	0,9-1,2	0,9-1,2	1,4-1,8	> 0,025	> 0,025	> 0,3

Исследуемые образцы подвергали предварительной термической обработке, состоящей из нагрева до 900<sup>0</sup>С, охлаждения в масле и отпуска при температуре 210<sup>0</sup>С, 2 часа, при этом сталь имела значение твердости 42...45 HRC.

Имплантиацию ионов меди и железа осуществляли источником с вакуумной дугой MEVVA, формирующим полиэнергетический пучок ионов в режиме: ускоряющее напряжение 30 кВ, средний ток пучка 0,1А, длительность импульсов 300 мкс, частота импульсов 17 Гц. Варьируемым параметром была доза имплантации. Она изменялась от от 10<sup>17</sup> до 5×10<sup>17</sup> ион/см<sup>2</sup>. Во время имплантации температура образцов не превышала 100<sup>0</sup>С.

Профили распределения имплантированных ионов проводили методом вторичной ионной масс-спектрометрии на установке Physical Electronics при бомбардировке поверхности пучком ионов кислорода с энергией 7 кэВ под углом 60<sup>0</sup> к исследуемой поверхности.

Для оценки износостойкости исследуемой стали испытания проводили по схеме двух перекрещивающихся цилиндров на универсальной машине КЕ-4 в условиях трения без смазки. Эталонные валы диаметром 100 мм испытывали в паре с обрабатываемыми цилиндрическими образцами (втулками) диаметром 11,3 мм. Вал вращался с постоянной окружной скоростью 0,06 м/с. Втулка прижималась к образующей вала. Перед испытаниями проводили притирку рабочих поверхностей при давлении P<sub>0</sub> = 25 МПа. Далее давление увеличивали через каждый час работы на 25 МПа до предельной величины 250 МПа. Проводили сравнительные испытания образцов в исходном состоянии и после имплантации ионов меди. Оценивали толщину изношенного слоя при длительных испытаниях. Особенности рельефа поверхности контактного взаимодействия после испытаний на износ анализировали с помощью светового металлографического микроскопа.

### Результаты исследования

На рисунке 1 показано распределение меди по глубине стальных образцов. Кривая изменения концентрации ионов меди по глубине поверхностного слоя исследуемой стали разная для трех режимов обработки. Доза облучения 1×10<sup>17</sup> ион/см<sup>2</sup> создает острый максимум концентрации на глубине ~0,02 мкм; в случае предварительного облучения ионами железа и последующей обработки такой же дозой (1×10<sup>17</sup> ион/см<sup>2</sup>) глубина максимальной концентрации меди смещается в слой от 0,02 мкм до 0,05 мкм, имея в слое этой толщины постоянную концентрацию ионов. Толщины модифицированных зон для указанных двух режимов обработки близки и составляют ~0,12 мкм (кривые 1 и 2 рисунок 1). Увеличение флюенса в пять раз (доза 5×10<sup>17</sup> ион/см<sup>2</sup>, рисунок 2, кривая 3) приводит не только к двукратному увеличению глубины модифицированной зоны (до 0,25 мкм), но и к формированию выраженного плато на кривой распределения меди. Появление горизонтального участка (плато) на кривой 3 рисунок 1 указывает на применение предельной дозы облучения, которая для данных условий эксперимента составляет ~5×10<sup>17</sup> ион/см<sup>2</sup>. На основе представленных данных по результатам модифицирования стали ионами меди, рисунок 1, можно сделать вывод, что для всех режимов имплантации размер модифицированной зоны превосходит величину проекционного пробега ионов меди при облучении, которая составляет несколько десятков нанометров [16]. Поэтому

можно полагать, что в основе увеличения глубины проникновения меди в сталь при облучении пучками ионов с энергией 30 кэВ, током 0,1 А и длительностью импульса 300 мкс лежит интенсификация диффузионных процессов в поверхностных слоях, которой способствует полиэнергетический ионный пучок.

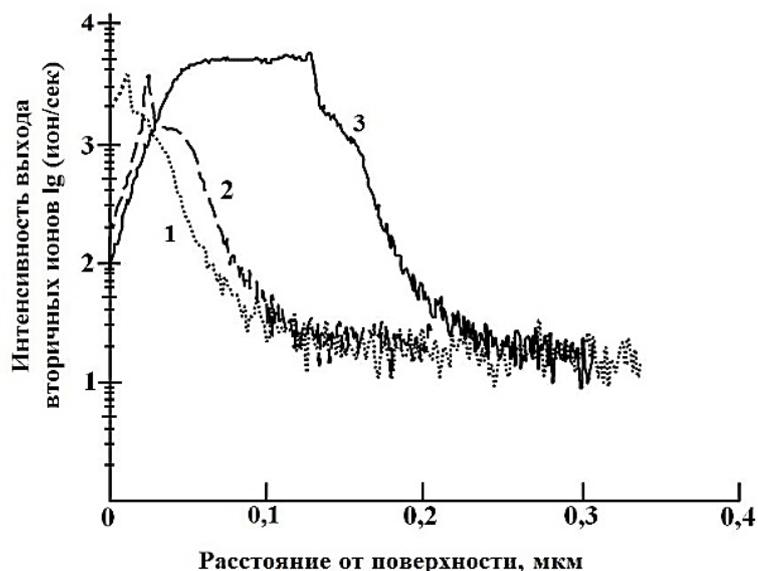


Рисунок 1 – Распределение ионов меди по глубине стали 30ХГСН2А: 1 – доза облучения  $1 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>; 2 – предварительная имплантация ионов железа (доза  $1 \times 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>) и последующая имплантация ионов меди, доза  $1 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>; 3 – доза  $5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>

Рассмотрим, в какой мере столь разные результаты модификации поверхностного слоя стали 30ХГСН2А влияют на уровень ее поверхностного разрушения в условиях испытания тяжело нагруженного сопряжения. Рисунок 2 иллюстрирует зависимость интенсивности изнашивания исследуемой стали от пути трения. Кривая со знаком 0 (рисунок 2) характеризует кинетику изнашивания стали без лучевой обработки (в исходном состоянии, т.е. после термической обработки). Она указывает на классическую закономерность изнашивания [2]: имеет место три участка износа – приработка, установившийся режим (для исходного состояния стали этот участок предельно мал) и переход в стадию повышенного износа, когда исчерпывается ресурс пары трения. При этом толщина изношенного слоя составляет ~160 мкм.

Пары трения с имплантированными образцами показывают другие количественные характеристики изнашивания. Отличительной особенностью этих пар является больший участок установившегося режима трения, длина которого зависит от величины дозы имплантации. Минимальный участок пути трения с режимом установившегося износа наблюдается у образцов с максимальной дозой имплантации  $5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>, равный 4,5 м (от 13,5 до 18 м, кривая 3, рис.2). Интенсивность изнашивания образцов на этом участке значительно ниже, чем у исходных, а при дальнейших испытаниях наблюдается незначительное увеличение интенсивности изнашивания, но при этом она остается на более низком уровне по сравнению с исходными. Толщина изношенного слоя на пути трения 22,5 м составляет ~120 мкм. Для пар трения с дозой имплантации меди  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> и с предварительной имплантацией ионов железа интенсивность изнашивания имеет наиболее низкие значения, примерно в 1,5 раза ниже чем у образцов с максимальной дозой имплантации и в ~ 2,5 раза ниже, чем у исходных образцов. Толщина изношенного слоя после полного цикла испытаний у образцов с дозой имплантации  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> и образцов с предварительной имплантацией ионов железа дозой

$10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> и последующей имплантацией ионов меди она составляет соответственно 100 и 80 мкм.

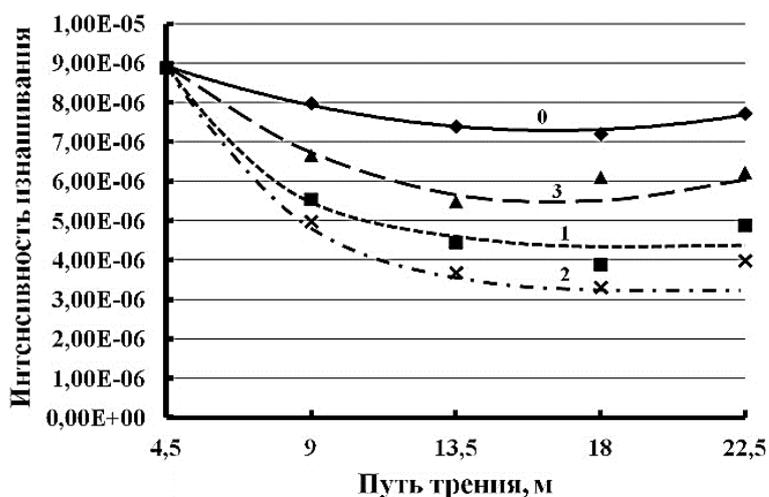


Рисунок 2 - Зависимость интенсивности изнашивания стали 30ХГСН2А от пути трения: 0 – исходный образец; 1 – имплантация ионами меди ( $1 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>); 2 – предварительная имплантация ионов железа ( $1 \times 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>) и последующая имплантация ионов меди ( $1 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>); 3 – имплантация ионов меди ( $5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>)

Кривые изменения износа в зависимости от пути трения выявляют их важную особенность. Судя по величине интенсивности изнашивания, равной  $(3 - 9) \times 10^{-6}$ , можно утверждать, что слои, которые обогащены ионами меди и толщина которых составляет 0,12-0,25 мкм в зависимости от дозы облучения, изнашиваются уже на стадии приработки. Однако на фиксированном отрезке пути трения (22,5 м) положительный триботехнический эффект ионной имплантации ярко проявляется. Поэтому есть основания полагать, что при увеличении пути трения в процессе контактного взаимодействия металлических поверхностей трения имеет место диффузионное проникновение меди в подповерхностные слои, вновь вступающие в контакт и подверженные пластической деформации [15].

Особенности микроструктуры поверхностей трения исследуемых стальных трибопар приведены на рисунке 3.

По данным металлографического анализа рельеф поверхности исследуемых образцов после испытаний отличается, отражая особенности механизма контактного взаимодействия и разрушения. На поверхности трения образцов, испытанных после термической обработки, формируются каверны, борозды, глубокие задиры, очаги схватывания, что указывает на механизм адгезионного изнашивания, поэтому уровень поверхностного разрушения наиболее высокий, рисунке 3а, рисунок 2 кривая 0. На поверхности трения образцов после дозы облучения  $5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> наблюдаются отдельные выглаженные участки (островки), содержащие медь, без видимых повреждений, рисунок 3г. Эти зоны, будучи менее упрочненными за счет наличия в них меди, обладают повышенной антифрикционностью и экранируют поверхность стали. Островковый характер формирования защитных покрытий связан с плато на кривой распределения меди по глубине модифицированного слоя, и именно эти выглаженные участки стали, обогащенные медью, ответственны за общее снижение уровня разрушения поверхности трения. Количество задиров и следов пропахивания и схватывания значительно снижено за счет экранирующего действия обогащенных медью зон. Поверхность трения образцов стали после облучения дозой  $1 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>, а также с предварительной имплантацией ионов

железа дозой  $1 \times 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> и последующей имплантации меди дозой  $1 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> (рисунок 3б,в) характеризуется выглаживанием, отсутствием выраженных задигов и схватывания. Наблюдается равномерное распределение следов меди по поверхности контактного взаимодействия, проявляющих экранирующее действие и способствующих реализации механизма нормального изнашивания.

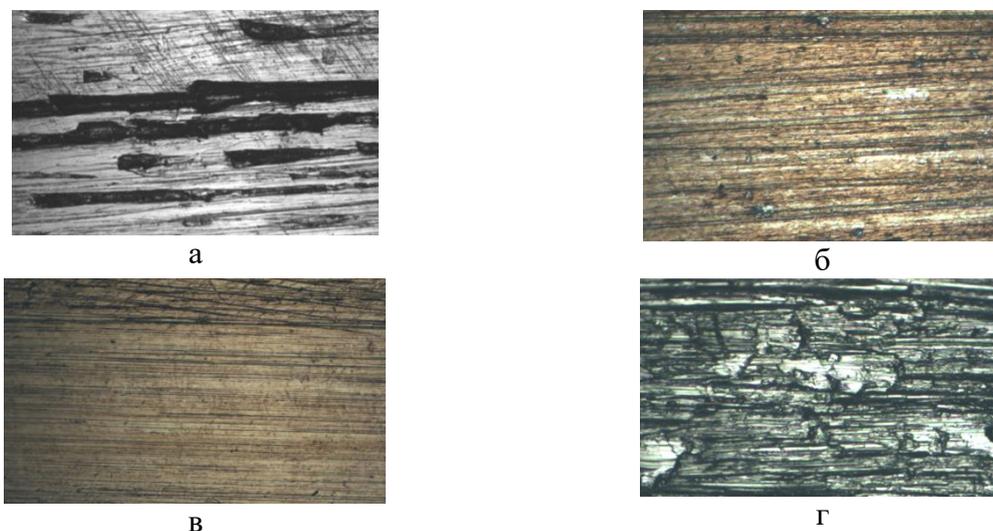


Рисунок 3 – Микрофотография поверхности образцов стали 30ХГСН2А после испытаний на износ, (x100): а – исходный образец; б – имплантация меди дозой  $1 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>; в – имплантация меди дозой  $1 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> с предварительной имплантацией железа дозой  $1 \times 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>; г – доза  $5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>.

### **Заключение.**

Установлено, что модифицирование поверхности образцов из стали 30ХГСН2А ионами меди приводит к повышению ее износостойкости в условиях сухого трения скольжения при внешнем давлении 250 МПа. Уровень поверхностного разрушения зависит от дозы облучения: износ уменьшается в 2 и 1,5 раза при дозах облучения  $1 \times 10^{17}$  и  $5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> соответственно. Предварительная имплантация ионов железа дозой  $1 \times 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> приводит к повышению износостойкости в 2,5 раза.

В целом можно заключить, что легирование поверхности стали 30ХГСН2А методом имплантации ионов меди обеспечивает триботехнический эффект: значительное повышение работоспособности тяжело нагруженного сопряжения сталь – сталь в условиях трения скольжения без смазки.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Севастьянов И.В., Бурковская И.П. Современные аспекты развития триботехнического материаловедения тяжело нагруженных узлов трения (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. №10 (116) С. 76-89.
2. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
3. Дьячкова Л.Н. Структура и свойства антифрикционных псевдосплавов порошковая сталь-медный сплав, инфильтрованных материалами различного состава // Трение и износ. 2023. Т.44. №4. С. 301-309.
4. Девойно О.Г., Фельдштейн Е.Э., Григорьев А.Я., Басинюк В.Л., Кардаполова М.А., Косякова И.М. Триботехнические характеристики покрытий на основе бронзы БрА7Н6Ф после оплавления оптоволоконным лазером // Трение и износ. 2023. Т.44. №1. С. 12-19.

5. Куксенова Л.И., Козлов Д.А., Алексеева М.С. Исследование эксплуатационных свойств стальных пар трения с антифрикционными покрытиями из медных сплавов, полученных методом электроискрового легирования // Физика и химия обработки материалов. 2021. № 4. С. 31 – 41.

6. Сачек Б.Я., Мезрин 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 – 383.

7. Архипов В.Е., Куксенова Л.И., Пугачев М.С., Козлов Д.А., Москвитин Г.В. Влияние модифицированных медью поверхностных слоев на работоспособность пар трения скольжения сталь–сталь // Трение и износ. 2023. Т.44. №4. С.322-334.

8. Кужаров А.С., Кужаров А.А. Избирательный перенос: мифы и реалии // Вестник РУГПС. 2011. №. 4. С.43-51.

9. Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Лаптева В.Г. Износостойкость конструкционных материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана. 2011. 237 с.

10. Овчинников В.В., Слезко М.Ю., Учеваткина Н.В., Лукьяненко Е.В., Якутина С.В. Состав поверхностных слоев титанового сплава ВТ6 после имплантации ионов тантала // Упрочняющие технологии и покрытия. 2022. Т.18. №8(212). С. 364-370.

11. Слезко М.Ю., Овчинников В.В., Учеваткина Н.В. Влияние имплантации ионов серебра на закономерности изнашивания титана ВТ1-00 // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т.16. №4(184). С. 172-178.

12. Слезко М.Ю., Овчинников В.В., Учеваткина Н.В. Влияние имплантации ионов серебра на закономерности изнашивания титана ВТ1-00 // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2020. – Т.16. - №4(184). – С. 172-178.

13. Созонова Н.М., Воробьев В.Л., Гильмутдинов Ф.З., Казанбаев М.И., Баянкин В.Я., Ульянов А.Л. Исследование поверхностных слоев титанового сплава ВТ6 с нанесенной пленкой углерода при ионно-лучевом перемешивании // Металловедение и термическая обработка металлов. 2021. №2(788). С. 20-25.

14. Криони Н.К., Мингажева А.А., Мингажев А.Д. К вопросу о подборе дозы ионной имплантации для активации поверхностного слоя деталей из легированных сталей перед азотированием // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. Т.19. №8(224). С. 360-363.

15. Ягодкин Ю.Д. Ионно-лучевая обработка металлов и сплавов / Итоги науки и техники. Металловедение и термическая обработка. М.: ВИНТИ. Т.24. 1990. С. 167-221.

D.A. Kozlov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences

## **EFFECT OF IONIC COPPER IMPLANTATION ON THE PERFORMANCE OF HEAVY-LOADED STEEL DRY SLIDING FRICTION PAIRS**

### **Abstract**

The article presents the results of the study of the tribological efficiency of copper ion implantation into the surface of a dry sliding friction pair. It is shown that under steady-state friction, the wear resistance of steel with implanted copper ions at an irradiation dose of  $10^{17}$  ion/cm<sup>2</sup> and  $5 \times 10^{17}$  ion/cm<sup>2</sup> increases by 2 and 1.5 times. Preliminary implantation of iron ions with a dose of  $10^{16}$  ion/cm<sup>2</sup> leads to an increase in wear resistance by 2.5 times. Structural changes in the surface plastic deformation zone under sliding friction of steel with a copper-based coating are described. The mechanism of the "long-range effect" in ion-alloyed metallic materials under contact deformation conditions is discussed.

*Keywords:* ion-beam treatment, implantation, copper, steel, structure, wear testing.