

УДК 621.03.620.179.16

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ МЕДИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

Лидия Ивановна Куксенова^{1,2}, Дмитрий Александрович Козлов¹,
Мария Сергеевна Алексеева³

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

³ФГУП ВИАМ, Москва, Россия

lkukc@mail.ru

Аннотация. Повышение надежности, долговечности и безопасности эксплуатации тяжело нагруженных узлов трения является актуальной проблемой физики, химии и механики поверхности. Представлены результаты оценки износа образцов одноименной пары трения из легированной стали 30ХГСН2А после ионно-лучевой обработки и сухого трения при давлении 250 МПа. Показано, что в установившемся режиме трения износостойкость стали с имплантированными ионами меди при дозе облучения 10^{17} ион/см² и $5 \cdot 10^{17}$ ион/см² повышается в 2 и 1.5 раза соответственно. Обсуждается механизм «эффекта дальнего действия» в ионно-легированных конструкционных материалах в условиях контактной деформации.

Ключевые слова: ионно-лучевая обработка, ионная имплантация, медь, сталь, триботехнические испытания.

MODIFICATION OF THE SURFACE OF TRIBO CONNECTIONS BY THE METHOD OF IMPLANTATION OF COPPER IONS TO INCREASE THE WEAR RESISTANCE OF ALLOY STEEL

L.I. Kuksenova^{1,2}, D.A. Kozlov¹, M.S. Alekseeva³

¹Mechanical Engineering Research Institute, Moscow, Russia

²MSTU named after N.E. Bauman, Moscow, Russia

³FSUE VIAM, Moscow, Russia

lkukc@mail.ru

Abstract. Improving the reliability, durability and safety of operation of heavily loaded friction units is an urgent problem in physics, chemistry and surface mechanics. The results of assessing the wear of samples of the same name friction pair made of alloy steel 30KhGSN2A after ion-beam treatment and dry friction at a pressure of 250 MPa are presented. It is shown that in the steady-state friction mode, the wear resistance of steel with implanted copper ions at an irradiation dose of 10^{17} ion / cm² and $5 \cdot 10^{17}$ ion / cm² increases by 2 and 1.5 times, respectively. The mechanism of the "long-range effect" in ion-doped structural materials under contact deformation is discussed.

Key words: ion-beam treatment, ion implantation, copper, steel, tribotechnical tests.

Введение. В современных конструкциях ответственного назначения содержится множество пар трения, которые в значительной степени влияют на надежность и безопасность функционирования всей системы в целом. Как правило, для обеспечения требуемых эксплуатационных свойств деталей таких пар трения их поверхность подвергают модифицированию – нанесению антифрикционных и износостойких покрытий различными способами: гальваническим (электролитическое осаждение), механическим (ППД, метод финишной антифрикционной безабразивной обработки 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 поверхности, в результате которых повышаются эксплуатационные характеристики материала и ресурс работы изделий. Поэтому при проектировании высоконагруженных узлов трения первоочередное внимание уделяется не только проблеме прочности конструкционных материалов, но и их износостойкости и антифрикционности [1,2], которая решается чаще всего технологическими методами модифицирования поверхностей контактирования тел. Для тяжело нагруженных пар трения в проблеме износостойкости и антифрикционности наиболее эффективным проявил себя подход с использованием микромодифицирования поверхности металлосодержащими продуктами, которые, находясь в зоне контактирования под воздействием выделяемой при трении энергии формируют микропокрытия, локализирующие сдвиговые деформации в более мягком материале и предотвращающие схватывание. В качестве таких продуктов широко используются комплексные соединения меди [3].

Следует заметить, что применение меди и медных сплавов в практике триботехнических испытаний имеет давнюю, хорошо известную историю. В настоящее время области применения сплавов на основе меди постоянно расширяются. Распространено применение меди, например, в композитных материалах. Благодаря меди достигается существенное позитивное изменение механизма формирования топографии поверхности [4]. Покрытия меди, сформированные методами гальванического осаждения, а также деформационного плакирования гибким инструментом, обеспечивают снижение потерь на трение и износ пар скольжения [5], а медные покрытия, полученные газотермическим напылением, предотвращают схватывание [6]. Значительное (в несколько раз) повышение износостойкости стали 30ХГСН2А получено при модифицировании поверхности образцов методом электроискрового легирования [7]. Высокий триботехнический эффект пар сталь – медный сплав достигается, когда благодаря действию специальных присадок в смазочные материалы, содержащие ионы меди, процесс контактного взаимодействия переносится в сформированную межфазную область, разделяющую контактирующие тела и сопровождающийся эффектами минимальных потерь на трение и практической безызносностью [8-10].

Начиная с 80-ых годов прошлого столетия резко вырос интерес к ионно-лучевой обработке конструкционных материалов, которая заключается в облучении детали (образца) пучком ионов с целью модифицирования материала поверхностного слоя и изменения его свойств. Интерес к этому методу обработки объясняется прежде всего его широкими технологическими возможностями, позволяющими осуществлять легирование поверхностных слоев практически любыми элементами [11, 12]. Для триботехнических целей наибольшее применение из методов ионно-лучевой обработки получила ионная имплантация разных элементов, в том числе меди, в металлы и сплавы [13].

Цель работы. Целью данной работы является оценка триботехнической эффективности применения метода ионной имплантации меди для модифицирования поверхностных слоев

модельного сопряжения, состоящего из легированной стали 30ХГСН2А и испытываемого в условиях сухого трения скольжения при высоком внешнем нагружении.

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)

С	Mn	Cr	Si	Ni	S	P	Cu
					Не более		
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 900-910⁰С, охлаждения в масле и отпуска при температуре 210-215⁰С в течение 2-2.5 часов. Такой режим обработки позволял достигнуть значение твердости 42...45 HRC.

Имплантиацию ионов меди осуществляли источником с вакуумной дугой MEVVA, формирующим полиэнергетический пучок ионов, имеющий в своём составе как одно, так и многозарядные ионы [14]. Имплантиация производилась при следующих режимах: ускоряющее напряжение 30 кВ, средний ток пучка 0.1А, длительность импульсов 300 мкс, частота импульсов 17 Гц. Величина дозы имплантации варьировалась от 10¹⁷ до 5·10¹⁷ ион/см². В процессе имплантации температура образцов не превышала 100⁰С.

Для оценки износостойкости легированной 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. К втулке в процессе испытаний (после ступенчато повышаемой нагрузки в режиме приработки) прикладывалось постоянное нормальное давление 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 качественно анализировали с помощью светового металлографического микроскопа.

Результаты исследования. На рис. 1. представлена зависимость толщины изношенного слоя образцов из исследуемой стали от пути трения. Как видно из графика, наиболее высокий износ характерен для исходных образцов (кривая 1). При прохождении отрезка пути трения, равного 4.5м, величина изношенного слоя составляет примерно 40 мкм, на пути трения до 18 м реализуется режим установившегося трения. При увеличении пути трения износ возрастает, и пара переходит в режим повреждаемости. Эта закономерность изнашивания сохраняется и для образцов, имплантированных медью при максимальной используемой в эксперименте дозе 5·10¹⁷ ион/см². Износ также уменьшается при достижении установившегося режима, а затем наблюдается некоторое возрастание износа и тенденция перехода в режим повреждаемости (кривая 3). При этом разрушение поверхности имплантированных образцов на одном и том же отрезке пути трения равном 15м, уменьшается почти в 1.5 раза по сравнению с исходными образцами. Наилучшие результаты показали образцы с дозой имплантации 10¹⁷ ион/см² (кривая 2). Уменьшение уровня разрушения на всем пути трения достигает практически двукратной величины.

Следует заметить, что ход кривых, отражающих изменение уровня поверхностного разрушения при испытаниях, свидетельствует, что при достижении достаточно большого отрезка пути трения образцы с имплантированными ионами меди не достигают величины разрушения исходного образца: на пути трения 22,5 м износ стали с дозой облучения $5 \cdot 10^{17}$ ион/см² меньше на 20%, а с дозой 10^{17} ион/см² – на 60% по сравнению с износом необработанной стали. При этом толщина изношенного слоя составляет порядка 160 мкм, 120 мкм и 100 мкм соответственно для исходного, после имплантации с дозами $5 \cdot 10^{17}$ и 10^{17} ион/см². Следовательно, учитывая толщину модифицированного слоя (доли микрометров) эффект влияния имплантации меди в сталь проявляется на значительно больших глубинах (более чем на три порядка), чем толщина модифицированного слоя.

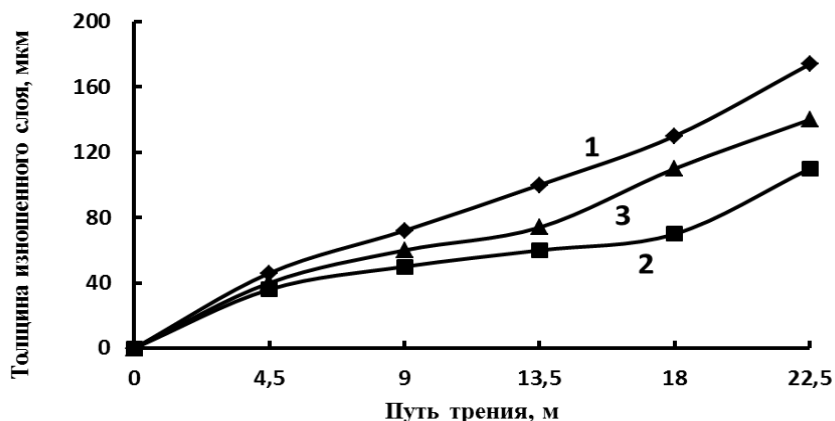
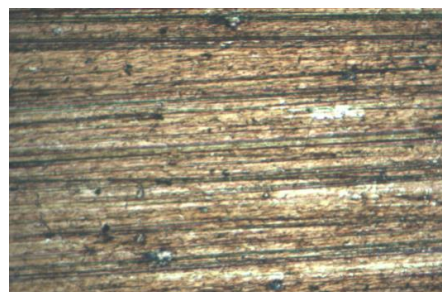


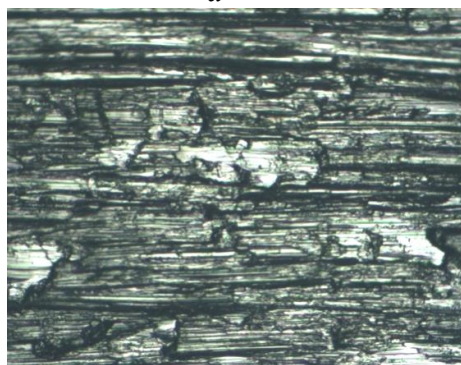
Рис.1. Зависимость толщины изношенного слоя образцов из конструкционной стали 30ХГСН2А от пути трения: 1 – исходный образец; 2 – доза облучения 10^{17} ион/см²; 3 – $5 \cdot 10^{17}$ ион/см²



а



б



в

Рис.2. Микрофотография поверхности образцов стали 30ХГСН2А после испытаний на износ, (x100): *а* – исходный образец; *б* – доза облучения 10^{17} ион/см²; *в* – $5 \cdot 10^{17}$ ион/см².

По данным металлографического анализа отличается и рельеф поверхности имплантированных и исходных образцов после испытаний. На поверхности трения образцов, испытанных в исходном состоянии, формируются каверны, борозды, глубокие задиры, типичные для адгезионного схватывания и изнашивания, рис. 2а. На поверхности трения образцов после дозы облучения $5 \cdot 10^{17}$ ион/см² наблюдаются отдельные выглаженные участки, содержащие медь, без видимых повреждений, рис. 2в. Эти зоны, будучи менее упрочненными, обладают повышенной антифрикционностью и экранируют поверхность стали. Есть основания полагать, что именно эти выглаженные участки стали, обогащенные медью, ответственны за общее снижение уровня разрушения поверхности трения, т.е. количество задиров и следов пропахивания значительно снижено за счет экранирующего действия обогащенных медью зон.

Поверхность трения образцов стали после облучения дозой 10^{17} ион/см² характеризуется достаточно равномерным выглаживанием, отсутствием выраженных задиров и схватывания, рис.2б. Наблюдается равномерное распределение следов меди по поверхности контактного взаимодействия, проявляющих экранирующее действие и способствующих реализации механизма нормального изнашивания.

Таким образом, представленные экспериментальные исследования указывают на три важных фактора влияния ионно-лучевой обработки на триботехнические характеристики легированной стали. Во-первых, имплантация ионов меди в легированную сталь обеспечивает значительное повышение ее износостойкости даже в условиях сухого трения при высоких внешних нагрузках. Во-вторых, положительный эффект имплантации проявляется и в то время, когда первичный ионно-легированный слой уже разрушен. В процессе контактной деформации формируются вторичные модифицированные слои, защищающие поверхностные слои стали от интенсивного разрушения. Изучение механизма формирования вторичных слоев является важной составляющей управления этим процессом и, соответственно, решением задач повышения работоспособности пар трения. В-третьих, использование меди для метода ионно-лучевой обработки перспективно с точки зрения возможности реализации в паре трения режима повышенной износостойкости, что особенно важно для условий применения в среде специальных смазочных материалов [10].

Обсуждение результатов исследования. Анализ литературных данных свидетельствует о перспективности применения ионно-лучевой обработки (в частности ионной имплантации) для модифицирования металлов и сплавов с целью повышения их эксплуатационных свойств (сопротивления усталости, износостойкости, коррозионной стойкости, жаростойкости и др.). С помощью такого вида обработки конструкционные материалы можно легировать любыми элементами, при этом используют пучки ионов газов и металлов, и процесс модифицирования может быть реализован при достаточно низких температурах, не влияющих на характеристики механических свойств материала обрабатываемого изделия. Практика применения ионной имплантации для триботехнических целей указывает на наиболее частое использование ионов азота, углерода и бора для модифицирования поверхности, что вполне объяснимо, учитывая опыт применения химико-термической обработки (азотирования, цементации, борирования) для повышения эксплуатационных свойств [15].

Указывается на несколько причин улучшения свойств конструкционных материалов в результате ионной имплантации. При облучении ионами неметаллов основная из них – это изменение фазового состава поверхностного слоя. Так в [16, 17] установлено, что в

поверхностных микрообъемах формируются нитриды, бориды и карбиды, причем структурный тип формирующихся фаз и концентрация имплантированных элементов зависят от дозы облучения.

Обращают внимание данные по снижению количества мартенсита в нержавеющей стали 304 при имплантации ионов азота и полный распад остаточного аустенита в подшипниковой стали 52100 в результате имплантации титана. Причем процессы структурно-фазовых превращений в легированных сталях при имплантации локализуются в слоях, существенно превышающих средний проекционный пробег иона [17-18], т.е. наблюдается возможность протекания радиационно-стимулированных прямых и обратных структурно-фазовых превращений аустенита и мартенсита в достаточно толстых слоях при ионной имплантации сталей. При этом на характер радиационно-стимулированных превращений влияют эффекты легирования и термические воздействия при обработке пучком ионов. Кроме того, фазовый состав ионно-легированных слоев зависит также от термодинамических и кинетических характеристик системы имплантируемый элемент – облучаемый материал.

Очевидно, что состояние ионно-легированного материала должно также зависеть от вида и режима предшествующей поверхностной обработки, которая определяет не только химический состав, но и структурно-фазовое состояние материала поверхностного слоя, формирующегося в результате внешнего воздействия [19]. Это подтверждается результатами работы [20], в которой образцы из коррозионно-стойкой хромистой стали подвергали облучению ионами азота после предварительной механической полировки. Механическая обработка привела к формированию дисперсной микроструктуры материала в поверхностном слое, поэтому изменила условия последующего зарождения и роста нитридов, а также диффузионную подвижность азота.

В целом ряде работ сообщается о формировании сплошных слоев соединений имплантируемого элемента и основного компонента облучаемого материала: нитридов, силицидов, карбидов [21-24]. Эти слои можно рассматривать как тонкие покрытия на поверхности обрабатываемого материала. Следует подчеркнуть преимущество таких слоев с позиций трибологии – при формировании таких слоев посредством имплантации не возникает традиционный для других методов осаждения покрытий проблемы адгезии между покрытием и подложкой.

Характерная особенность модифицированных слоев связана с тем, что ионная имплантация сопровождается образованием радиационных дефектов: в результате создается развитая дислокационная структура, характеризующаяся наличием дислокационных петель, которые образуются при захлопывании дисков вакансий и межузельных атомов, дислокационных сеток и сплетений. При этом на дислокационных скоплениях происходит зарождение новых фаз при имплантации [16,22]. Поэтому в тонком поверхностном слое, соизмеримом по толщине с ионно-легированным, наблюдается повышение микротвердости [25-27].

Таким образом, наиболее значимое влияние ионной имплантации сводится к изменению структурного состояния материала тонкого приповерхностного микрообъема, к его модифицированию. Износостойкость конструкционных материалов является структурно-чувствительной характеристикой [28], поэтому эффект модифицирования поверхности находит выражение в изменении величин потери на трение и износ.

Важная особенность, которая отмечается практически во всех работах, посвященных изучению влияния ионно-лучевого модифицирования на износостойкость, является тот факт, что толщина слоя с измененной структурой оказывается значительно меньше, чем изнашиваемые при трении слои, т.е. имеет место так называемый «эффект дальнего действия». Эффект дальнего действия был замечен практически с первых публикаций применения ионной имплантации для повышения износостойкости [23]. На рис. 3 показаны зависимости потери

массы образцов от продолжительности испытаний в условиях абразивного изнашивания железа [17]. Стрелками показаны те моменты времени, когда в поверхностном слое образцов уже не наблюдаются сформированные при имплантации нитриды. Видно, что и после удаления ионно-легированного слоя износостойкость имплантированных образцов заметно выше: скорость износа их в два раза ниже, чем неимплантированных.

Благодаря эффекту дальнего действия обосновывается целесообразность использования ионной имплантации для повышения ресурса работы режущего инструмента, штампов, пуансонов и других деталей из сталей и твердых сплавов. Их долговечность с помощью ионно-лучевого модифицирования удается повысить в 2–12 раз [29-33].

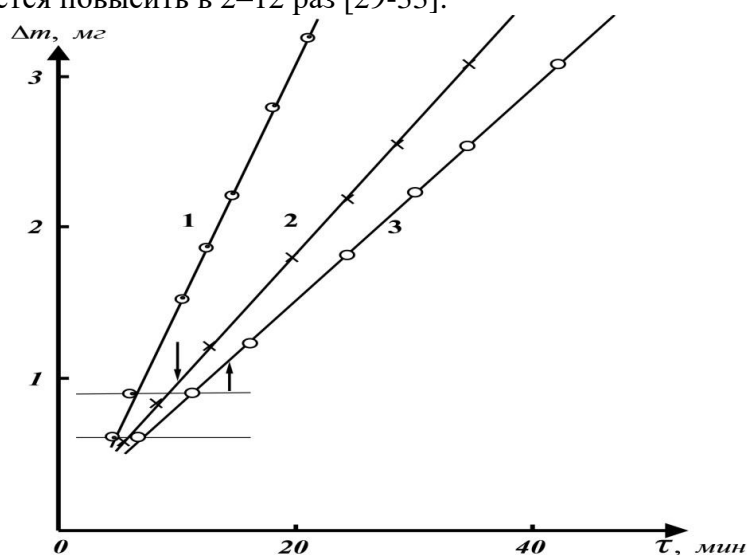


Рис. 3. Зависимость потери массы образцов железа при трении от продолжительности испытаний на абразивный износ: 1 – исходное состояние; 2 – после имплантации азота с дозой $4 \cdot 10^{17}$ ион/см²; 3 – с дозой $6 \cdot 10^{17}$ ион/см² [17].

Важно отметить, что эффект дальнего действия также наблюдается при испытаниях на трение и износ сталей, обработанных методом электроискрового легирования [7], а также после финишной антифрикционной безабразивной обработки образцов стали и чугуна, которые прошли длительные испытания [34].

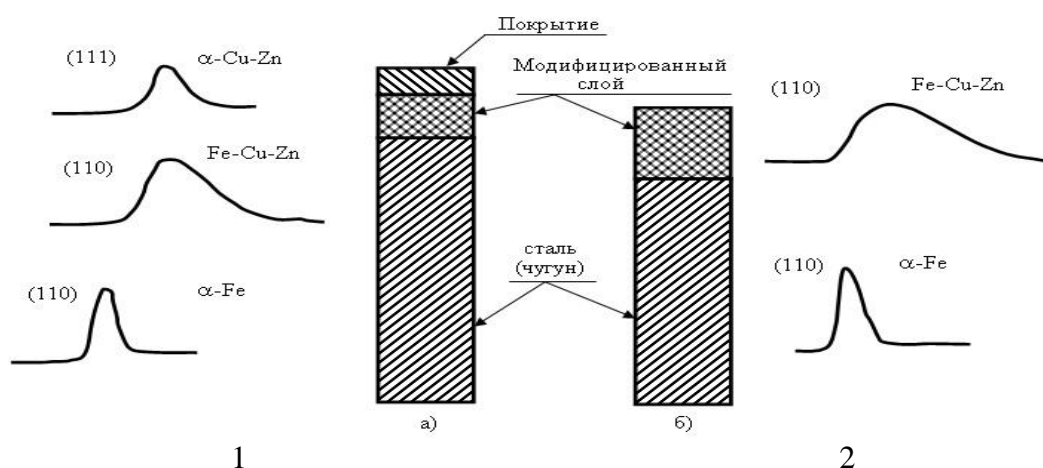


Рис. 4. Фрагменты рентгенограммы слоев различной толщины стали (чугуна) (1,2) и схемы строения поверхностного модифицированного слоя после финишной антифрикционной обработки (а) и испытаний на износ в установившемся режиме (б).

Рис.4 иллюстрирует особенности структуры подповерхностного модифицированного слоя. На поверхность образца из стали 50Г фрикционным методом было нанесено покрытие из латуни состава Cu-Zn толщиной 5 мкм в среде специальной технологической жидкости. Однако, как показал рентгеноструктурный анализ, формируемый при нанесении покрытия поверхностный микрообъем состоит, по меньшей мере, из трех слоев: собственно покрытия (5 мкм), модифицированной зоны толщиной порядка 3 мкм и основы. На стадии приработки покрытие практически полностью изнашивается, создавая мягкие условия формирования площади контакта. При трении в установившемся режиме износостойкость стали оказывается значительно выше по сравнению с необработанным образцом, хотя покрытия в первоначальном виде уже не существует. Связано это с отличительной особенностью механизмов при контактной деформации поверхностных слоев образцов после механической обработки медным сплавом – имеет место процесс постоянного проникновения элементов фрикционного стержня и технологической жидкости в деформируемый при трении микрообъем и формирование вторичных модифицированных зон. Эффект последствия (или дальнего действия по терминологии при ионно-лучевой обработке) является наиболее значимым среди факторов, влияющих на долговечность латунированного сопряжения, сформированного механическим способом.

Таким образом, становится очевидным, что эффект дальнего действия, который реализуется в процессе контактного взаимодействия и износа при трении разных материалов, подвергнутых разным по природе видам поверхностной обработки (модифицирования или нанесения разных по назначению покрытий) вызван процессом самопроизвольной организации структуры подповерхностных слоев в условиях контактной деформации. Материал этого слоя по механическим и физико-химическим свойствам отличается от собственно слоя, сформированного при обработке. Процессы и формоизменение при трении этого подповерхностного слоя, приводящие к эффекту дальнего действия, обеспечивают значительное увеличение ресурса работы сопряжения.

Заключение. Проведенные исследования показали, что модифицирование поверхности образцов из стали 30ХГСН2А ионами меди приводит к повышению ее износостойкости. В условиях сухого трения скольжения уровень поверхностного разрушения зависит от дозы облучения: износ уменьшается в 2 и 1.5 раза при дозах облучения 10^{17} и $5 \cdot 10^{17}$ ион/см² соответственно. Триботехническая эффективность ионно-лучевой обработки легированной стали обусловлена не только благоприятными условиями приработки, благодаря тонкому модифицированному слою, но и эффекту «дальнего действия», который проявляется в условиях высоких нагрузок на сопряжение. Дальнейшее исследование природы этого эффекта, связанного со структурным состоянием материала зон контактной деформации при трении, влиянием состава облучаемого материала, условий его предварительной обработки, а также кинетических и термодинамических характеристик системы имплантируемый элемент – обрабатываемый сплав позволит расширить существующие представления о механизме изменения свойств материалов, подвергнутых ионно-лучевой обработке, расширив тем самым возможности способов повышения эксплуатационных свойств конструкционных материалов.

Список литературы

1. Крылов К.А., Хаймзон М.Е. Долговечность узлов трения самолетов. - М.: Транспорт, 1976. - 183 с.

2. Власов В.М. Работоспособность упрочненных трущихся поверхностей. - М.: Машиностроение, 1987. - 304 с.
3. Кужаров А.С., Бурлакова В.Э., Задощенко 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.
4. 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.
5. Шелех В.К., Леванцевич М.А., Пилипчук Е.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.
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 – 381.
7. Куксенова Л.И., Козлов Д.А. Триботехнические свойства бронзовых покрытий, нанесенных на конструкционную сталь электроискровым легированием. Труды XXI международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество. Metallurgy–2019». – Новокузнецк; Изд. центр СибГИУ, 2019. - Часть 2. С.294 – 297.
8. Кужаров А.С., Кужаров А.А. Избирательный перенос: мифы и реалии // Вестник РУГПС. - 2011. - №. 4. - С.43 – 51.
9. Кандева М., Карастоянов Д., Асенова Е., Якимовска К., Симеонов С., Вензя А. Влияние металлоплакирующей присадки Валена на триботехнические характеристики узла трения сталь 45–BrO5Ц5C5 // Трение и износ. - 2016. - Т. 37, № 2. - С.238 – 243.
10. Гаркунов Д.Н. Научные открытия в триботехнике. Эффект безызносности при трении. Водородное изнашивание металлов. - М.: Изд-во МСХА, 2004. - 540 с.
11. Ионно-лучевая модификация материалов. Труды Всесоюзной конференции. – Каунас, 1989. -233 с.
12. Изменение свойств конструкционных материалов после облучения пучком заряженных частиц. Труды Всесоюзной научной конференции «Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц». – Томск, 1988. - 189 с.
13. Ion implantation technology. Proc.7 Int.Conf. Kyoto. 1988 // Nucl.Instrum. and Mech. Phys. Res. B. 1989. - V.37–38. 994 p.
14. Браун Я.М. Физика и технология источников ионов. - М.: Мир, 1998. - 468 с.
15. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г. Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. - 518 с.
16. Никитин А.А., Травина Н.Т., Гусева М.И. Структурно-фазовые превращения и профили распределения при имплантации ионов азота и бора в стали // Поверхность: Физика, химия, механика. - 1988. - № 7. - С.101 – 107.
17. Ling G., Zhang G., Li H. X-ray diffraction analysis of nitrogen implanted surface layers of iron and steel // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. B. - 1987. - N.22, № 4. - P.504 – 508.
18. Misra M.S., Kustas F.M., Williamson D.L. Microstructural and tribological properties correlation of ion-implanted bearing steels // Thin Solid Films. - 1988. - N.163. - P.365- 371.

19. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. - М.: Машиностроение, 1988. - 240с.
20. Kozubowski J.A., Zielinski W., Gawlik G. TEM studies of nitrogen in surface-treated and implanted 12% chrom steel // Mater. Sci. and Eng. - 1988. - N.100. - P.161 – 167.
21. Mendez J., Violan P., Denanot M. F. Influence of nitrogen implantation on the fatigue properties of metals related to the nature of crack initiation mechanism // Nucl. Instrum. And Meth. Res. B. - 1987. - N.19–20. - P.232 – 235.
22. Aoki T., Gamo K., Namba S. Nickel and cobalt silicide formation by broad and focused ion beam implantation // Nucl. Instrum. And Meth. Res. B. - 1989. - V.4, № 1. - P.291 – 296.
23. Диденко А.И., Лигачев А.Е., Козлов Э.В. Структурные изменения глубинных слоев материалов после модификации ионными пучками и природа его упрочнения // Докл. АН СССР. - 1987. - Т.296, № 4. - С.869 – 871.
24. Singer I.L., Bolster R. N., Pollock H.M. Polishing wear behavior and surface hardness of ion-beam-modified Ti-6Al-4V // Surf. And Coat. Technol. - 1988. - N.36. - P.531 – 540.
25. Onate J.L., Dennis J.K., Hamilton S. Nitrogen implantation of tool steels // Heat treat. Metals. - 1987. - № 3. - P.77 – 82.
26. Terashima K., Minegishi T., Iwaki M. Surface modification of electrodeposited chromium films by ion implantation // Mater. Sci. and Eng. - 1987. - N.90. - P.229 – 236.
27. Beurs H., Novius J.A., Hosson J.T.M. Enhanced wear properties of steel a combination of ion implantation metallurgy and lazer metallurgy // Acta met. - 1988 – V.36, № 12. - P.3123 – 3130.
28. Любарский И.М., Палатник Л.С. Металлофизика трения. - М.: Металлургия, 1976. - 176 с.
29. Величко Н.И., Удовенко В.Ф., Маркус А.М. Влияние имплантации азота на коэффициент трения инструментальной стали // Трение и износ. - 1989. - Т. 10, № 1. - С.164 – 166.
30. Д.А. Александров, С.А, Мубояджан, А.Н. Луценко, П.Л. Журавлева. Упрочнение титановых сплавов методом ионной имплантации и ионного модифицирования // Авиационные материалы и технологии. - 2018. - № 2(51). - С.33 – 39.
31. Карпович А.Н., Белый А.В., Кукареко В.А. Ионно-лучевая обработка аустенитных сталей: триботехнические и коррозионные свойства // Трение и износ. - 2016. - Т. 37, № 6. - С.673 - 676.
32. Сидоров Е.М. Технология упрочнения деталей шарнирных соединений с применением ионной имплантации // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2012. - Вып.2. - С.496 – 503.
33. Lempert G.D. Practical application of ion implation for modifying tribological properties of metals // Surf. And Coat. Technol. - 1988. - V.34, № 2. - P.185 – 207.
34. Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Лаптева В.Г. Износостойкость конструкционных материалов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. - 237с.

Дата поступления: 30 октября 2020 г.