

УДК 621.791
ББК 34.4

*Сергей Фёдорович Забелин,
доктор технических наук, профессор, член корреспондент РАН,
Забайкальский государственный университет,
672039, Россия, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30,
e-mail:s.zabelin2012@yandex.ru*

Решение проблем прочности материалов методами поверхностной нанокристаллизации

Проведен анализ и классификация методов силового и физического воздействия, дана оценка их влияния на строение и свойства поверхностного слоя материала с целью получения высоких механических и трибологических характеристик. Предложены механизмы и модель процессов формирования нанофазных систем (НФС) при различных методах воздействия.

Ключевые слова: силовые и физические методы воздействия, поверхность материала, нанофазные системы, механизмы и модель формирования нанофазных систем.

*Sergey Fyodorovich Zabelin,
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences,
Transbaikal State University
30, Alexander-Zavodskay st., Chita, Russia, 672039,
e-mail:s.zabelin2012@yandex.ru*

Solving of Problems of Coating Materials with the Methods of Superficial Nanocrystallization

The analysis and classification of methods of power and physical influence is lead, the estimation of their influence on structure and properties of superficial layer of material with the purpose of reception high mechanicals and tribologies characteristics is given. Mechanisms are offered to model of processes of formation NPS at various methods of influence.

Keywords: power and physical methods of influence, a surface of a material, nanophase systems, mechanisms and model of formation nanophase systems.

В последнее время появилось достаточно много обсуждений результатов исследований по упрочняющим технологиям различных материалов и изделий, в которых рассматриваются способы создания наноструктурированного состояния металлических материалов путём активации процесса нанокристаллизации и синтеза наноструктур различными методами внешнего силового или физического воздействия [1–7; 11–16]. Анализ таких разработок показал, что эффект достижения уникальных физико-механических и функциональных свойств упрочняемых материалов обусловлен созданием характерного структурного размера зёрен и формированием нанофазных систем (НФС) в строении по объёму всего или только поверхностного слоя материала [1–3; 15; 16]. Большое разнообразие технологических способов и методов нанокристаллизации материалов, различие подходов междисциплинарного характера к объяснению механизмов формирования НФС не позволяют выявить полную картину кинетики структурообразования и морфологии физико-химических процессов нанокристаллизации, затрудняют систематизацию и моделирование этих процессов, что на

сегодня составляет одну из актуальных проблем практического материаловедения и технологии наноструктурированных материалов (НСМ) [1].

Классификация технологий и методов наноструктурирования металлических материалов

Методы и технологии наноструктурирования материалов, в том числе и формирования НФС в строении материала, осуществляемые как в процессе их производства, так и в процессе эксплуатации, можно классифицировать по четырем технологическим направлениям [1–3] (см. табл. 1).

Таблица 1

Технологии и методы нанокристаллизации металлических материалов

№	Технологии	Методы
1	Объёмная нанокристаллизация	– Порошковой металлургии (ПМ): синтез и консолидация (компактирование и спекание) нанодисперсных порошковых материалов. – Интенсивной пластической деформации (ИПД): равноканальное угловое прессование и винтовая деформация под давлением. – Контролируемой кристаллизации из аморфного состояния (ККАС): изотермический отжиг или физическое воздействие. – Газовой атомизации (метод Глейтера). – Гальванический метод
2	Поверхностная нанокристаллизация	Внешнего силового воздействия на поверхность: материала при – фрикционной обработке; – ударном наклёпе; – прокатке; – гидроэкструзии. Внешнего физического воздействия на поверхность материала при: – ультразвуковой обработке; – лазерной обработке; – плазменной обработке; – ионной имплантации; – термической, химико-термической или термомеханической обработке
3	Нанокристаллизация путём самоорганизующейся поверхности	С использованием: – ремонтно-восстановительных смесей (РВС) в суспензиях и средах с наночастицами; – поверхностно-активируемых веществ (ПАВ) с наночастицами; – фазового наклёпа материала поверхности
4	Нанесение наноструктурированных покрытий и плёнок	При использовании: – физических (PVD) методов (молекулярно-лучевая эпитаксия); – химических (CVD) методов (химическое осаждение из газовой фазы); – электроосаждения

Не снижая значимости первого технологического направления, связанного с синтезом НСМ, и четвёртого, связанного с нанесением покрытий, отметим, что практический интерес представляют технологии второго и третьего направления, напрямую связанные с поверхностно-упрочняющими технологиями, используемыми как на подготовительной стадии производства, так и в процессе эксплуатации изделий.

Большинство технологий, обеспечивающих формирование НФС в поверхностном слое металлов и сплавов, предназначены для улучшения трибологических характеристик изделий пар-трения. Согласно классической теории износа, низкий абразивный износ и высокая усталостная прочность, а также стойкость к деформации и разрушению связаны с высокой твёрдостью материала, которая является структурно зависимой характеристикой и связана

с упругими и пластическими свойствами материала [1–3]. Например, для оценки стойкости материала к упругой деформации разрушения используют величину отношения твёрдости H к модулю упругости E , т. е. H^3/E^2 — индекс пластичности материала, а для оценки сопротивления материала пластической деформации параметр — H^3/E^2 . Из этого следует, что требуемый материал должен обладать высокой твёрдостью при низком модуле упругости, что и обеспечивается созданием наноструктурированного состояния поверхностного слоя упрочняемого материала [1].

Технологии внешнего силового воздействия

Износостойкость и трибологические свойства материала определяются не только исходной структурой и соответствующими ей физико-механическими свойствами контактирующих металлов, но и в значительной степени характером изменения структурного состояния и комплекса свойств в формирующемся в поверхностном слое материала в процессе их контактного взаимодействия. При этом формирование нанокристаллических структур трения обусловлено спецификой напряжённого состояния возникающего в зоне трения скольжения твёрдых тел [4].

Установлено [5–7], что при трении скольжения практически любых металлических материалов, в их тонком (меньше 10 мкм) поверхностном слое формируются нанокристаллические структуры, возникновение которых связано с действием в рассматриваемом слое ротационных механизмов пластической деформации. Основным фактором, обуславливающим развитие процессов упруго-пластической деформации и разрушения поверхностного слоя материала при трении скольжения, являются высокие локальные внешние напряжения, возникающие в зоне контакта. По сути, в процессе трения каждая отдельно движущаяся микронеровность одного тела создаёт в поверхностном слое сопряжённого тела две разные по знаку зоны напряжений [5], вследствие чего микрообъёмы материала поверхностного слоя трущихся тел подвергаются последовательному воздействию сжимающих и растягивающих (сдвигающих) контактных напряжений [8].

Сравнительный анализ методами металлографии, просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и рентгеноструктурного анализа (РСА) структурных изменений, развития фазовых превращений в сплавах и сталях при трении скольжения [9], деформировании сдвигом под давлением (в наковальнях Бриджмена) [10] и прокатке позволили получить данные о величине возникающих в зоне трения исследуемых материалов контактных напряжений, а также о специфике их влияния на фазовый состав, прочностные (микротвёрдость, сопротивление сдвигу) и трибологические свойства формирующихся нанокристаллических структур (см. табл. 2).

Таблица 2

Фазовый состав, прочностные и трибологические свойства нанокристаллических структур, возникающих при сухом трении скольжения сплавов железа (трение на воздухе в паре со сталью 45, нагрузка 294 Н, скорость скольжения 0,07 м/с)

Марка сплава	Фазовый состав	Микротвёрдость, ГПа	Сопротивление сдвигу, ГПа	Коэффициент трения F	Интенсивность изнашивания $Ih, 10^{-7}$
Г21	Е	5,6	1,6	0,28	3,1
Г30	Е+У(25 %)	6,2	1,7	0,27	1,6
Г40	У	6,2	2,5	0,40	11,0
120Г13	У	8,0	4,0	0,50	1,0
40Х12Г8	А(>80 %)	8,9	4,9	0,55	1,8
140Г4	У+(30 %А)	9,3	5,6	0,60	0,4

Кристаллиты (фрагменты), образующие нанофазные структуры, по данным электронно-микроскопических исследований [8–9], характеризуются значительной взаимной разориентацией и неоднородны по величине — их размер лежит в диапазоне от

нескольких до сотен нанометров. Ниже нанокристаллического слоя — на расстоянии 10 мкм от поверхности трения — формируется ультрадисперсная структура, в которой присутствует ярко выраженная текстура [9].

Реальные величины контактных сжимающих напряжений примерно соответствуют значениям микротвёрдости поверхности трения. Например, при трении стали У13 возникают контактные сжимающие напряжения, которые достигают уровня 10–12 ГПа [8]. Высокие сжимающие контактные напряжения препятствуют возникновению и развитию микротрещин в поверхностном слое, создавая условия для реализации больших пластических деформаций, которые осуществляются ротационными механизмами пластичности, что и обуславливает формирование нанокристаллических структур трения. Преимущественный характер развития фазовых превращений в поверхностном слое обеспечивает низкий коэффициент трения (менее 0,3) и значительное сопротивление адгезионному изнашиванию (см. табл. 2), а формирование нанофазного слоя способствует росту прочности и износостойкости стальных изделий.

Технологии методов физического воздействия

Проблема поверхностной нанокристаллизации массивных деталей и изделий из конструкционных и инструментальных материалов может быть решена использованием различных методов физического воздействия на поверхность материала (см. табл. 1). Рассмотрим ряд примеров таких технологий. Одним из способов улучшения качественных характеристик изделий из сталей и сплавов является плазменная обработка в высокочастотной (ВЧ) плазме индукционного и ёмкостного разрядов при пониженном давлении (13,3–133 Па) [11]. В результате воздействия ВЧ плазмы при пониженном давлении с продувом газа на поверхности сталей, титановых и твёрдых сплавов образуются нанофазные слои толщиной до 30 нм. Исследования с помощью рентгеновского микроанализатора, дифрактометра и электронного магнитного спектрометра показали, что при взаимодействии ВЧ плазмы с металлами и сплавами происходит диффузионное внедрение атомов плазмообразующих газов (Ag, N, O, C) в поверхностные слои, образуя на них нанофазные системы из оксидов, нитридов и карбидов элементов, входящих в состав материала. Изменения структуры и свойств материала происходят на глубине 100–200 мкм. При этом повышается коррозионная стойкость, прочность, микротвёрдость, износостойкость изделий из этих материалов, а причиной установленных изменений являются низкоэнергетичная (10–100 эВ) ионная бомбардировка поверхности твёрдых тел [11].

Не менее эффективно применение методов ионно-лучевой обработки (ИЛО) металлов и сплавов [12], которые приводят к формированию на поверхности модифицированного слоя, физико-механические свойства которого значительно отличаются от свойств основного материала. В зависимости от флюенса ионов возможно образование в поверхностных слоях метастабильных (пересыщенных) твёрдых растворов, выделений новых фаз, а также потери дальнего порядка в расположении атомов, образующих кристаллическую решётку твёрдого тела.

Например, ИЛО аустенитной нержавеющей стали 12 × 18 Н10Т проводилась на вакуумной установке УВН-2М с использованием ленточного ионного источника с азотированием полиэнергетическим потоком ионов с энергией 2,5 кэВ и плотностью ионного тока — 2 мА/см², до набора дозы внедренных ионов 3×10^{19} см⁻² при температурах 350 ÷ 500 °С и получили модифицированные слои соответственно 5–20 мкм. Рентгенофазовый анализ показал, что упрочнённый слой состоит из нитридной фазы на основе ГЦК решётки с гексагональными (400 °С) и тетрагональными (450 °С) искажениями. При температурах свыше 420 °С в слое формируются частицы CrN и наноразмерные частицы ферромагнитного α – Fe, размер которых 3–8 нм в зависимости от температуры. Кроме того, в слое

обнаружены следы присутствия новой фазы, которая предварительно идентифицирована как гексагональный нитрид $(Fe, Cr)_2N$. Данная технология ионно-лучевого азотирования аустенитных нержавеющей сталей применяется для производства медицинских инструментов, но может найти широкое применение в машиностроительном производстве.

Другим примером технологии физического воздействия на поверхность материала изделий с целью формирования нанofазных систем является электронно-пучковая обработка (ЭПО). Использование импульсных электронных пучков как способ модификации металлов и сплавов позволяет существенно повысить коррозионную стойкость, износостойкость и микротвёрдость поверхностных слоев материала, в том числе и конструкционных сталей [13]. Достижимый эффект объясняется закономерностями эволюций строения структуры на различных структурно-масштабных уровнях фазового состава и дефектной субструктуры материала, в условиях высокоскоростного нагрева и охлаждения, инициированных облучением сильноточным электронным пучком микросекундной длительности. Релаксация полей напряжений, формирующихся в стали при ЭПО, осуществляется путём их взаимной аккомодации при образовании кристаллов мартенсита.

Большой практический интерес представляют технологии получения нанокристаллического состояния материала в поверхностном слое массивных изделий (валы прокатного стана, инструмент, штампы и др.) из конструкционных и инструментальных сталей и изделий из титановых сплавов (BT22) методом ультразвуковой ударной обработки (УЗУО) [14]. Ее эффективность связана с многократным ударным нагружением металлов и протекающими при этом различными физико-химическими процессами. Наиболее важными из них являются снижение деформирующих усилий и ударных нагрузок и существенное повышение подвижности атомов, что приводит к аномальному массопереносу. Высокая степень пластической деформации при УЗУО локализуется в тонких поверхностных слоях, что в совокупности с повышением температуры при ударах способствует протеканию различных структурно-фазовых превращений в металлах и сплавах. В результате УЗУО массивных изделий из закалённых инструментальных и штамповых сталей (4X5MФ1С) методом ПЭМ высокого разрешения ($\times 10^6$) установлено образование на глубине 15–25 мкм от поверхности нанокристаллических структур (нанofаз) с размером зерна 5–10 нм, а на глубине 250–300 мкм – субмикрокристаллической структуры [4]. При этом наблюдается рост микротвёрдости в 1,3–1,6 раза.

Рентгеновские методы показали, что уровень внутренних сжимающих напряжений возрастает до 800–850 МПа на глубине до 150 мкм. При этом возрастает плотность дефектов кристаллического строения, являющихся центрами зарождения новых фаз. Кроме того, высокая степень пластической деформации материала поверхностного слоя позволяет ускорить распад метастабильных фаз и ускорить время процесса старения. Весьма перспективным является использование лазерной обработки металлических материалов, с целью получения высокого уровня их эксплуатационных свойств. Это связано с возможностью целенаправленной организации структуры поверхностного слоя материала за счёт контролируемой нанокристаллизации, формирования НФС, дисперсного упрочнения, химикотермической обработки и, как следствие, получения высокого комплекса физических, химических и механических свойств [17].

Эффект структурообразования в поверхностном слое материалов под влиянием импульсного лазерного воздействия обусловлен возникновением значительных микронапряжений и пластической деформации в микрообъёмах материала. Это подтверждают результаты рентгено- и микроструктурного анализа зон лазерного воздействия на различных материалах (стали У10А, Х12Ф1, Р6М5, 08Х13, никель и техническое железо) [18], когда выявлены зубчатость границ зёрен и присутствие полос скольжения, что может быть связано с протеканием процессов, аналогичных динамической высокотемпературной деформации [17; 18].

Следовательно, процесс практически мгновенного поглощения энергии при импульсно-лазерном воздействии приводит к генерации волн напряжений и высокоскоростной локальной пластической деформации микрообъёмов поверхностного слоя материалов, что способствует фрагментации структуры, инициированию процессов массопереноса (диффузии) элементов сплавов и полиморфных превращений в них. В совокупности это приводит к особым условиям структурообразования и формированию НФС в строении поверхностного слоя и оказывает влияние на свойства материала. Например, лазерная обработка поверхности аустенитно-ферритной стали 03X14H10K5M2Ю2Т [17] способствует значительному повышению твёрдости поверхностного слоя (до 600-650HV) при сохранении вязкой сердцевины. Управляющим параметром процесса воздействия являются градиенты колебательного давления на границах раздела фаз, градиенты температур и концентраций, контролируемые аномальные диффузионные потоки и диспергирование растущих нанокристаллов (нанофаз). Формирование НФС с фрагментированной (мозаичной) структурой, субграницы которой, являясь барьерами, приводят к релаксации напряжений, уменьшает опасность трещинообразования.

Другим перспективным способом улучшения физико-механических и функциональных свойств поверхности материала (сопротивление износу, коррозии, радиационному разрушению и др.) является метод ионной имплантации (МИИ). Обобщённые сведения о физико-химических процессах и эффектах структурообразования при МИИ показали ряд преимуществ этого метода [17–19]: 1) процесс не имеет термодинамических ограничений – существует возможность создания твёрдых растворов с содержанием легирующих элементов, значительно превышающих пределы растворимости; составы сплавов не ограничены рамками равновесных диаграмм состояния, поэтому могут быть получены новые метастабильные составы; 2) при МИИ модифицируются внешние поверхности и внутренние границы раздела; 3) параметры размеров и шероховатости не изменяются в процессе ионной обработки и др. Улучшение эксплуатационных характеристик имплантированных материалов происходит вследствие модификации структурно-фазового и элементного состояния поверхностных слоёв металлических материалов, где в условиях ионного облучения наблюдается формирование твёрдых растворов высокой концентрации, наноразмерных фаз внедрения, неравновесных фаз и интерметаллидных соединений. Возможность синтеза и формирования наноинтерметаллидных фаз и соединений в поверхностных слоях металлических материалов при МИИ приводит к их существенному упрочнению за счёт обеспечения высокой твёрдости, сопротивления трению, износу и высокотемпературной стойкости.

Морфологические схемы процессов и модель механизмов формирования нанофазных систем

Анализ представленных технологий и других результатов исследований показал, что основную роль в процессе формирования НФС играют структурные изменения в поверхностном слое материала при создании в нём особо активированного состояния. Такое состояние материала обусловлено не только структурными изменениями (измельчение зерна и фрагментация, образование кластерных структур и нанофаз), но и спецификой напряжённого состояния и процессов релаксационной деформации, возникающих в зонах концентраторов напряжений (ЗКН) локального взаимодействия твёрдых тел (внешнее силовое воздействие) или в результате взаимодействия элементов структуры с потоками энергии, ионов или диффундирующих атомов (физическое воздействие). Системный анализ технологий различных видов воздействий на процессы формирования НФС в поверхностном слое материала (конструкционные стали и сплавы) показал, что физическая сущность процессов и механизмы формирования НФС различны, но морфологические схемы технологий различаются незначительно [15; 16].

При внешнем силовом воздействии на поверхность материала, а это методы механической, термомеханической и фрикционной обработки, ударного наклёпа и прокатки, протекают процессы контактного взаимодействия твёрдых тел, и морфологическая схема технологии имеет следующий вид:

Контактное взаимодействие → **Напряжения** → **Образование ЗКН** → **Упруго-пластическая деформация** → **Релаксация напряжений** → **Структурные изменения** — фрагментация (формирование НФС в поверхностном слое).

При физическом воздействии на поверхность материала, а это методы плазменной, лазерной, ультразвуковой, ионно-лучевой, электроискровой, термической и химико-термической обработки, протекают процессы взаимодействия потоков энергии, ионов и/или диффундирующих атомов со структурными элементами материала поверхностного слоя и морфологическая схема таких процессов имеет следующий вид:

Воздействие → **Напряжения** → **Образования ЗКН** → **Микродеформация и диффузия** → **Структурные изменения** — фрагментация, кластерные и нанофазные образования (избирательное изменение фазового состояния и кинетики фазовых превращений при формировании НФС).

Если считать материал изделия многоуровневой системой, в которой пластическая деформация самосогласованно развивается как потеря сдвиговой устойчивости на различных масштабных уровнях (нано-, микро-, мезо- и макро), то основополагающим механизмом деформации подобных систем является локальное структурное превращение материала в локальных зонах концентраторов напряжений (ЗКН) различного масштаба.

В случаях внешних силовых воздействий возникающие напряжения вызывают большие (интенсивные) пластические деформации (ИПД) структурных составляющих в ЗКН поверхностного слоя материала. В конечном счёте они определяют спектр структурных дефектов и доминирующие микромеханизмы пластичности при контактном деформировании. В этом случае формирование нанофазной структуры в поверхностном слое обусловлено реализацией ротационных механизмов пластической деформации и эффекта фрагментации структуры, под воздействием выделяемой в условиях деформации энергией. В случаях, когда осуществляются физические методы воздействия на поверхностный слой материала (высокочастотные колебания при ультразвуковой обработке, ионная бомбардировка при плазменной или ионно-лучевой обработке), в структуре создаются зоны активированного состояния материала — ЗКН, причём на всех уровнях — нано-, микро-, мезо- и макро-структуры. Воздействие потоков энергии, ионов, градиентов температуры и концентрации, диффузии атомов плазмообразующих газов и атомов элементов приводит к формированию нанофазных систем в поверхностном слое материала.

В зависимости от плотности потоков энергии, частоты колебаний или флюенса ионов в структурном строении материала происходит образование ЗКН, в которых инициировано образование метастабильных (пересыщенных) твёрдых растворов, выделение новых нанофаз, а также наблюдается потеря дальнего порядка в расположении атомов кристаллической решётки твёрдого тела [16]. При физических методах воздействия на материал в его поверхностном слое образуются внутренние напряжения, достаточные для того, чтобы инициировать и диффузионные процессы, которые приводят к избирательному изменению фазового состояния и изменению кинетики фазовых превращений в материале.

С учётом анализа механизмов и представленных морфологических схем процессов формирования нанофазных систем для различных технологических способов внешнего силового и физического воздействия можно предложить обобщённую модель процессов (см. рис. 1).

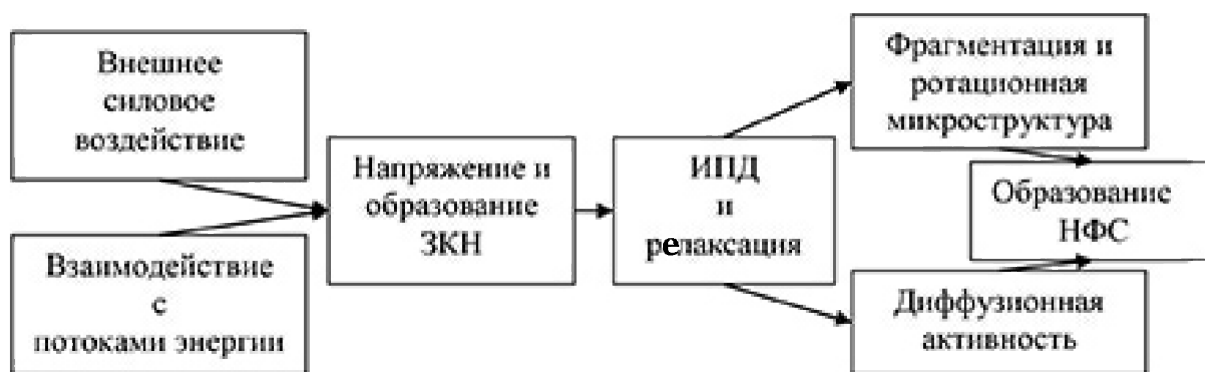


Рис. 1. Модель формирования НФС в поверхностном слое материала

Анализ исследований позволяет сделать вывод, что формирование нанофазных систем в поверхностном слое материалов как в процессе производства, так и в процессе эксплуатации изделия обусловлено реализацией ротационных механизмов пластической деформации, возникающих при внешнем силовом или физическом воздействии, инициирующих процессы диффузии, генерации и релаксации напряжений и преимущественный характер развития фазовых превращений в образующихся зонах локальных внутренних напряжений. Уникальный комплекс конструктивных и функциональных свойств таких материалов объясняется иерархическим изменением структурных образований в поверхностном слое изделия — фрагментацией структуры, образованием кластерных структур и новых нанофаз, в частности карбидных, оксидных, нитридных, в зависимости от состава элементов сплава или технологической среды, возникающей при внешнем силовом или физическом воздействии [20; 21].

Очевидно, результаты примеров научных и практических разработок по трибологическим технологиям с использованием наноматериалов и наноконструирования поверхности деталей и узлов позволит успешно решать проблему борьбы с износом и эффективной эксплуатацией механизмов и машин в условиях регионов холодного климата в различных отраслях промышленности и техники.

Список литературы

1. Забелин С. Ф., Алымов М. И. Материаловедение и технология наноструктурированных материалов. Чита: Изд-во ЗабГГПУ (Гриф УМО ВППО), 2007. 141 с.
2. Забелин С. Ф., Забелин К. С. Системный анализ и критерии классификации наноструктурированных материалов // Технология машиностроения. 2006. № 3. С. 5–10.
3. Забелин С. Ф., Забелин К. С. Системно-технологический анализ процессов синтеза объёмных нанокристаллических материалов // Технология машиностроения. 2007. № 6. С. 5-9.
4. Повышение теплоустойчивости и износостойкости закалённых углеродистых сталей фрикционной обработкой / А. В. Макаров, Л. Г. Коршунов [и др.] // МиТОМ. 2007. № 3. С. 51–62.
5. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии // пер. с англ. М.: Машиностроение, 1986. 359 с.
6. Korshunov L. G., Makarov A. V., Chernenko N. L. Ultrafine Structures formed upon Friction and Their Effect on the Tribological Properties of Steels : The Physics of Metals and Metallography. 2000. V. 90 S. I. P. 548–558.

7. Макаров А. В., Коршунов Л. Г. Повышение твёрдости и износостойкости закаленных лазером стальных поверхностей с помощью фрикционной обработки // Трение и износ. 2003. Т. 24. № 3. С. 301–306.
8. Коршунов Л. Г. Шабашов В. А., Черненко Н. Л., Пилюгин В. П. Влияние контактных напряжений на фазовый состав, прочностные и трибологические свойства нанокристаллических структур, возникающих в сталях и сплавах при трении скольжения. Тольятти: ТГУ, 2007. С. 166–168.
9. Коршунов Л. Г. Структурные превращения при трении и износостойкость аустенитных сталей // ФММ. 1992. № 8. С. 3–21.
10. Shabashov V. A., Korshunov L. G., Muroseev A. G. et al. Deformation – induced phase transitions in a high-carbon steel // Materials Science and Engineering. A 346. 2003. P. 196–207.
11. Абдулин И. Ш., Желтухин В. С. [и др.]. Формирование нанофазных систем на поверхности металлов в высокочастотной плазме // Материаловедение. 2007. №9. С. 52–56.
12. Белый А. В. Высокоинтенсивная низкоэнергетическая имплантация ионов азота // Физическая мезомеханика. 2002. Т. 5. № 1. С. 95.
13. Формирование наноразмерных кристаллов мартенсита, при электронно-пучковой обработке стали 65Г /И. Б. Целлермаер [и др.]. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2007. С. 31–32.
14. Лесюк Е. А. Технология получения нанокристаллической структуры в поверхностных слоях массивных деталей из конструкционных и инструментальных сталей // Технология металлов. 2008. № 7. С. 29–35.
15. Механизмы и модели формирования нанофазных систем на поверхности материала при внешнем силовом и физическом воздействии / С. Ф. Забелин, А. А. Васильев [и др.]: материалы междунар. конф. Невинномысск: Изд-во НИ-ЭУП, 2009. С. 276–278.
16. Забелин С. Ф., Зеленский В. А., Забелин К. С. Морфологическая модель процесса формирования нанофазной системы на поверхности металлов и сплавов: материалы междунар. конф. «Актуальные проблемы прочности». Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2008. С. 125–128.
17. Коллективная монография. Sever plastic deformation: Toward Bulk Production of Nanostructured Materials / Ed. Burhanettin S. Altan (Michigan Technological University). USA: Nova Publishers Inc. 2006. 601 p.
18. Нанокристаллические интерметаллидные и нитридные структуры, формирующиеся при ионно-плазменном воздействии / И. А. Курзина [и др.]. Томск: Изд-во НТЛ, 2008. 324 с.
19. Курзина И. А. Наноразмерные интерметаллидные фазы, формирующиеся в условиях ионной имплантации // Материаловедение. 2010. № 2. С. 49–64.
20. Анализ процессов нанокристаллизации и формирования нанофазных систем в поверхностном слое металлов и сплавов / С. Ф. Забелин [и др.] // Технология машиностроения. 2010. № 11. С. 5–12.
21. Структурные изменения в поверхностных слоях деталей из титановых сплавов ВТ6 И ВТ9 при облучении импульсными электронными пучками / В. А. Шулов [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 1. С. 29–31.

References

1. Zabelin S. F., Alymov M. I. Materialovedenie i tekhnologiya nanostrukturirovannykh materialov. Chita: Izd-vo ZabGGPU (Grif UMO VPPO), 2007. 141 s.
2. Zabelin S. F., Zabelin K. S. Sistemnyi analiz i kriterii klassifikatsii nanostrukturirovannykh materialov // Tekhnologiya mashinostroeniya. 2006. № 3. S. 5–10.
3. Zabelin S. F., Zabelin K. S. Sistemno-tekhnologicheskii analiz protsessov sinteza ob"emnykh nanokristallicheskikh materialov // Tekhnologiya mashinostroeniya. 2007. № 6. S. 5–9.
4. Povyshenie teplostoikosti i iznosostoikosti zakalennykh uglerodistykh stalei friktsionnoi obrabotkoi / A. V. Makarov, L. G. Korshunov [i dr.] : MiTOM. 2007. № 3. S. 51–62.
5. Bakli D., Poverkhnostnye yavleniya pri adgezii i friktsionnom vzaimodeistvii // per. s angl. M.: Mashinostroenie, 1986. 359 s.
6. Korshunov L. G., Makarov A. V., Chernenko N. L. Ultrafine Structures formed upon Friction and Their Effect on the Tribological Properties of Steels // The Physics of Metals and Metallography. 2000. V. 90 S. I. P. 548–558.
7. Makarov A. V., Korshunov L. G. Povyshenie tverdosti i iznosostoikosti zakalennykh lazerom stal'nykh poverkhnostei s pomoshch'yu friktsionnoi obrabotki // Trenie i iznos. 2003. T. 24. № 3. S. 301–306.
8. Korshunov L. G. Shabashov V. A., Chernenko N. L., Pilyugin V. P. Vliyanie kontaktnykh napryazhenii na fazovyi sostav, prochnostnye i tribologicheskie svoystva nanokristallicheskikh struktur, vznikayushchikh v stalyakh i splavakh pri trenii skol'zheniya. Tol'yatti: TGU, 2007. S. 166–168.
9. Korshunov L. G. Strukturnye prevrashcheniya pri trenii i iznosostoikost' austenitnykh stalei // FMM. 1992. № 8. S. 3–21.
10. Shabashov V. A., Korshunov L. G., Muroseev A. G. et al. Deformation – induced phase transitions in a high-carbon steel // Materials Science and Engineering. A 346. 2003. P. 196–207.
11. Abdulin I. Sh., Zheltukhin V. S. [i dr.]. Formirovanie nanofaznykh sistem na poverkhnosti metallov v vysokochastotnoi plazme // Materialovedenie. 2007. № 9. S. 52–56.
12. Belyi A. V. Vysoko intensivnaya nizkoenergeticheskaya implantatsiya ionov azota // Fizicheskaya mezomekhanika. 2002. T. 5. № 1. S. 95.
13. Formirovanie nanorazmernykh kristallov martensita, pri elektronno-puchkovoii obrabotke stali 65G /I. B. Tsellermaer [i dr.]. Tol'yatti: Izd-vo TGU, 2007. S. 31–32.
14. Lesyuk E. A. Tekhnologiya polucheniya nanokristallicheskoi struktury v poverkhnostnykh sloyakh massivnykh detalei iz konstruktsionnykh i instrumental'nykh stalei // Tekhnologiya metallov. 2008. № 7. S. 29–35.
15. Mekhanizmy i modeli formirovaniya nanofaznykh sistem na poverkhnosti materiala pri vneshnem silovom i fizicheskom vozdeistvii / S. F. Zabelin,

A. A. Vasil'ev [i dr.]: materialy mezhdunar. konf. Nevinnomyssk: Izd-vo NIEUP, 2009. S. 276–278.

16. Zabelin S. F., Zelenskii V. A., Zabelin K. S. Morfologicheskaya model' protsessa formirovaniya nanofaznoi sistemy na poverkhnosti metallov i splavov: materialy mezhdunar. konf. «Aktual'nye problemy prochnosti». N. Novgorod: Izd-vo NNGU, 2008. S. 125–128.

17. Kollektivnaya monografiya. Sever plastic deformation: Toward Bulk Production of Nanostructured Materials / Ed. Burhanettin S. Altan (Michigan Technological University). USA: Nova Publishers Inc. 2006. 601 p.

18. Nanokristallicheskie intermetallidnye i nitridnye struktury, formiruyushchiesya pri ionno-plazmennom vozdeistvii / I. A. Kurzina [i dr.]. Tomsk: Izd-vo NTL, 2008. 324 s.

19. Kurzina I. A. Nanorazmernye intermetallidnye fazy, formiruyushchiesya v usloviyakh ionnoi implantatsii // Materialovedenie. 2010. № 2. S. 49–64.

20. Analiz protsessov nanokristallizatsii i formirovaniya nanofaznykh sistem v poverkhnostnom sloe metallov i splavov / S. F. Zabelin [i dr.] // Tekhnologiya mashinostroeniya. 2010. № 11. S. 5–12.

21. Strukturnye izmeneniya v poverkhnostnykh sloyakh detalei iz titanovykh splavov VT6 I VT9 pri obluchenii impul'snymi elektronnyimi puchkami / V. A. Shulov [i dr.] // Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. 2009. № 1. S. 29–31.

Статья поступила в редакцию 10.05.2015