

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА
MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS

УДК 621.787+621.7/9

Поступила в редакцию 27.01.2017
Received 27.01.2017

П. А. Витязь¹, В. И. Жорник²

¹*Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

²*Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

**МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРИИ ПОВЕРХНОСТИ И НАНОТЕХНОЛОГИИ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ИЗНАШИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Аннотация. Изложены физико-химические основы формирования наноструктурного состояния материала и описаны технологические приемы получения наноструктурированных материалов и покрытий, используемые в методах инженерии поверхности. Приведена информация о степени влияния режимов обработки при газотермическом напылении, электрохимическом осаждении, микродуговом оксидировании, трибомеханической обработке и фрикционном плакировании гибким инструментом на процессы формирования структурно-фазового состояния и уровень свойств поверхностного слоя. На основе проведенных исследований создано новое поколение технологий поверхностной инженерии. Формируемые покрытия и поверхностные слои сохраняют стабильность структурно-фазового состояния в условиях высоких нагрузок и температур и способны длительное время противостоять изнашиванию, термическому и коррозионному воздействию. Показаны примеры практической реализации разработанных методов инженерии поверхности и нанотехнологий для промышленных предприятий. Более чем на 50 предприятиях Беларуси, России, Кореи и других стран созданы производственные мощности и освоены технологии нанесения покрытий и модифицирования поверхностных слоев активированными методами инженерии поверхности. Использование разработанных наноструктурированных материалов и покрытий, а также методов и средств реализации технологий инженерии поверхности позволяет поднять технический уровень создаваемой машиностроительной техники, снизить себестоимость ее производства и повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции.

Ключевые слова: инженерия поверхности, структурно-фазовое состояние, наноструктурированные материалы и покрытия, газотермическое напыление, электрохимическое осаждение, микродуговое оксидирование, трибомеханическая обработка, фрикционное плакирование гибким инструментом

Для цитирования. Витязь, П. А. Методы инженерии поверхности и нанотехнологии для повышения ресурса изнашиваемых поверхностей / П. А. Витязь, В. И. Жорник // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2017. – № 3. – С. 30–46.

P. A. Vityaz¹, V. I. Zhornik²

¹*Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

²*Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**METHODS OF SURFACE ENGINEERING AND NANOTECHNOLOGIES
FOR IMPROVED RESOURCE OF WEAR SURFACES**

Abstract. The physical and chemical basis of formation of nanostructured state of material are represented and processing methods of nanostructured materials and coatings used in surface engineering are described. The information about the degree of influence of treatment regimes of gas-thermal spraying, electrochemical deposition, microarc oxidation, tribomechanical treatment and frictional cladding by a flexible tool on the processes of formation of structural-phase state and the level of the surface layer properties is given. A new generation of surface engineering technologies on the basis of the research is developed. The formed coating and surface layers maintain stability of structural-phase state under high loads and temperatures and have high wear resistance, thermal resistance and corrosion resistance for a long time. The examples of practical implementation of the developed methods of surface engineering and nanotechnologies for industrial plants are shown. Manufacturing sites are built and the developed technologies of coating application and modification of the surface layers by the activated surface engineering methods are used in more than 50 enterprises of Belarus, Russia, Korea and other countries. The using of developed

nanostructured materials and coatings as well as methods and means of surface engineering technologies allows increasing the technical level of the engineering techniques, reducing the cost of production and improving the competitiveness of products.

Keywords: surface engineering, structural-phase state, nanostructured materials and coatings, gas-thermal spraying, electrochemical deposition, microarc oxidation, tribomechanical treatment, frictional cladding by flexible tool

For citation. Vityaz P. A., Zhornik V. I. Methods of surface engineering and nanotechnologies for improved resource of wear surfaces. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 3, pp. 30–46 (in Russian).

Введение. Инженерия поверхности представляет собой область науки, техники и технологии, объединяющую методы направленного изменения физико-химических свойств поверхностных слоев материалов путем механической, термической, химико-термической, термомеханической обработки поверхности, электрофизического модифицирования поверхностного слоя, нанесения покрытий различными методами. Для создания современной энергонасыщенной и высокопроизводительной техники требуются новые высокопрочные, износо- и коррозионно-стойкие материалы и покрытия. Сочетание высокоэффективных методов инженерии поверхности с формированием наноструктурированного состояния поверхностного слоя обеспечивает создание объектов техники с повышенным уровнем потребительских свойств [1–3].

Современные методы получения наноструктурированных материалов и покрытий базируются на протекании различных физико-химических процессов на поверхности и в подповерхностном объеме материала, как-то: осаждение наноконпозиционных покрытий в процессе электрохимической обработки в электролите с наноразмерной дисперсной фазой или ионно-вакуумного распыления композиционных мишеней; формирование мелкодисперсной структуры в результате интенсивной пластической деформации поверхностных слоев; создание дисперсно-упрочненных структур в поверхностном слое за счет синтеза наноразмерных упрочняющих фаз в матричном материале при ионной обработке и др.

Для координации научных исследований и технологических разработок в области инженерии поверхности при Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси организован Международный центр инженерии поверхности, в задачи которого, в частности, входит консолидация усилий научных работников и инженерно-технических специалистов различных научно-исследовательских организаций и промышленных предприятий, нацеленных на разработку новых наноструктурированных материалов и покрытий и создание на их основе современной конкурентоспособной техники. Основными научными направлениями в разработке наноструктурированных материалов и покрытий для инженерии поверхности, развиваемыми в организациях НАН Беларуси и Министерства образования Республики Беларусь, являются:

формирование наноструктурированных пленок и покрытий различными технологическими приемами;

получение наноструктурированных сверхтвердых инструментальных материалов для высокоскоростной абразивной и лезвийной обработки;

создание наноконпозиционных пластичных смазочных материалов, реализующих эффект трибомодифицирования трущихся поверхностей;

разработка технических средств для реализации технологий инженерии поверхности с использованием наноструктурированных материалов и покрытий;

установление областей рационального применения наноструктурированных адаптивных триботехнических и инструментальных материалов и покрытий.

Целью настоящей работы является изложение физико-химических основ и технологических приемов формирования наноструктур, которые используются в методах инженерии поверхности, разрабатываемых в Международном центре инженерии поверхности при Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси.

Материалы и методы исследования. Для нанесения покрытий использовались следующие методы инженерии поверхности: газотермическое напыление (в частности, гиперзвуковая металлзация), электрохимическое осаждение, микродуговое окисление, трибомеханическая обработка, плакирование гибким инструментом (вращающейся металлической щеткой). Газотермические покрытия формировались распылением проволок из сталей 40X13, 06X19H9T, X18H10T

и 12X18H10T. Для модифицирования газотермических покрытий использовалось ионно-лучевое азотирование. Электрохимические покрытия осаждались из универсального электролита хромирования (250 г/л CrO_3 , 2,5 г/л H_2SO_4), для модифицирования хромовых покрытий в состав электролита вводились ультрадисперсные алмазы (УДА) детонационного синтеза (ТУ Республики Беларусь 28619110.001-95) или ультрадисперсная алмазно-графитовая шихта (УДАГ, ТУ Республики Беларусь 100056180-2003) производства НП ЗАО «Синта». Микродуговое оксидирование алюминиевых сплавов Д16, АМг6, АК12М2МгН проводилось в силикатно-щелочном электролите (5,5 г/л Na_2SiO_3 , 2 г/л KOH), в состав которого вводились углеродные наноматериалы (УНМ) в виде шихты УДАГ. Трибомеханическое модифицирование осуществлялось в процессе приработки поверхности трения в присутствии пластичной смазки Литол-24 или промышленного масла И-20А, модифицированных УДАГ. При фрикционном плакировании гибким инструментом в качестве последнего использовалась проволоочная щетка из стали 65Г с диаметром проволоки 0,25 мм. Покрытия формировались из медных сплавов, модифицированных антифрикционными добавками (графит, дисульфид молибдена) и наноразмерной алмазно-графитовой шихтой. Исследования структурно-фазового состояния и свойств нанесенных покрытий и модифицированных поверхностных слоев осуществлялись методами рентгеноструктурного анализа, сканирующей электронной, атомно-силовой и оптической микроскопии, дюротрии и трибодиагностики.

Результаты и их обсуждение

Физико-химические основы формирования наноструктур в инженерии поверхности.

Существуют два принципиально различающихся подхода к формированию наноструктур, которые могут быть реализованы как при получении дисперсных наноматериалов и объемных наноструктурированных материалов различными методами, так и при формировании поверхностных наноструктурированных слоев методами инженерии поверхности. Один из них, который получил название «снизу вверх», представляет собой консолидацию отдельных атомов в более крупные образования. Он основан на процессах испарения-конденсации, химического осаждения, окисления-восстановления и в инженерии поверхности может быть реализован, например, методами ионно-вакуумного, химического и электрохимического осаждения, газотермического и динамического напыления, микроплазменной обработки и др. Второй вариант формирования наноструктур, называемый «сверху вниз», предусматривает дробление крупных частиц и зерен на более мелкие структурные составляющие. Этот подход базируется на процессах механического измельчения, интенсивной пластической деформации, высокодозных облучений и в инженерии поверхности проявляется, в частности, в методах обкатки поверхности телами качения (шариками, роликами), чеканки, дробеструйной и трибомеханической обработки и др. [1, 4, 5].

При создании наноструктур по принципу «снизу вверх» процесс формирования новой фазы из отдельных атомов обычно включает две основные стадии: образование зародышей новой фазы и их дальнейший рост. Для формирования наноструктуры необходимо, чтобы число образующихся зародышей в единицу времени было велико, а линейная скорость их роста мала. Скорость возникновения зародышей зависит от многих характеристик системы: температуры, состояния поверхности, природы фаз и других факторов. С термодинамической точки зрения зарождение новой фазы связано с двумя процессами: собственно формированием новой структуры и с возникновением в исходном объеме поверхности раздела, ограничивающей некоторое количество новой фазы [5, 6].

Для так называемого гомогенного зародышеобразования процесс зарождения протекает в условиях, когда частицы новой фазы не соприкасаются с поверхностью какого-либо твердого тела. Гомогенное образование зародышей при получении наносред встречается в методах испарения-конденсации, химического диспергирования [5, 7]. В этих условиях появление новой фазы будет термодинамически выгодно, если уменьшение объемной свободной энергии от фазового превращения ΔG_f при образовании зародышей из m частиц больше, чем энергетические затраты на образование поверхности раздела $\Delta G_{\text{пов}}$:

$$\Delta G = -\Delta G_f m + \Delta G_{\text{пов}} < 0.$$

Чтобы процесс стал термодинамически вероятным, слагаемое $\Delta G_f m$ должно быть по модулю как можно больше, а $\Delta G_{\text{пов}}$ – как можно меньше. В процессе получения наноматериалов необходимо создавать условия для достижения минимальных или максимальных (по модулю) значений ΔG_f . Увеличение неравновесности системы приводит к получению материалов с меньшим размером частиц. Следовательно, в процессах получения наноматериалов целесообразно создание неравновесных условий. Например, в методе испарения-конденсации необходимо высокое давление паров конденсируемого вещества; в методе химического осаждения – пересыщение исходного раствора; при распылении расплава – большая скорость охлаждения.

Поверхностная составляющая изменения энергии Гиббса $\Delta G_{\text{пов}}$ зависит от формы зародыша и его мерности. Для двумерного зародыша, который может иметь форму, например, плоского диска, величина изменения энергии Гиббса связана с работой преодоления линейного натяжения γ при образовании периметра l , то есть $\Delta G_{\text{пов}2} = \gamma l$, а для трехмерного зародыша в виде сферы, куба, цилиндра и т. д. изменение энергии Гиббса характеризует работу по образованию поверхности $\Delta G_{\text{пов}3} = \sigma S$, где σ – удельная поверхностная энергия, S – площадь поверхности. Наиболее вероятной трехмерной формой зародыша является шарообразная, так как она отвечает минимуму энергии, необходимой для его создания [8].

Для процесса гетерогенного зародышеобразования, происходящего под влиянием поверхности какого-либо твердого тела, изменение энергии Гиббса системы представляет собой сумму трех членов [5]: изменения объемной энергии – $\Delta G_f m$, изменения поверхностной энергии при возникновении поверхности раздела между новой и материнской фазой $\Delta G_{\text{пов}}$, а также изменения свободной энергии при образовании границы между зародышем и подложкой $\Delta G_{3-п}$

$$\Delta G = -\Delta G_f m + \Delta G_{\text{пов}} + \Delta G_{3-п}.$$

В случаях, когда поверхностная энергия на границе возникшего кристалла и подложки $\Delta G_{3-п}$ меньше, чем на границе кристалл – материнская фаза $\Delta G_{\text{пов}}$, наблюдается облегчение зародышеобразования в присутствии поверхности твердой фазы. Если расположение атомов на поверхности подложки близко к расположению атомов на сопрягающейся поверхности кристалла, то выигрыш в энергии будет особенно значительным.

Для увеличения числа зародышей в процессе получения наноматериалов целесообразно применение различных модификаторов (дисперсно-упрочняющих добавок). В частности, модифицирование с целью измельчения зерна может быть реализовано путем введения в исходную смесь малых количеств (0,001–0,1 %) растворимой поверхностно-активной примеси или нерастворимой примеси, обладающей структурным и размерным соответствием с кристаллизующимся металлом [5, 9].

В реальных структурах всегда присутствуют междоузельные атомы, границы зерен, дефекты упаковки, дислокации, различные примеси и включения и т. п. Наличие дефектов уменьшает энергию Гиббса зародышеобразования, катализирует этот процесс в некоторых случаях настолько, что зарождение новой фазы может протекать без преодоления значительных энергетических барьеров. Поэтому расположение новой фазы определенным образом относительно дефектов может быть сопряжено с выигрышем энергии по сравнению с зародышеобразованием в идеальной решетке. Этот эффект используется при получении наноматериалов в процессах механоактивации, в методе циклических превращений [1, 10, 11].

Для образования наноструктур увеличение размеров зародышей в ходе процесса должно быть минимальным. Скорость их роста c можно описать с помощью двух крайних режимов. Первый из них – кинетический, или бездиффузионный, имеет место, когда рост зародыша определяется процессами на границе раздела фаз, например адсорбцией, химической реакцией и т. п. Скорость роста в этом случае пропорциональна концентрации атомов в окрестности зародыша C и частоте ν , с которой эти атомы встраиваются в решетку наночастицы: $c = \nu C$. В этом случае линейные размеры частицы пропорциональны времени ее роста. Во втором случае механизм

формирования зародышей будет диффузионным, а их рост – диффузионно-контролируемым. При этом требуется перенос на значительные расстояния атомов различных компонентов. Скорость роста в этом случае пропорциональна скорости диффузии атомов к границам растущих зародышей, а кинетику процесса можно описать решением соответствующего уравнения диффузии. В данном случае линейный размер формирующейся частицы возрастает пропорционально времени t [5].

На практике встречаются также и промежуточные режимы образования зародыша новой фазы, и смена одного режима другим в ходе процесса.

При получении наноструктур по механизму «сверху вниз» под измельчением понимают уменьшение начального размера частиц и зерен материала путем разрушения их под действием внешних усилий, преодолевающих внутренние силы сцепления. Механическое воздействие на материал при измельчении, как правило, осуществляется импульсно и локально. Механическое воздействие происходит не во всей массе твердого вещества, а лишь там, где возникает и затем релаксирует поле напряжений [5, 10, 12].

Существует несколько путей релаксации поля напряжений: выделение тепла, создание новой поверхности, образование различных дефектов в кристаллах. Основной механизм релаксации зависит от свойств вещества, условий нагружения (подведенной энергии, соотношения между давлением и сдвигом), а также размеров и формы частиц. С увеличением мощности и времени воздействия происходит постепенный переход от релаксации путем выделения тепла к снятию напряжений путем пластической деформации, разрушения и диспергирования материала.

Для измельчения материала на него должны воздействовать различные усилия (сжатие, удар, истирание и др.), под действием которых напряжение в деформирующемся теле превышает предел прочности материала. Работа A , затрачиваемая на измельчение при дроблении твердых тел, в общем случае является суммой энергии упругой деформации, выделенной теплоты и энергии образования новых поверхностей, появление которых в конечном счете и является целью размола [5]:

$$A = E_p + E_d + Q,$$

где E_p – энергия, расходуемая на образование новых поверхностей раздела при разрушении твердых тел, которая определяется как $E = \sigma \Delta S$ (σ – поверхностная энергия, ΔS – приращение поверхности при измельчении); E_d – энергия упругой деформации, $E_d = K \Delta V$ (K – работа упругой деформации единицы объема твердого тела, ΔV – объем тела, подвергшегося деформации); Q – выделенная теплота.

При формировании наноструктур методом интенсивной пластической деформации процесс структурообразования носит ярко выраженный стадийный характер [5, 12]. Первая стадия соответствует небольшим степеням деформации, и для нее характерно возникновение ячеистой структуры с углом разориентировки между ячейками 2–3° с образованием клубков и сплетений дислокаций, постепенно заполняющих весь объем исходных зерен. На второй стадии наблюдается формирование переходной структуры с признаками как ячеистой, так и наноструктуры с большими разориентировками. Увеличение степени деформации приводит к некоторому уменьшению среднего размера ячеек и возрастанию разориентации на их границах. Для третьей стадии характерно формирование однородной наноструктуры. При этом структура зерен испытывает сильные упругие искажения, что вызвано дальнедействующими напряжениями, создаваемыми границами зерен.

В ходе интенсивной пластической деформации не происходит значительных изменений границ первичных кристаллитов и уровня микроискажений кристаллической решетки. Эволюция структуры в ходе интенсивной пластической деформации обусловлена прежде всего трансформацией дислокационной ячеистой структуры в наноразмерную с большеугловыми границами зерен. В работе [5] предложена модель эволюции микроструктуры при интенсивной пластической деформации, последняя отражает переход в процессе интенсивной пластической деформации от ячеистой структуры к зеренной, характеризующейся большеугловыми границами зерен. На начальной стадии деформации формируется ячеистая структура (рис. 1, а). В процессе интен-

сивной пластической деформации она претерпевает трансформацию, при которой стенки ячеек становятся более узкими и упорядоченными (рис. 1, *b*). Однако при дальнейшей деформации плотность дислокаций в стенках становится выше критической. Это приводит к развитию возврата, заключающегося в аннигиляции дислокаций противоположного знака. В результате этого в стенках ячеек остаются избыточные дислокации двух знаков (рис. 1, *c*), которые играют разную роль. Увеличение разориентировок и превращение ячеек в зерна происходят благодаря дислокациям с вектором Бюргерса, перпендикулярным границе.

Другой вид дислокаций (скользящие) формируют дальнедействующие поля напряжений. Это приводит к росту упругих микроискажений и атомных смещений из узлов кристаллической решетки. Кроме того, скользящие зернограницные дислокации при своем движении приводят к зернограницному проскальзыванию и относительному смещению зерен [5].

Подобный принцип диспергирования реализуется при получении наноструктур методом высокодозного облучения сплавов высокоэнергетическими частицами. В результате радиационного воздействия происходит формирование дислокационных петель и их перестройка в дислокационные субграницы и границы нанокристаллов [5, 13, 14].

Технологические приемы формирования наноструктур в инженерии поверхности. Технологически методы инженерии поверхности могут реализовываться в трех вариантах: нанесение на рабочую поверхность покрытий из другого материала (газотермическое напыление, электрохимическое осаждение, фрикционное плакирование, лазерная наплавка и др.) [9, 15, 16]; модифицирование подповерхностных объемов материала (изменение его структурно-фазового состояния) без нанесения дополнительных покрытий, к числу которых можно отнести микродуговое окисление, химико-термическую и трибомеханическую обработку, ионную имплантацию [2, 9, 8, 17]; комбинированное воздействие на поверхность, сочетающее в себе признаки и одного и другого подходов [18–20].

Газотермическое напыление. Методы газотермического напыления предусматривают формирование на поверхности основы защитного покрытия посредством транспортировки к ней потока разогретого порошкового материала или капель расплавленного проволоочного материала с помощью распыляющей газовой струи. Для нагрева распыляемого материала при газотермическом напылении допускается использование энергии газового пламени, плазмы, электрической дуги, лазерного излучения, детонационных процессов и др. Для нанесения газотермических покрытий применяются металлические, керамические и полимерные материалы или композиты с различным их сочетанием.

Активирование процесса газотермического напыления (ГТН) может осуществляться по трем направлениям.

1. Изменение термо- и газодинамических характеристик распыляемой газопорошковой струи путем:

- повышения кинетической энергии распыляющей струи за счет повышения ее скорости до сверхзвукового уровня;
- изменения условий диспергирования распыляемого материала наложением на него ультразвуковых колебаний;
- изменения тепловой плотности распыляющего газового потока;
- снижения уровня охлаждения расплавленных частиц (капель) в процессе их транспортировки к основе за счет повышения температуры распыляющего газа.

2. Изменение условий кристаллизации напыляемых частиц посредством:

- введения в распыляемый материал наноразмерных добавок, выполняющих функции дополнительных центров кристаллизации материала покрытия;

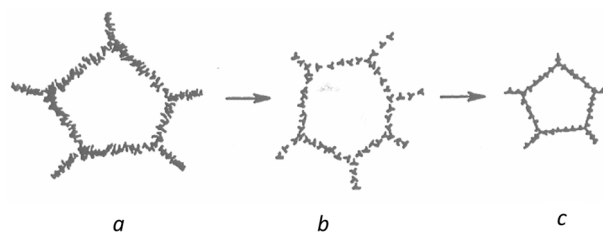


Рис. 1. Схема эволюции структуры в ходе интенсивной пластической деформации [5]

Fig. 1. Schematic structure evolution during intensive plastic deformation [5]

повышения скорости кристаллизации напыленных частиц для формирования нанокристаллического состояния;

активации напыляемого порошка методами предварительного интенсивного деформационного воздействия для повышения термической устойчивости структуры напыляемого материала.

3. Обеспечение контролируемых структурно-фазовых превращений в напыленных покрытиях в процессе:

химико-термической или ионно-вакуумной обработки напыленных покрытий для выделения наноразмерных модифицирующих фаз;

трибомеханической обработки напыленных покрытий с метастабильной структурой для формирования субзерненного ячеистого строения и протекания бездиффузионных упрочняющих фазовых превращений.

Применение перечисленных методов активации процесса ГТН позволяет существенно повысить физико-механические и триботехнические свойства покрытий, формируемых методом газотермического напыления (ГТН-покрытий) [19], в частности: увеличить прочность сцепления с основой в 1,5–2,0 раза; снизить пористость в 2–4 раза (рис. 2); повысить микротвердость в 1,7–2,2 раза, несущую способность – в 3–5 раз, износостойкость – в 5–20 раз.

Созданное оборудование для активированного газопламенного напыления и гиперзвуковой металлизации проволочных материалов используется в технологических процессах восстановления направляющих плоскостей, пальцев, полумуфт, валов, подшипников скольжения, коленчатых валов с изношенными коренными и шатунными шейками, шкивов, элементов запорной арматуры, посадочных мест в корпусных деталях [9, 19, 21, 22].

Для улучшения механических свойств напыленных покрытий используются методы модифицирования их поверхностных слоев атомами внедрения. В частности, методы ионного и газового азотирования, а также нитроцементации позволяют существенно повысить уровень физико-механических и триботехнических характеристик сталей различного класса [23]. Исследование распределения азота по глубине поверхностного слоя ионно-азотированного покрытия, например, из высокохромистой стали 06X19H9T показало существенную концентрационную неоднородность распределения азота в напыленных частицах поверхностного слоя покрытия. Предложена модель [24], связывающая концентрационную неоднородность распределения азота в напыленных частицах поверхностного слоя с наличием непроницаемых для диффузии азота оксидных прослоек, располагающихся на границах частиц (рис. 3).

При этом в изолированных оксидными прослойками частицах, имеющих малый подповерхностный объем, в процессе ионной обработки накапливается более высокая концентрация атомов азота по сравнению с напыленными частицами (конгломератами частиц) большего объема. Диффузионный перенос атомов азота из поверхностного слоя частиц в лежащие ниже слои осу-

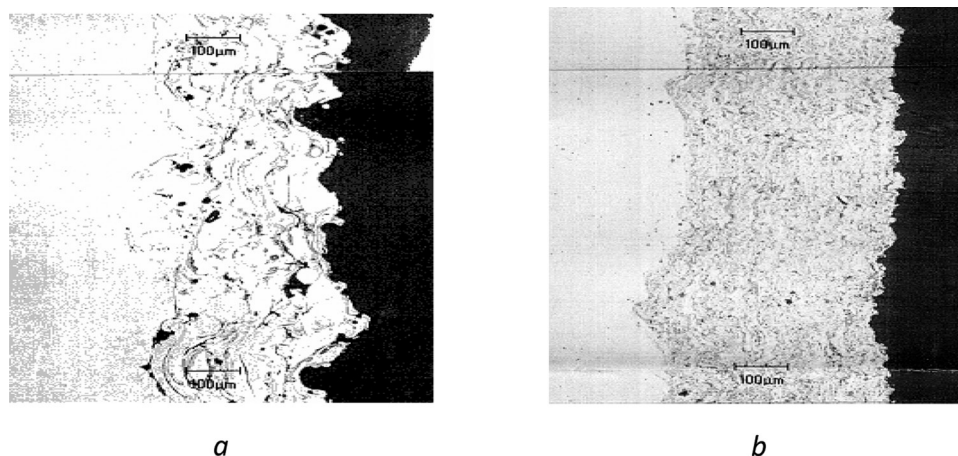


Рис. 2. Микроструктура напыленных покрытий: *a* – обычная металлизация; *b* – активированная металлизация [19]

Fig. 2. The microstructure of sprayed coatings: *a* – traditional metallization; *b* – activated metallization [19]

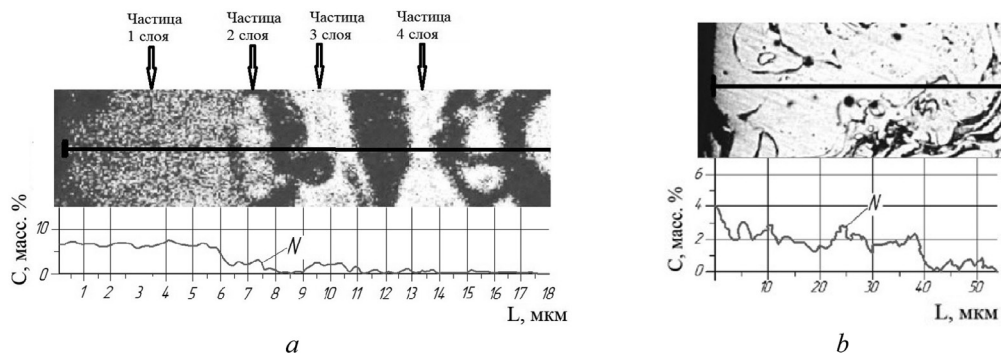


Рис. 3. Изменение концентрации азота по глубине газотермического покрытия из стали 06Х19Н9Т, прошедшего ионно-лучевую обработку при 870 К ($t = 180$ с): *a* – напыленные частицы малого размера; *b* – конгломерат сплавленных частиц [24]

Fig. 3. Change of concentration of nitrogen in the depth of gas-thermal coating made from steel 06H19N9T subjected to ion-beam treatment at 870 K ($t = 180$ s): *a* – sprayed particles of small size; *b* – conglomerate of alloyed particles [24]

ществляется через мостики сплавления (сварки), которые соединяют смежные напыленные частицы (рис. 4).

Ионно-лучевое азотирование покрытий из стали 40Х13 обеспечивает образование модифицированных слоев толщиной от 5 до 40 мкм с увеличенной от 9000 до 15 000 МПа микротвердостью для покрытий из мартенситной стали 40Х13 и с 6500 до 12 500 МПа – для покрытий из аустенитной стали Х18Н10Т. Ионно-лучевое азотирование увеличивает износостойкость ГТН-покрытий из сталей 40Х13 и Х18Н10Т при сухом трении в 3–8 раз, а при граничном – в 2–4 раза.

Разработаны технология и оборудование для нанесения высокоплотных и износостойких покрытий для восстановления и упрочнения элементов узлов трения широкого спектра мобильных машин и технологического оборудования, в том числе деталей редуктора мотор-колеса карьерных самосвалов БелАЗ. Использование разработанных технических средств позволило снизить затраты на единицу изготавливаемой продукции и повысить износостойкость изделий более чем в 3 раза.

Электрохимическое осаждение. Механизм формирования модифицированного наноразмерной добавкой электрохимического покрытия рассмотрен на примере осаждения покрытия из электролита хромирования с дисперсной фазой в виде частиц УДА [9]. Осаждение покрытий из базового электролита хромирования соответствует модели Странски – Крастанова (Stransky – Krastanov), при которой первый слой в виде тонкой (~70 нм) пленки, имеющей мелкодисперсную структуру, полностью покрывает поверхность подложки. На этом слое происходит рост трехмерных островков покрытия, представляющих собой агломераты хромовых частиц, которые образуются при взаимодействии частиц хрома друг с другом (рис. 5, *a*).

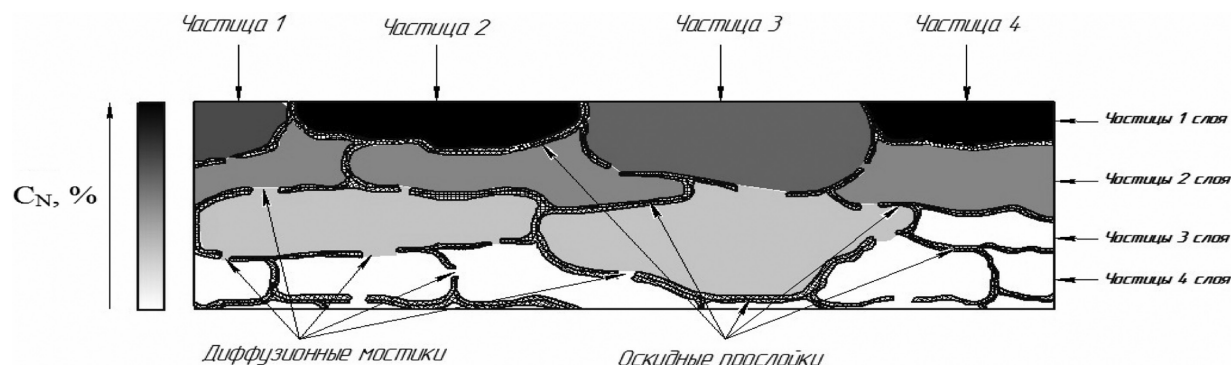


Рис. 4. Схема имплантированного ионами азота участка поверхностного слоя газотермического покрытия с частицами различной толщины [24]

Fig. 4. Scheme of the surface layer of gas-thermal coating with particles of different thickness implanted by nitrogen ions [24]

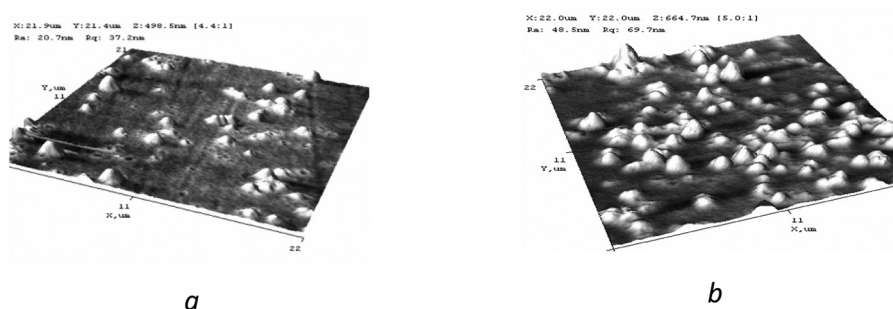


Рис. 5. 3D-изображение топографии различных электрохимических покрытий ($t = 90$ с): a – хром; b – хром-УДА при $C_a = 5,1$ г/л [9]

Fig. 5. 3D-image of the topography of different electrochemical coatings ($t = 90$ s): a – chrome; b – chrome-UDD (ultradispersed diamond) at $C_a = 5.1$ g/l [9]

Рост образовавшихся зародышей может происходить в нормальном и латеральном направлениях как по механизму присоединения к ним новых атомов осаждаемого металла и достраивания первично образовавшихся атомно-гладких плоскостей (слоистый рост), так и путем повсеместного присоединения к ним новых атомов на «многоуровневых» поверхностях. Агрегирование кристаллов хрома происходит с образованием микросферолитов (зерен), состоящих из конгломератов мелких разориентированных кристаллов. В дальнейшем срастание микросферолитов приводит к формированию сплошного хромового покрытия, образованного зернами размером 9–15 мкм, состоящими из субзерен размером 400–600 нм. Образующееся покрытие характеризуется наличием больших пор и несплошностей (размером до 5 мкм) (рис. 6, a), а также значительной амплитудой высот неровностей профиля поверхности (1,3–1,5 мкм) [9].

В процессе осаждения модифицированного частицами УДА хромового покрытия взвешенные в электролите частицы нанодiamondов взаимодействуют с поверхностью растущего осадка благодаря гидродинамическим, молекулярным и электростатическим силам. Одновременно с адсорбированием на подложке тонкой пленки из кристаллитов хрома происходит осаждение из электролита наноразмерных частиц дисперсной фазы, которые являются дополнительными центрами кристаллизации (см. рис. 5, b). Рост числа зародышей приводит к зарастиванию поверхности подложки слоем композиционного покрытия, состоящего из более мелких микросферолитов (6–7 мкм), содержащих субзерна размером 200–250 нм. Модифицированное частицами нанодiamondов хромовое покрытие отличается повышенной плотностью (рис. 6, b, c). Небольшие концентрации модифицирующих добавок в электролите (до $C_a = 5$ г/л) не изменяют фазового состава покрытия. Вместе с тем регистрируется увеличение микротвердости покрытий H_μ с 7000 до

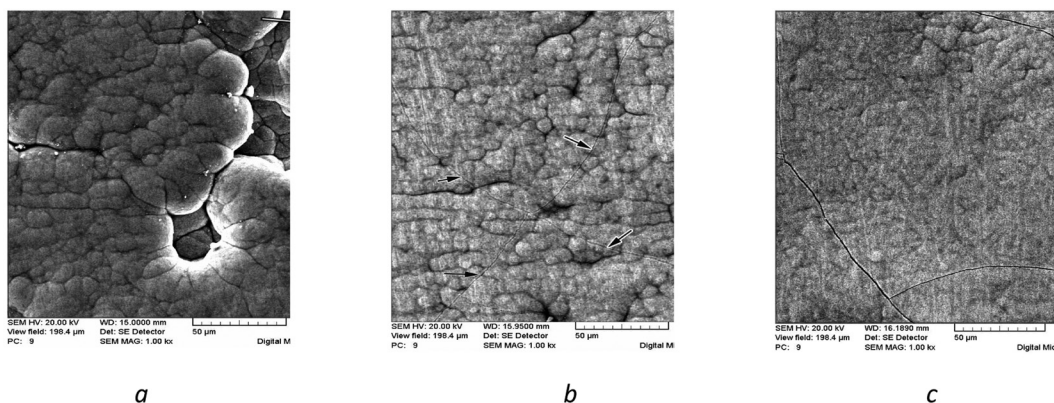


Рис. 6. Топография поверхности хромовых покрытий, полученных в электролитах с различным содержанием УДА ($t = 3600$ с): $a - C_a = 0$ г/л; $b - 5,1$ г/л; $c - 15,0$ г/л [9]

Fig. 6. Topography of the surface of chromium coatings obtained in electrolytes with different content of the UDD (ultradispersed diamond) ($t = 3600$ s): $a - C_a = 0$ g/l; $b - 5.1$ g/l; $c - 15.0$ g/l [9]

9500–12500 МПа и возрастание физического уширения рентгеновских дифракционных линий матричной фазы. Указанное возрастание микротвердости и физического уширения дифракционных линий связано с измельчением размеров зерна хромалмазных покрытий и увеличением концентрации в них дефектов кристаллической решетки. Модифицирование хромовых покрытий наноразмерными алмазно-графитовыми добавками улучшает их триботехнические свойства, снижая для условий трения без смазки коэффициент трения в 1,8–2,9 раза и интенсивность изнашивания в 6–10 раз, а для условий граничного трения – на 20–65 % и в 1,6–1,9 раза соответственно [19].

Технология нанесения хромалмазных покрытий успешно используется на НП ЗАО «Синта» (г. Минск) для повышения качества различных видов инструмента, элементов узлов трения машин и оборудования, в том числе:

металло- и деревообрабатывающего инструмента (фрезы, метчики, зенкеры, развертки, протяжки и др.) – увеличение стойкости в 2–8 раз;

элементов узлов трения машин и механизмов (поршни и цилиндры ДВС, запорная и регулирующая арматура гидро- и пневмосистем и др.) – увеличение стойкости в 2–3 раза;

пресс-форм для литья пластмассовых и резиновых изделий, фильер литьевых машин – увеличение стойкости в 3–5 раз.

Микродуговое оксидирование. К перспективным технологиям, обеспечивающим повышение износостойкости конструкций различного назначения при одновременном снижении их массы, относится микродуговое оксидирование (МДО), приводящее к формированию на поверхностях изделий из алюминиевых и титановых сплавов керамических покрытий (КП), обладающих уникальным комплексом свойств [25]. Вместе с тем пониженные антифрикционные свойства КП при сухом трении и ограниченной подаче смазки значительно сужают области их применения. В работах [9, 25, 26] показано, что задача повышения антифрикционных свойств КП и износостойкости может быть успешно решена их модифицированием УНМ, такими как, например, УДАГ. Введение УНМ в базовый электролит для микродугового оксидирования алюминия и его сплавов повышает скорость формирования керамического слоя и увеличивает его толщину. Модифицированный частицами УНМ слой характеризуется более дисперсной и однородной структурой с меньшей пористостью. Модифицирование сопровождается интенсивным ростом (в 1,5–2 раза) толщины покрытия (рис. 7).

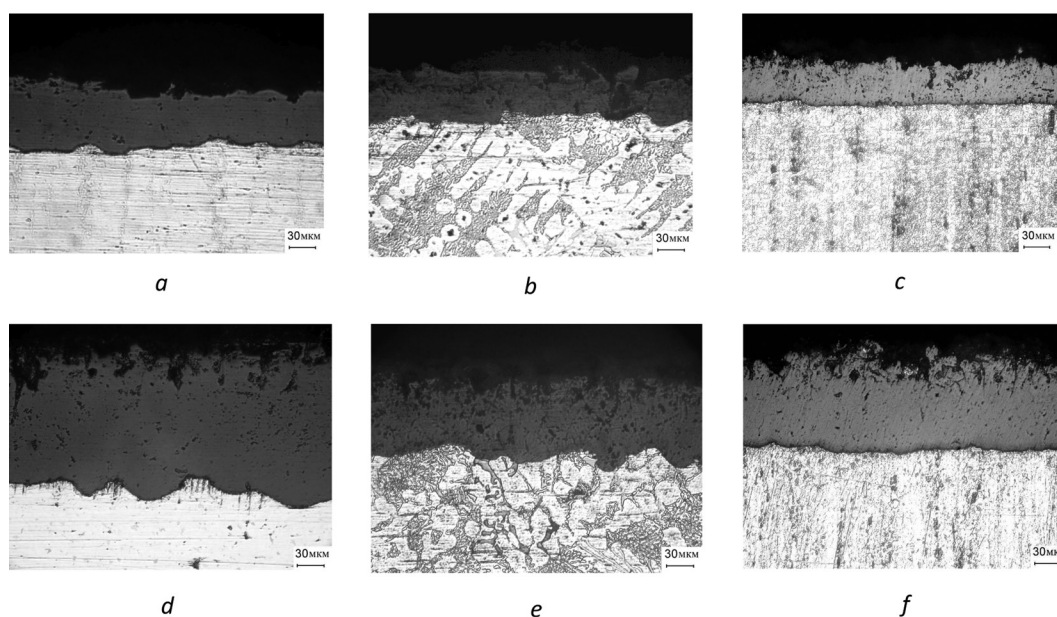


Рис. 7. Микроструктура немодифицированного (*a, b, c*) и модифицированного углеродными наноматериалами (*d, e, f*) покрытий на алюминиевых сплавах АМг6 (*a, d*), АК12М2МгН (*b, e*), Д16 (*c, f*) [25]

Fig. 7. The microstructure of unmodified (*a, b, c*) and modified by carbon nanomaterials (*d, e, f*) coatings on aluminum alloys АМг6 (*a, d*), АК12М2МгН (*b, e*), Д16 (*c, f*) [25]

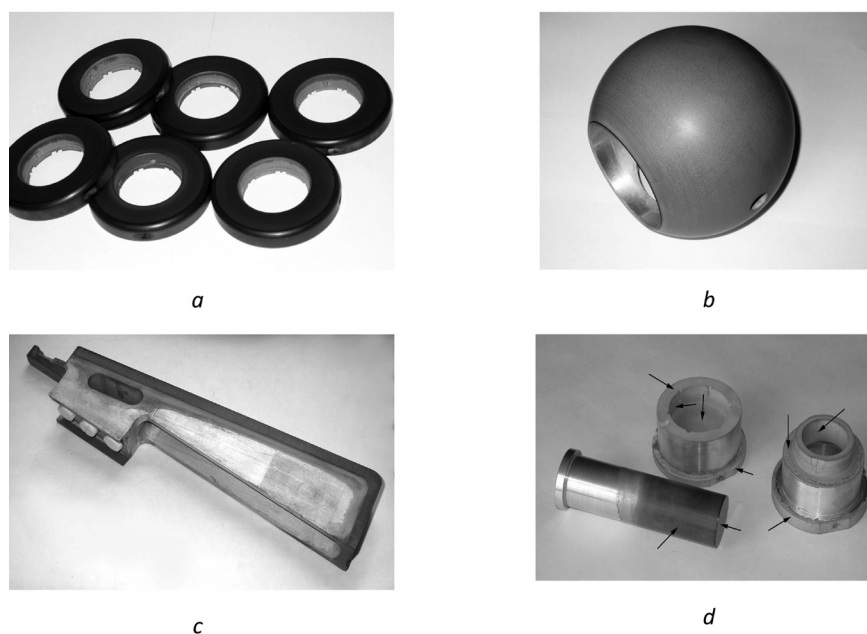


Рис. 8. Детали с керамическим покрытием, модифицированным углеродными наноматериалами: *a* – запорные кольца; *b* – шар запорной газовой арматуры; *c* – деталь вакуум-формы; *d* – формообразующие элементы для литья пластмассовых изделий [9]

Fig. 8. Details with ceramic coating modified by carbon nanomaterials: *a* – locking ring; *b* – ball of gas stop valves; *c* – detail of vacuum form; *d* – formative elements for casting of plastic products [9]

Модифицированные УНМ износостойкие керамические покрытия находят применение в различных отраслях техники (рис. 8), обеспечивая повышение срока эксплуатации деталей в 1,5–3 раза по сравнению со случаями применения немодифицированных покрытий или иных технических решений.

Трибомеханическое модифицирование. Явление трибомеханического модифицирования поверхности трения проявляется в существенном улучшении противоизносных и антифрикционных свойств трущихся поверхностей в процессе фрикционного взаимодействия пар трения в присутствии смазки, содержащей сверхтвердые наноразмерные добавки [9, 19, 27]. Механизм трибомеханического модифицирования поверхности трения состоит в формировании в процессе трибоконтакта в поверхностном слое пластичного металлического материала субзеренной наноразмерной ячеистой структуры (рис. 9, *a, b*), способствующей повышению триботехнических характеристик пары трения.

Сверхтвердые наноразмерные частицы смазочного материала способствуют многократному пластическому передеформированию вершин микрорельефа поверхности и интенсифицируют протекание в них при трении процессов множественного скольжения, приводящих к образованию субмикроструктурной структуры с размером субзерен $D \leq 100$ нм. При формировании подобной структуры происходит эффективное поглощение энергии фрикционного взаимодействия, а сама ячеистая субструктура обладает повышенным сопротивлением зарождению и распространению микротрещин, что предопределяет увеличение износостойкости трибосопряжения. При использовании высокопрочных материалов, характеризующихся пониженной трещиностойкостью, присутствие в смазке сверхтвердых наночастиц может инициировать образование зародышей усталостных микротрещин в поверхности трения, которые сравнительно быстро достигают критического размера, приводя к ускоренному формированию частиц износа (рис. 9, *c*).

Трибомеханическое модифицирование может эффективно реализовываться в стальных ГТН-покрытиях, имеющих в структуре метастабильный аустенит твердостью $HV = 2000\text{--}3000$ МПа. В процессе приработки вследствие интенсивной пластической деформации под воздействием сверхтвердых частиц смазочного материала метастабильный аустенит трансформируется в твердый и износостойкий мартенсит деформации ($HV = 7000\text{--}8000$ МПа) за счет протекания дефор-

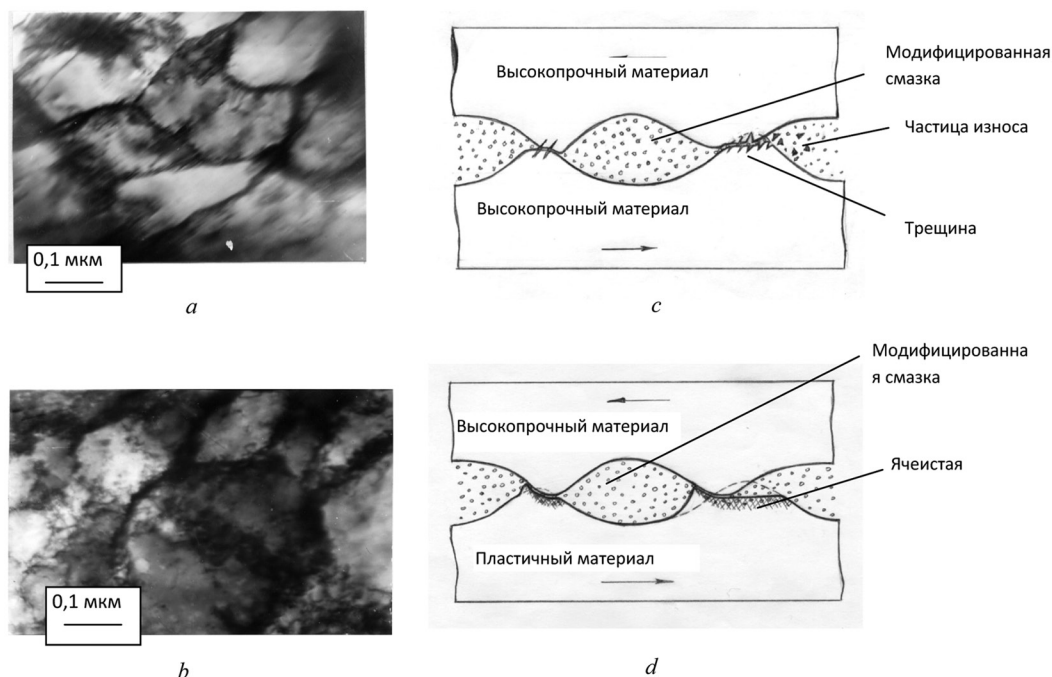


Рис. 9. Микроструктура поверхности трения стали 45 ($p = 20$ МПа) и меди М1 ($p = 10$ МПа) после испытаний в присутствии смазки Литол-24, модифицированной сверхтвёрдыми наночастицами, и схемы фрикционного взаимодействия материалов различной твердости в среде модифицированной смазки (c, d) [19]

Fig. 9. The microstructure of friction surface of steel 45 ($p = 20$ MPa) and copper M1 ($p = 10$ MPa) after test in the environment of grease Lithol-24, modified by superhard nanoparticles. The schemes of frictional interaction of materials of different hardness in the environment of modified grease (c, d) [19]

мационного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения. Твердость поверхности трения ГТН-покрытий, приработанной в среде смазки с наноалмазами, выходит на уровень, превышающий возможности обычных методов их обработки [19]. Так, трибомеханическое модифицирование покрытий из стали аустенитного класса 12X18H10T в среде модифицированной смазки при давлении $p = 10$ МПа снижает содержание остаточного аустенита в покрытиях с 88 до 75 об.% с одновременным повышением микротвердости H_{μ} от 3300 до 4800 МПа. Модифицированные покрытия обладают повышенной несущей способностью, в частности ГТН-покрытия из стали 12X18H10T в условиях граничного трения работоспособны при контактных давлениях порядка $p = 100$ МПа (рис. 10).

Эффект трибомеханического модифицирования поверхности приработкой в присутствии смазочных материалов, содержащих наноразмерные алмазно-графитовые частицы, использован для повышения работоспособности узлов трения сельскохозяйственной техники (шарнирные со-

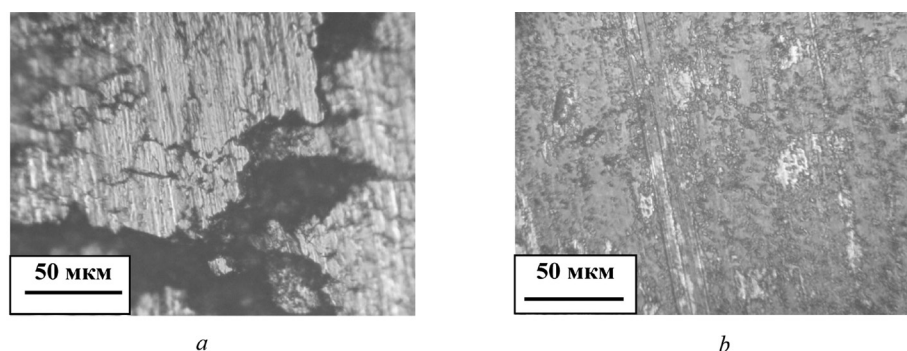


Рис. 10. Микроструктура поверхности трения покрытий из стали 12X18H10T после испытаний в среде различных смазочных материалов: a – масло И-20А ($p = 75$ МПа); b – масло И-20А+УДАГ ($p = 100$ МПа) [19]

Fig. 10. The microstructure of the friction surface of coatings made from steel 12X18H10T after test in the presence of various lubricants: a – oil I-20A ($p = 75$ MPa); b – oil I-20A + UDDG (ultradispersed diamond-graphite) ($p = 100$ MPa) [19]

пряжения жаток зерноуборочных комбайнов) и теплоэнергетического оборудования (узлы трения турбин и регенеративного воздухоподогревателя) (рис. 11) [9].

Деформационное плакирование гибким инструментом. К перспективному направлению развития инженерии поверхности можно отнести технологию деформационного плакирования гибким инструментом, выполненным в виде вращающейся металлической щетки с проволочным ворсом [19, 28–30]. Сформированные данным способом покрытия могут обеспечить повышение антифрикционных, противозадирных, противоизносных, шумопоглощающих, противопопригарных и других свойств модифицированной поверхности. Так, формирование гибким инструментом композиционных покрытий на основе медных сплавов способствует снижению коэффициента трения скольжения в 3–3,3 раза и повышению нагрузочной способности поверхностного слоя в 2 раза. Сравнительные испытания зубчатых передач с поверхностно-модифицированными гибким инструментом рабочими профилями зубьев показали, что композиционное покрытие из спеченной смеси порошков алюминия и графита и двухслойное покрытие «медь + антифрикционный композит» позволяют снизить уровень шума на 2,5–5,2 дБ [19].

Эффективность применения метода поверхностного модифицирования гибким инструментом оценивалась на технических объектах различных промышленных предприятий Республики Беларусь, включая минские тракторный и автомобильный заводы, завод автоматических линий им. П. М. Машерова, Гомельский завод литья и нормалей, Оршанский станкостроительный завод «Красный борец» и др. Полученные результаты послужили, в частности, основой для разработки и внедрения промышленных технологий и оборудования для формирования в условиях серийного производства композиционных покрытий на рабочем профиле зубьев конических зубчатых передач и направляющих скольжения станин металлорежущих станков на заводе автоматических линий им. П. М. Машерова. Это позволило снизить коэффициент трения скольжения подвижных узлов станков по направляющим на 45–55 %, что способствует значительному улучшению их плавности хода и, соответственно, обеспечению требуемой точности позиционирования.

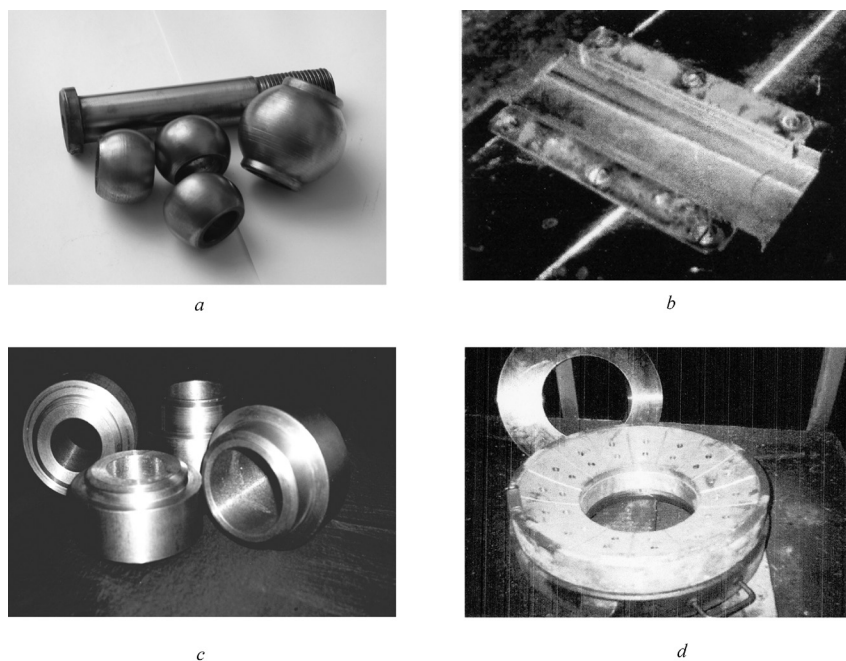


Рис. 11. Элементы узлов скольжения с трибомодифицированной рабочей поверхностью из композиционных материалов для технологического оборудования: *a* – элементы шарнирных сопряжений жаток зерноуборочных комбайнов; *b* – шпоночные сопряжения турбин; *c* – подшипники скольжения системы парораспределения турбин; *d* – опора регенеративного воздухоподогревателя

Fig. 11. Elements of the slip knots with tribomodified working surface made from composite materials for technological equipment: *a* – hinged elements of reaper of cereal combine; *b* – spline joining of turbines; *c* – bearings of steam distribution system of turbines; *d* – support of regenerative air

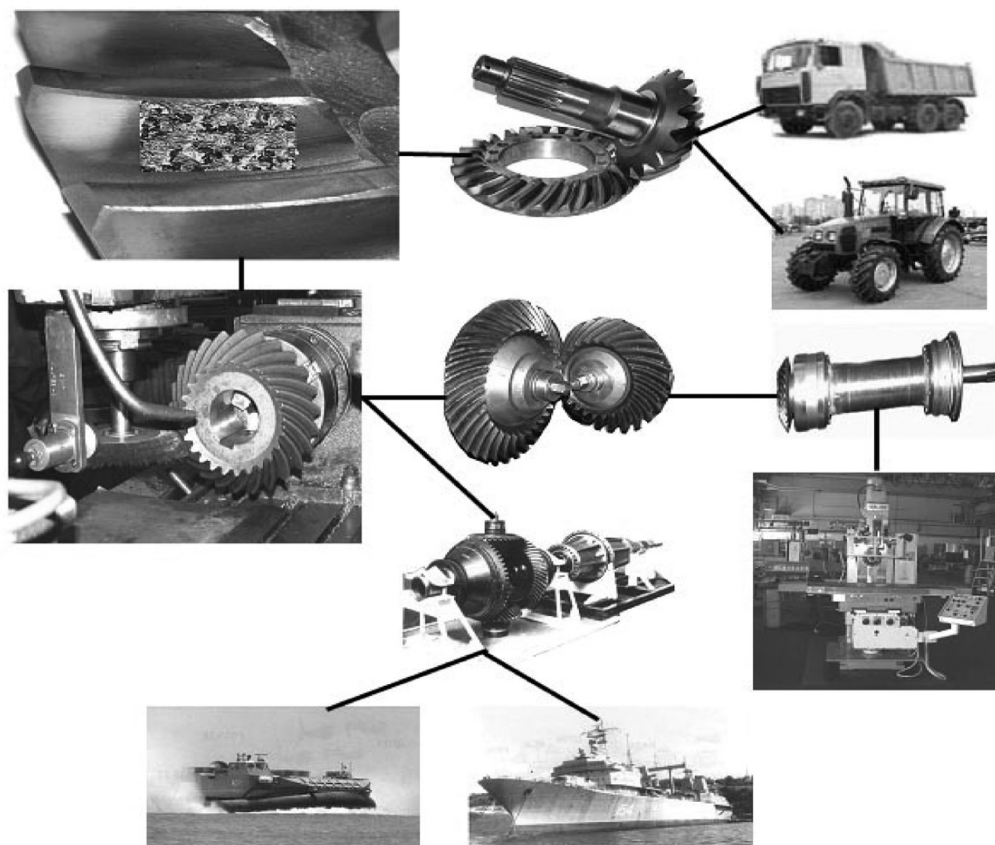


Рис. 12. Примеры объектов применения технологии модифицирования рабочих профилей зубьев фрикционным плакированием гибким инструментом

Fig. 12. Examples of objects of application of modifying technology of the working profiles of teeth with use of frictional cladding by flexible tool

Примеры положительной апробации технологического процесса модифицирования поверхностей трущихся сопряжений фрикционным плакированием гибким инструментом показаны на рис. 12.

Заключение. На основе проведенных исследований создано новое поколение технологий поверхностной инженерии, большинство из которых не имеет аналогов. Формируемые покрытия и поверхностные слои сохраняют стабильность структурно-фазового состояния в условиях высоких нагрузок и температур и способны длительное время противостоять изнашиванию, а также термическому и коррозионному воздействию. Более чем на 50 предприятиях Беларуси, России, Кореи и других стран созданы производственные мощности и освоены технологии нанесения покрытий и модифицирования поверхностных слоев активированными методами инженерии поверхности. Внедрение новых технологий поверхностной инженерии в практику обеспечило многократное увеличение эксплуатационной стойкости мобильных машин и технологического оборудования.

Использование разработанных наноструктурированных материалов и покрытий, а также методов и средств реализации технологий инженерии поверхности позволяет поднять технический уровень создаваемой машиностроительной техники, снизить себестоимость ее производства и повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции.

Список использованных источников

1. Витязь, П. А. Наноструктурированные материалы и покрытия в инженерии поверхности / П. А. Витязь, В. И. Жорник // Наноструктурные материалы – 2016: Беларусь – Россия – Украина: НАНО-2016 : материалы V Международной научной конференции, Минск, 22–25 ноября 2016 г. – Минск: Беларус. навука, 2016. – С. 11–13.

2. Белый, А. В. Инженерия поверхности конструкционных материалов концентрированными потоками ионов азота / А. В. Белый, В. А. Кукареко, А. Патеюк. – Минск: Беларус. навука, 2007. – 244 с.
3. Суслов, А. Г. Инженерия поверхности деталей / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
4. Андриевский, Р. А. Наноструктурные материалы / Р. А. Андриевский, А. В. Рагуля. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 192 с.
5. Рыжонков, Д. И. Наноматериалы / Д. И. Рыжонков, В. В. Лёвина, Э. Л. Дзидзигури. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 365 с.
6. Суздаев, И. П. Нанотехнология. Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И. П. Суздаев. – М.: Либроком, 2009. – 592 с.
7. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
8. Морохов, И. Д. Физические явления в ультрадисперсных средах / И. Д. Морохов, Л. И. Трусов, В. Н. Лаповник. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 224 с.
9. Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П. А. Витязь [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 527 с.
10. Колмаков, А. Г. Основы технологий и применения наноматериалов / А. Г. Колмаков, С. М. Баринев, М. И. Алымов. – М.: Физматлит, 2012. – 208 с.
11. Новые ресурсосберегающие технологии и композиционные материалы / Ф. Г. Ловшенко [и др.]. – М.: Энергоатомиздат; Гомель: БелГУТ, 2004. – 519 с.
12. Валиев, Р. З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
13. Панин, В. Е. Физическая мезомеханика и неравновесная термодинамика как методологическая основа наноматериаловедения / В. Е. Панин, В. Е. Егорушкин // Физ. мезомеханика. – 2009. – № 4. – С. 7–26.
14. Ионно-индуцированные структурные изменения в высокоориентированном пироуглероде / А. М. Борисов [и др.]. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2004. – № 4. – С. 13–17.
15. Витязь, П. А. Основы нанесения износостойких, коррозионно-стойких и теплозащитных покрытий / П. А. Витязь, А. Ф. Ильющенко, А. И. Шевцов. – Минск: Беларус. навука, 2006. – 363 с.
16. Витязь, П. А. Повышение износостойкости поверхностей трения трибомодифицированием в среде смазки с наноразмерными алмазосодержащими добавками / П. А. Витязь, В. И. Жорник, В. А. Кукареко // Современные перспективные материалы / под ред. В. В. Клубовича. – Витебск: УО ВГТУ, 2011. – С. 146–184.
17. Vitiáz, P. A. Laser-plasma techniques in computer-controlled manufacturing / P. A. Vitiáz, M. L. Kheifetz, S. V. Koukhta. – Minsk: RUE «Publ. House «Belorus. nauka», 2011. – 164 p.
18. Витязь, П. А. Упрочнение газотермических покрытий / П. А. Витязь, Р. О. Азизов, М. А. Белоцерковский. – Минск: Бестпринт, 2004. – 192 с.
19. Повышение ресурса трибосопряжений активированными методами инженерии поверхности / П. А. Витязь [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2012. – 452 с.
20. Структурно-фазовые превращения в газотермических покрытиях в процессе их напыления и последующей электроконтактной обработки / М. И. Черновол [и др.] // Проблемы тертя та зношування. – 2015. – Вип. 2 (67). – С. 99–109.
21. Белоцерковский, М. А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М. А. Белоцерковский. – Минск: Технопринт, 2004. – 200 с.
22. Витязь, П. А. Теоретические предпосылки активирования процесса газопламенного напыления спутными потоками / П. А. Витязь, М. А. Белоцерковский // Порошковая металлургия: сб. науч. тр. – Минск: Беларус. навука, 2010. – Вып. 33. – С. 232–241.
23. Влияние ионно-лучевого азотирования на структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства экономичных газотермических покрытий из проволочных сталей различных классов / В. А. Кукареко [и др.] // Трение и износ. – 2013. – Т. 34, № 6. – С. 621–627.
24. Закономерности диффузии азота в процессе ионно-лучевого азотирования газотермического покрытия из аустенитной стали 06X19N9T / А. Н. Григорчик [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – № 2. – С. 75–80.
25. Витязь, П. А. Создание износостойких упрочняющих покрытий микродуговым окислением, непосредственной и последующей модификацией углеродными наноматериалами / П. А. Витязь, А. И. Комаров, В. И. Комарова // Перспективные технологии / под ред. В. В. Клубовича. – Витебск: УО ВГТУ, 2011. – С. 114–148.
26. Применение наноструктурных материалов и активированных методов инженерии поверхности для создания современных объектов техники / П. А. Витязь [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – № 3/4. – С. 46–66.
27. Zhornik, V. I. Tribomechanical Modification of Friction Surface by Running-In Lubricants with Nano-Sized Diamonds / V. I. Zhornik, V. A. Kukareko, M. A. Belotserkovsky // Advances in Mechanics Research / ed. Jeremy M. Campbell. – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2011. – Vol. 1. – P. 1–78.
28. Белевский, Л. С. Пластическое деформирование поверхностного слоя и формирование покрытия при нанесении гибким инструментом / Л. С. Белевский. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогор. лица РАН, 1996. – 230 с.
29. Анцупов, В. П. Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом / В. П. Анцупов. – Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 1999. – 241 с.
30. Триботехнические свойства тонких металлических покрытий с наноразмерными наполнителями / П. А. Витязь [и др.] // Трение и износ. – 2004. – Т. 25, № 6. – С. 593–601.

References

1. Vityaz P. A., Zhornik V. I. Nanostructured materials and coatings in the surfaces engineering. *Nanostrukturnye materialy – 2016: Belarus' – Rossiia – Ukraina: NANO-2016 : materialy V Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Minsk, 22–25 noyabrya 2016 g.* [Nanostructured materials – 2016: Belarus – Russia – Ukraine: NANO-2016: materials of the V International Scientific Conference, Minsk, November 22–25, 2016]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2016, pp. 11–13 (in Russian).
2. Belyi A. V., Kukareko V. A., Pateyuk A. *Surfaces engineering of construction materials by concentrated flows of nitrogen ions.* Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2007. 244 p. (in Russian).
3. Suslov A. G. *Surfaces engineering of details.* Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 320 p. (in Russian).
4. Andrievskii R. A., Ragulya A. V. *Nanostructured materials.* Moscow, Publishing Center “Academy”, 2005. 192 p. (in Russian).
5. Ryzhonkov D. I., Levina V. V., Dzidziguri E. L. *Nanomaterials.* Moscow, BINOM Publ., 2010. 365 p. (in Russian).
6. Suzdalev I. P. *Nanotechnology. Physico-chemistry of nanoclusters, nanostructures and nanomaterials.* Moscow, Libercom Publ., 2009. 592 p. (in Russian).
7. Gusev A. I. *Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies.* Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 416 p. (in Russian).
8. Morokhov I. D., Trusov L. I., Lapovnik V. N. *Physical phenomenon in ultradispersed medium.* Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 224 p. (in Russian).
9. Vityaz P. A., Zhornik V. I., Kukareko V. A., Komarov A. I., Seniut' V. T. *Modification of materials and coatings by the nanosized diamond contained additives.* Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2011. 527 p. (in Russian).
10. Kolmakov A. G., Barinov S. M., Alymov M. I. *Fundamentals of technologies and applications of nanomaterials.* Moscow, Fizmatlit Publ., 2012. 208 p. (in Russian).
11. Lovshenko F. G., Panteleenko F. I., Rogachev A. V., Struk V. A. *New resource-saving technologies and composite materials.* Moscow, Energoatomizdat Publ. ; Gomel, Belarusian State University of Transport, 2004. 519 p. (in Russian).
12. Valiev R. Z., Aleksandrov I. V. *Nanostructured materials produced by intensive plastic deformation.* Moscow, Logos Publ., 2000. 272 p. (in Russian).
13. Panin V. E., Egorushkin V. E. Physical mesomechanic and nonequilibrium thermodynamics as methodological basis of nanomaterials. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical mesomechanics*, 2009, no. 4, pp. 7–26 (in Russian).
14. Borisov A. M., Virgaliev Iu. S., Mashkova E. S., Nemov A. S., Pitirimova E. A., Khokhlov A. F. Ion-induced structural changes in the highly oriented pyrocarbon. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniia = Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2004, no. 4, pp. 13–17 (in Russian).
15. Vityaz P. A., Il'iushchenko A. F., Shevtsov A. I. *Fundamentals of wear-resistant, corrosion-resistant and thermal barrier coatings.* Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2006. 363 p. (in Russian).
16. Vityaz P. A., Zhornik V. I., Kukareko V. A. Increase of wear resistance of surfaces by tribomodification in presence of grease with nanosized diamond contained additives. Klubovich V. V. (ed.). *Perspektivnye tekhnologii* [Advanced technologies]. Vitebsk, Vitebsk State Technological University, 2011, pp. 146–184 (in Russian).
17. Vityaz P. A., Kheifetz M. L., Koukhta S. V. *Laser-plasma techniques in computer-controlled manufacturing.* Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2011. 164 p. (in Russian).
18. Vityaz P. A., Azizov R. O., Belotserkovsky M. A. *Hardening of gas-thermal coatings.* Minsk, Bestprint Publ., 2004. 192 p. (in Russian).
19. Vityaz P. A., Zhornik V. I., Belotserkovsky M. A., Levantsevich M. A. *Increase of resource of tribojoining by the activated methods of surface engineering.* Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2012. 452 p. (in Russian).
20. Chernovol M. I., Vorona T. V., Mikosianchik O. A., Lopata L. A. Structure-phases transformations in gas-thermal coatings during spraying and subsequent electrocontact treatment. *Problemy tercia ta znoshuvannia = Problems of friction and wear*, 2015, no. 2 (67), pp. 99–109 (in Russian).
21. Belotserkovsky M. A. *Technologies of activated gas-flame spraying of antifriction coatings.* Minsk, Technoprint Publ., 2004. 200 p. (in Russian).
22. Vityaz P. A., Belotserkovsky M. A. Theoretical background of activating of gas-flame spraying by cocurrent flows. *Poroshkovaya metallurgiya: sb. nauch. tr.* [Powder metallurgy collection of scientific papers]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2010, no. 33, pp. 232–241 (in Russian).
23. Kukareko V. A., Belotserkovsky M. A., Belyi A. V., Grigorichik A. N. Effect of ion-beam nitriding on structure, phase state, and tribological behavior of efficient thermal spray coatings deposited from various classes of rod steels. *Journal of Friction and Wear*, 2013, vol. 34, no. 6, pp. 475–480. Doi: 10.3103/s1068366613060093
24. Grigorichik A. N., Kukareko V. A., Belyi A. V., Belotserkovsky M. A., Khina B. B. Regularities of diffusion of nitrogen during ion-beam nitriding of gas-thermal coating produced from austenitic steel 06H19N9T. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov = Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2016, no. 2, pp. 75–80 (in Russian).
25. Vityaz P. A., Komarov A. I., Komarova V. I. Formation of wear-resistance hardening coatings by microarc oxidation, immediate and subsequent modification by carbon nanomaterials. Klubovich V. V. (ed.). *Perspektivnye tekhnologii* [Advanced technologies]. Vitebsk, Vitebsk State Technological University, 2011, pp. 114–148 (in Russian).
26. Vityaz P. A., Basiniuk V. L., Belotserkovsky M. A., Zhornik V. I., Komarov A. I., Kukareko V. A., Levantsevich M. A. Use of the nanostructured materials and activated methods of surfaces engineering for production of modern technical objects. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov = Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2012, no. 3–4, pp. 46–66 (in Russian).

27. Zhornik V. I., Kukareko V. A., Belotserkovsky M. A. Tribomechanical Modification of Friction Surface by Running-In Lubricants with Nano-Sized Diamonds. Campbell J. M. (ed.). *Advances in Mechanics Research. Vol. 1*. New York, Nova Science Publishers, Inc., 2011, pp. 1–78.

28. Belevskii L. S. *Plastic deformation of surface layer and formation of coating during cladding by the flexible tool*. Magnitogorsk, Publishing House of Magnitogorsk Lyceum of Russian Academy of Sciences, 1996. 230 p. (in Russian).

29. Antsupov V. P. *Theory and practice of cladding of products by the flexible tool*. Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, 1999. 241 p. (in Russian).

30. Vityaz P. A., Levantsevich M. A., Maksimchenko N. N., Bodrykh T. I., Stepanova L. I. Tribotechnical properties of think metal coatings with nanosized fillers. *Trenie i iznos = Journal of Friction and Wear*, 2004, vol. 25, no. 6, pp. 593–601 (in Russian).

Информация об авторах

Витязь Петр Александрович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, руководитель Аппарата Национальной академии наук Беларуси, Президиум Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by.

Жорник Виктор Иванович – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zhornik@inmash.bas-net.by

Information about the authors

Piotr A. Vityaz – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Head of Staff of the National Academy of Sciences of Belarus, Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by.

Victor I. Zhornik – D. Sc. (Engineering), Assistance Professor, Head of Laboratory, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zhornik@inmash.bas-net.by.