

Ким В.А., Каримов Ш.А.
Kim V.A., Karimov Sh.A.

РОЛЬ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ В КОНТАКТНЫХ ПРОЦЕССАХ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ

THE ROLE OF WEAR-RESISTANT COATINGS IN CONTACT PROCESSES OF FRICTION AND WEAR



Ким Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtnm@knastu.ru.

Mr. Vladimiv A. Kim – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Materials Technology and New Materials Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: kmtnm@knastu.ru



Mr. Shoir A. Karimov – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Construction Materials Engineering, Tashkent State Technical University, Uzbekistan

Аннотация. Износостойкие покрытия повышают триботехнические характеристики поверхности не только за счет прочностных и фрикционных свойств, они также активно участвуют в формировании вторичных структур, создавая оптимальные условия для структурной приспособляемости. Сделана попытка раскрытия роли «островковости» в процессах контактного взаимодействия, трения и износа.

Summary: Wear-resistant coatings not only improve the tribotechnical characteristics of a surface due to their durable and frictional properties, they also actively participate in the development of secondary structures, creating optimum conditions for structural adaptation. An attempt is made to reveal the role of “islands” in contact interaction, friction and wear.

Ключевые слова: трение, износ, покрытия, износостойкость, напряжения, тепло, диффузия, вторичные структуры.

Keywords: friction, wear, surface, wear resistance, tension, heat, diffusion, secondary structures

УДК 621.81.4017+621.896

Введение

Износостойкие покрытия широко используются в машиностроении как средство повышения эксплуатационной надежности пар трения и работоспособности металлорежущего инструмента. Роль износостойких покрытий в триботехнических процессах объясняется экранирующей способностью, блокирующей прямой фрикционный контакт материалов; высокой степенью стехиометрии, обеспечивающей слабое адгезионное взаимодействие и низкий коэффициент трения; высокой твердостью и прочностью самого материала покрытия [1; 2]. Положительная роль износостойкого покрытия проявляется не только в период его существования как физического самостоятельного объекта, но и после его разрушения. Известно,

что при эксплуатации режущего инструмента износостойкие покрытия на рабочих поверхностях исчезают после 5...10 мин резания, а стойкость инструмента при этом повышается более чем в два раза и по времени составляет 1,5...3,0 ч [3; 4; 5].

В статье рассматривается роль износостойких покрытий, обеспечивающих благоприятные условия для протекания структурной приспособляемости в триботехнических процессах и развития вторичных контактных структур с повышенной износостойкостью.

Технологии нанесения износостойких покрытий и «островковость»

Большинство технологий нанесения износостойких покрытий создает на поверхности композиционную структуру с высокими антифрикционными или прочностными свойствами [5]. Развитие покрытия начинается с активных зон осаждения материала, в которых образуются «островки», а затем по мере их роста формируется сплошной слой. Многие процессы нанесения покрытий предусматривают только развитие «островков» и образование покрытия с разной степенью нарушения сплошности. При нанесении покрытий электроискровым легированием и электроимпульсным припеканием порошковых материалов нарушение сплошности возникает за счет дискретности самих физических процессов массопереноса и импульсного воздействия, лежащих в основе этих технологий [6]. При нанесении карбидных и нитридных покрытий методом КИБ на стальную поверхность первичными центрами осаждения являются цементитная сетка и карбиды, расположенные в мартенситной матрице [7; 8]. Первичными центрами осаждения гальванических покрытий являются микролокальные зоны с повышенным катодным потенциалом и вершины микронеровностей [9].

Кинетика осаждения и роста покрытия определяет прочность связи с основой. Сцепляемость «островков» с подложкой выше, чем в остальных зонах. Характер роста «островковости» наследственно отражается на структуре и архитектонике покрытия в виде разнотолщинности, структурной неоднородности и пористости. На рис. 1 представлена поверхность покрытия из ВК6М, нанесенного электроискровым легированием на закаленную сталь У10. Следы несплошности проявляются в виде темных зон, а участки сплошных покрытий имеют выраженное ячеистое строение.

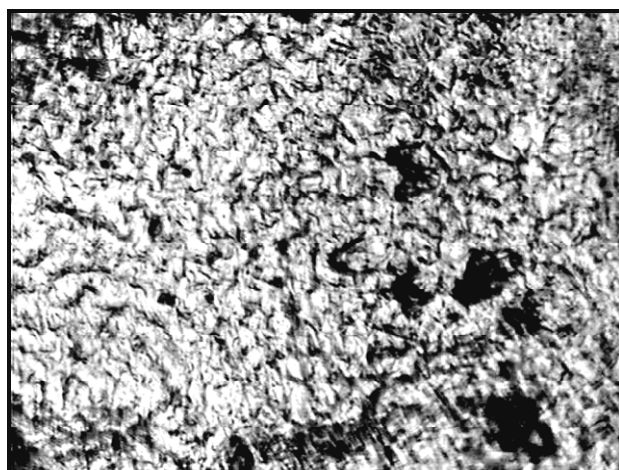


Рис. 1. Покрытие, полученное электроискровым легированием закаленной стали У10 легирующим электродом из ВК6М (x400)

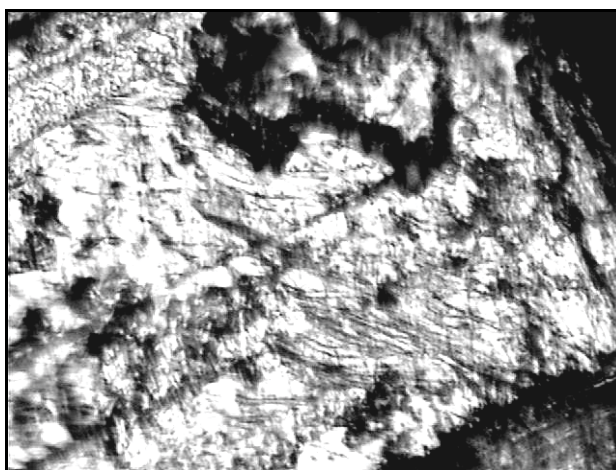


Рис. 2. Электроискровое покрытие из ВК6М на поверхности закаленной стали У10 после трения (x400)

В триботехнических процессах даже в первоначальном сплошном и структурно-однородном покрытии за счет динамических процессов контактного взаимодействия в начальном периоде эксплуатации происходят растрескивание и отслаивание наиболее слабых мест покрытия, и на поверхности трения образуется вторичная «островковость». На рис. 2

изображена поверхность покрытия из ВК6М после трения по серому чугуноу СЧ 21 в течение 0,5 ч. Видны границы вторичных островковых образований и участки, лишенные покрытия, при этом сами островковые образования покрыты сеткой трещин мезомасштабного уровня.

Образование «островковых» покрытий меняет условия контактного взаимодействия, приводя к изменению эпюры контактных напряжений. Рассмотрим этот вопрос более подробно. Островки покрытий отличаются более высокой прочностью сцепления с основой и выполняют роль мезомасштабных платформ, через которые осуществляются контактное взаимодействие и передача силовых нагрузок подложке. Площадь отдельного островкового участка покрытия значительно превышает площадь элементарного фактического контакта (см. рис. 3, а, б). Это позволяет пиковые трибоконтактные напряжения, действующие на наружную поверхность мезомасштабных платформ, преобразовывать в более низкие и равномерно распределенные контактные напряжения между островковыми фрагментами и подложкой (см. рис. 3, в, г), в результате происходит ощутимое снижение общих контактных напряжений, действующих на подложку, а их эпюра принимает более равномерно распределенный характер. Выравнивание пиковых напряжений между островками покрытий и подложкой зависит от толщины покрытия и его упругих свойств, с повышением которых эпюра распределения напряжений принимает более равномерно распределенный характер.

Наличие на поверхности трения островковых зон покрытий меняет характер пластической деформации подповерхностного слоя. Во-первых, само покрытие снижает коэффициент трения и температуру контакта. Во-вторых, пластическая деформация поверхностных слоев теряет микролокальный характер и выходит на мезомасштабный уровень, так как для осуществления пластического сдвига необходимо смещение всего островкового элемента и примыкающего к нему слоя. Такой характер деформации тормозит развитие в поверхностных слоях фрагментации, блокирует образование ротационных мезоструктур и не позволяет развиваться активным концентраторам напряжений на самой поверхности покрытия. В результате повышается износостойкость поверхностного слоя в целом.

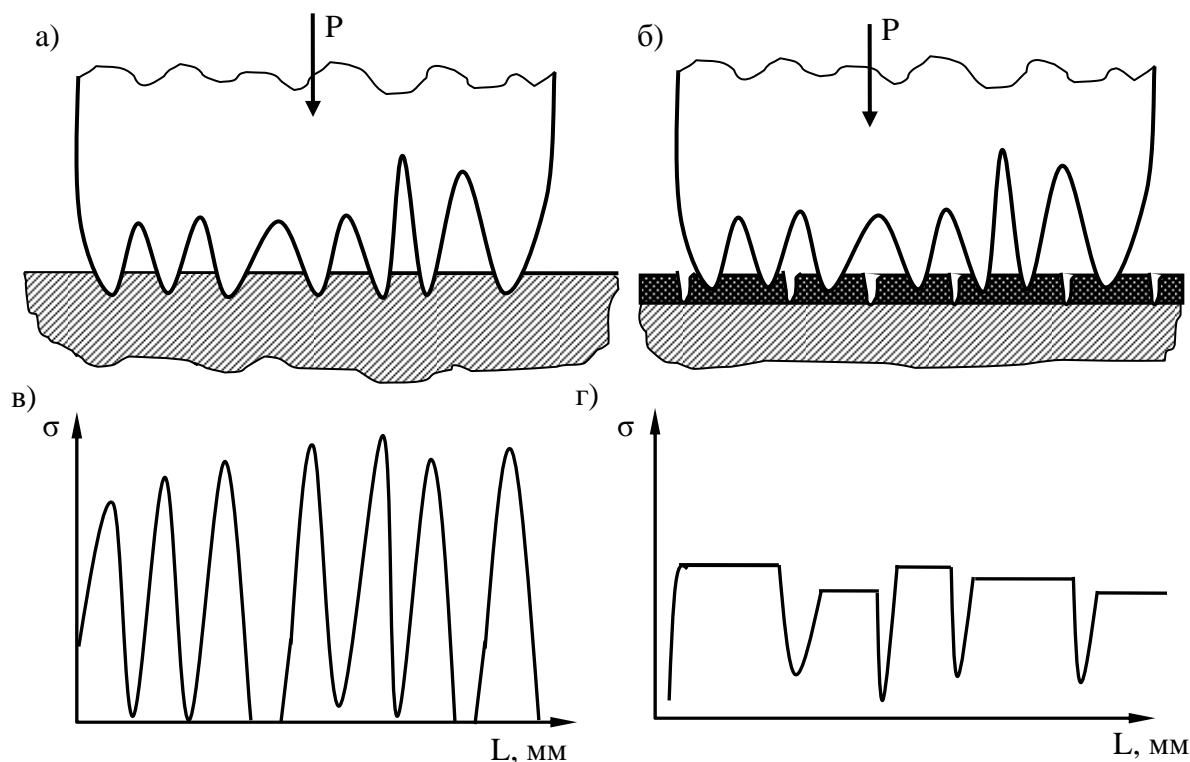


Рис. 3. Влияние «островковости» покрытия на характер распределения нормальных контактных напряжений

Большинство технологий нанесения покрытий связаны с осаждением частиц, находящихся в расплавленном состоянии, или в момент бомбардировки происходит тепловой импульс, приводящий к оплавлению частицы. При кристаллизации в осаждаемой частице возникают внутренние напряжения растяжения, а в подложке – сжатия. В сплошном материале невозможен разрыв напряжений, поэтому между покрытием и подложкой возникает переходная зона с высоким градиентом внутренних напряжений. Возникающая в области контакта эпюра упругих напряжений представлена на рис. 4.

В процессе эксплуатации покрытие подвергается различным силовым и тепловым нагрузкам. Растягивающие напряжения, параллельные плоскости контакта, вызывают развитие трещин. Вершина трещины, проходя через покрытие, выходит в подложку и останавливается в своем развитии, так как оказывается в полях сжимающих напряжений. Чем больше градиент напряжений в переходном слое толщиной δ , тем выше устойчивость трещины.

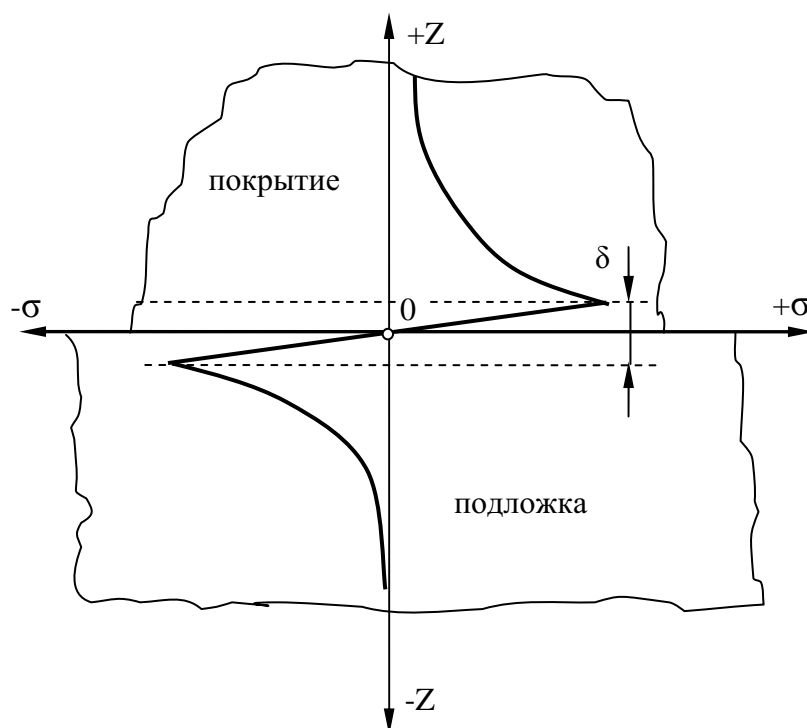


Рис. 4. Эпюра упругих напряжений в области контакта покрытия с подложкой

Развитие вторичной островковости имеет место при работе модифицированных поверхностных структур градиентного типа. Градиентную структуру можно представить как совокупность послойно распределенных бесконечно тонких пластин, каждая из которых имеет свое значение химического потенциала, при этом сами пластинки располагаются в порядке снижения химического потенциала от верхнего слоя к нижнему. Прочность связи между пластинками носит также градиентный характер от максимального значения на поверхности до минимального в глубине.

При механическом воздействии на такую поверхностную структуру слой верхнего уровня воспринимает внешнюю нагрузку, которая наводит в нем поля напряжений и деформаций. Характер неоднородности распределения напряжений и деформаций определяется эпюрой внешнего нагружения. Далее деформация передается нижележащему слою, наводя в нем более однородные поля напряжений и деформаций. Степень повышения однородности

полей будет пропорциональна разности химических потенциалов между слоями и прочности связей между ними. И этот процесс повторяется от слоя к слою, снижая и выравнивая контактные напряжения.

На рис. 5, а приведена архитектура поверхностного слоя после развития вторичной островковости, а на рис. 5, б – характер распределения химического потенциала по глубине. Роль мезоплатформ в этом случае выполняют слои верхнего уровня с повышенной величиной химического потенциала и высокой сцепляемостью между собой. В качестве количественной характеристики островковости можно принять плотность трещин, тогда их величина по глубине будет носить падающий вид. Устойчивость трещин самого нижнего уровня должен обеспечивать коэффициент интенсивности напряжений, величина которого должна быть ниже вязкости разрушения основного материала.

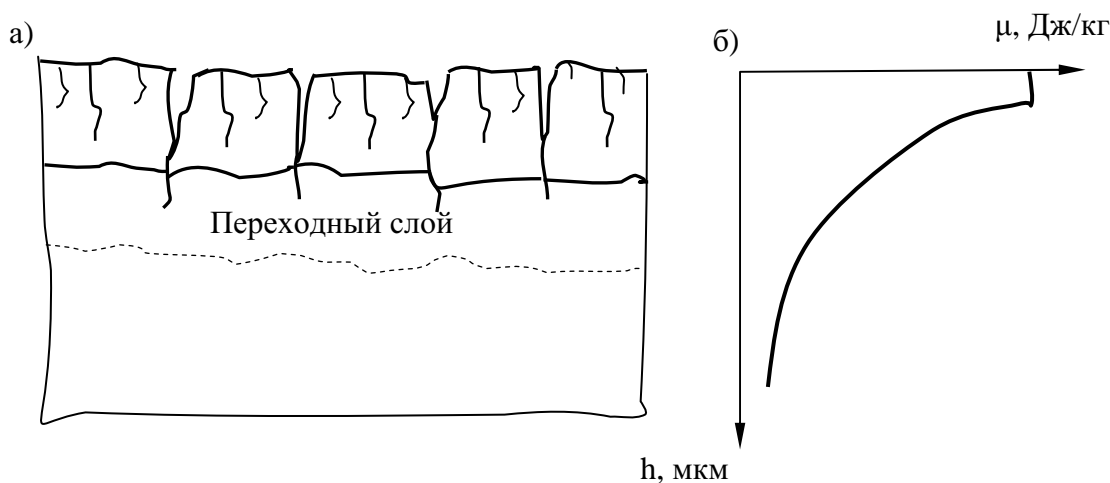


Рис. 5 Архитектура поверхностного слоя с защитным покрытием градиентной природы

В случае упругого контакта интенсивность износа может быть определена [1]

$$I = C \left(\frac{q_a \vartheta}{K_v} \right)^{1+\beta t} \left(\frac{K_f}{\sigma_0} \right)^t \left(\frac{R_{\max}}{R} \right)^{\frac{t(1+\beta)}{2}} \left(\frac{1}{\eta_c b} \right)^{\beta t}.$$

Само условие упругого контакта подчеркивает, что пластическая деформация проявлялась только в период приработки, при этом основной механической характеристикой поверхностной структуры является постоянная упругости, обратно пропорциональная модулю упругости.

Наличие упрочненного покрытия приводит к изменению упругих и микрогеометрических характеристик контактируемой поверхности. Если учитывать только изменение упругих свойств, то повышение износостойкости можно оценить

$$K_{\text{упр}} = \frac{I}{I_{\text{упр}}} \approx \left(\frac{E_{\text{упр}}}{E_0} \right)^{1 + \frac{t}{2\nu+1}},$$

где $E_{\text{упр}}$ – модуль упругости упрочненного слоя; E_0 – модуль упругости подложки; ν – коэффициент Пуассона; t – показатель усталостной прочности материала.

На рис. 6 приведено влияние нормального давления на удельный износ инструментальной стали У10, упрочненного электроискровым легированием, при трении о серый чугун

Сч 21. Под удельным износом понимают изменение ширины площадки износа, отнесенной к нормальному давлению при трении призматического образца о плоскую поверхность. В качестве легирующего электрода применялся твердый сплав ВК6М. Видно, что нанесение износостойкого покрытия в 2...3 раза повышает износостойкость упрочненной поверхности.

В трибологических процессах большая часть энергии контактного взаимодействия выделяется в виде тепла и незначительная доля затрачивается на повышение химического потенциала поверхностных структур. Основной отвод тепла из зоны контактного взаимодействия происходит за счет теплопроводности в области, примыкающей к контактной поверхности, в результате чего формируется градиент температуры, направленный к поверхности. Градиенты температур и напряжений в конечном итоге проявляются на градиенте химического потенциала.

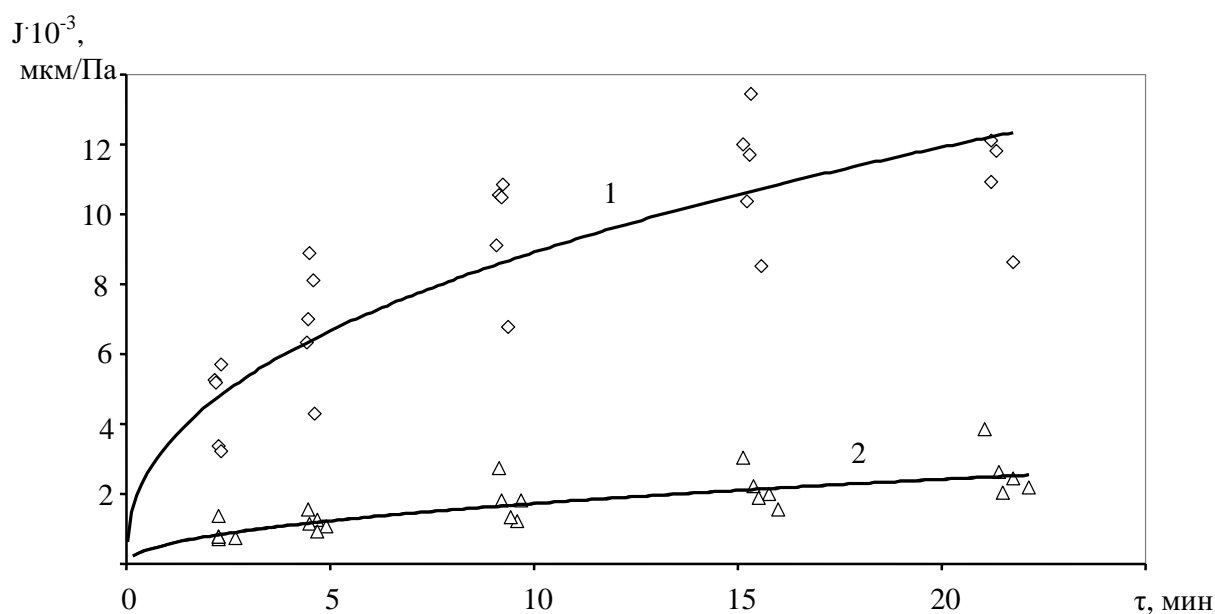


Рис. 6. Зависимость удельного износа стали У10 от продолжительности трения о серый чугун СЧ 21: 1 – без упрочнения; 2 – электроискровое легирование электродом из ВК6М

Градиент химического потенциала и высокая степень пластической деформации формируют массовые потоки диффузионного характера, направленные от поверхности в глубь объема. Для организации диффузионного потока необходимо разложение компонентов покрытия на активные частицы атомарного или ионного типа. Развитие таких потоков из элементов покрытий, создаваемых ионной имплантацией, лазерным локальным легированием, электроискровым упрочнением и гальваническим осаждением, с энергетической точки зрения является возможным и подтверждается экспериментально [4]. Вопрос о диссоциации нитридов и карбидов тугоплавких металлов, входящих в состав покрытий, наносимых методом КИБ, остается открытым. Но на возможность этого процесса указывают экспериментальные результаты, фиксирующие проникновение элементов покрытия в глубь на величину, значительно превосходящую толщину фрагментации с ротационными элементами [11].



Заключение

Износостойкие покрытия являются активным звеном триботехнической системы, определяющей условия контактного взаимодействия.

Островковость покрытия приводит к снижению пиковых контактных напряжений, формирует поля сжимающих напряжений в переходном слое, что приводит к повышению вязкости разрушения и, как следствие этого, трещиностойкости.

Градиенты температур и напряжений при трении активизируют диффузионные процессы между покрытием и основой, приводя к структурной приспособляемости упрочненных поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по трибонике. Т. 1. Теоретические основы / под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
2. Износ в парах трения как задача физической мезомеханики / В. Е. Панин, А. В. Колубаев, А. И. Слосман, С. Ю. Тарасов, С. В. Панин, Ю. П. Шаркеев // Физическая мезомеханика. – 2000. – Т. 3. – № 1. – С. 67-74.
3. Мур, Д. Основы и применение трибоники / Д. Мур. – М.: Мир, 1978. – 488 с.
4. Ким, В. А. Самоорганизация в процессах упрочнения, трения и изнашивания режущего инструмента / В. А. Ким. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 203 с.
5. Григорьев, С. Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента / С. Н. Григорьев. – М.: Машиностроение, 2009. – 368 с.
6. Верхотуров, А. Д. Физико-химические основы процесса электроискрового легирования металлических поверхностей / А. Д. Верхотуров. – Владивосток: Дальнаука, 1992. – 180 с.
7. Барвинок, В. А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий / В. А. Барвинок. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
8. Брюхов, В. В. Повышение стойкости инструмента методом ионной имплантации / В. В. Брюхов. – Томск: Изд-во НТЛ, 2003. – 120 с.
9. Гамбург, Ю. Д. Гальванические покрытия. Справочник по применению / Ю. Д. Гамбург. – М.: Техносфера, 2006. – 216 с.
10. Макушок, Е. М. Массоперенос в процессах трения / Е. М. Макушок, Т. В. Калиновская, А. В. Белый. – Минск: Наука и техника, 1978. – 272 с.
11. Болохонов, Р. Р. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р. Р. Болохонов, А. В. Болеста; под ред. В. Е. Панина. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.