



УДК 629.7.023

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-2-2

**ИЗНОСОСТОЙКОЕ, АНТИФРИКЦИОННОЕ
И ФРЕТТИНГОСТОЙКОЕ ПОКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ Ni-B**

С.С. Виноградов

Ю.А. Теркулова

Е.А. Курдюкова

А.А. Никифоров

Январь 2015

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 629.7.023

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-2-2

С.С. Виноградов¹, Ю.А. Теркулова¹, Е.А. Курдюкова¹, А.А. Никифоров¹

ИЗНОСОСТОЙКОЕ, АНТИФРИКЦИОННОЕ И ФРЕТТИНГОСТОЙКОЕ ПОКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ Ni–В

Разработанное покрытие Ni–В, пропитанное суспензией ВАП-5, обеспечивает низкий коэффициент трения, высокую износостойкость и фреттингостойкость деталей трения из сталей. Покрытие работоспособно на воздухе в интервале температур от -80 до +250°C и удельных нагрузках до 50 МПа.

Ключевые слова: *химическое покрытие Ni–В, пропитка суспензией, антифрикционный состав, коэффициент трения, износостойкость, фреттингостойкость.*

S.S. Vinogradov, Y.A. Terkulova, E.A. Kurdyukova, A.A. Nikiforov

WEAR-PROOF, ANTIFRICTION AND FRETTING-RESISTANT COATING BASED ON Ni–В

The developed Ni–В coating impregnated with VAP-5 suspension ensures a low friction factor, high wear- and fretting resistance for friction parts from steels. The coating is workable in air within -80÷+250°C temperature range under specific loadings up to 50 MPa.

Keywords: *Ni–В chemical coating, impregnation with suspension, antifriction composition, friction factor, wear resistance, fretting resistance.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Современные условия эксплуатации машин, связанные с высоким уровнем действующих напряжений, вибрациями, широким температурным интервалом, агрессивными средами, диктуют необходимость соблюдения особых требований к материалам, в частности – высокой надежности и долговечности деталей, из которых они выполне-

ны [1]. Практика показывает, что среди основных факторов, влияющих на надежность, значительное место занимают вопросы износостойкости деталей. По статистике большинство машин (85–90%) выходят из строя в результате износа поверхности отдельных деталей [2–8]. Затраты на ремонт и техническое обслуживание машины в несколько раз превышают ее стоимость. Создание машин, не требующих капитального ремонта, позволит сэкономить огромное количество финансовых средств, трудовых ресурсов и материалов.

Повышение износостойкости и усталостной прочности деталей основано на воздействии на рабочую поверхность деталей и элементы кристаллической решетки металла путем применения различных видов обработок [9–30].

Слесарно-механическая обработка применяется для устранения задиrow, рисок и других дефектов поверхности, а также для получения необходимой чистоты поверхности. Чем выше чистота поверхности, тем выше износостойкость детали. Наиболее часто для этих целей применяют шабрение, шлифование, полирование, хонингование.

Термическая обработка металлов и сплавов применяется для изменения структуры и свойств в заданном направлении. Среди основных видов термической обработки следует отметить отжиг (гомогенизация и нормализация), закалку, отпуск и дисперсионное твердение (старение).

Химико-термическая обработка проводится с целью изменения химического состава, структуры и свойств поверхности металла. Она включает в себя азотирование, фосфатирование, анодирование, цианирование, сульфидирование, борирование, цементацию, а также гальваническую обработку, которая заключается, главным образом, в хромировании рабочей поверхности деталей.

Механическое упрочнение (*наклеп*) – увеличение твердости и прочности металла, вызванное пластической деформацией при температурах ниже температуры рекристаллизации. Различают виброобкатывание (вибровыглаживание), дробеструйную и гидроструйную обработку, дорнование (дорнирование), обкатывание, электромеханическое упрочнение, электроискровую обработку.

Электролитическое хромирование широко применяется в промышленности для повышения твердости и износостойкости деталей (например, штоков, цилиндров, поршней, валиков, золотников и др.) из различных конструкционных материалов. Хромовое покрытие позволяет увеличить сопротивление деталей механическому износу в 5–10 раз [31, 32]. Актуальность проблемы и перспективность разработки способов замены хромовых покрытий обусловлены требованиями директивы Евросоюза (RoHS), ограничивающей использование токсичных канцерогенных соединений шестивалентного хрома.

Одним из процессов, направленных на повышение надежности и долговечности дета-

лей, является химическое никелирование. Применение покрытий систем Ni-P и Ni-B, нанесенных химическим методом, может быть одним из способов исключения из гальванического производства соединений шестивалентного хрома. Химические никелевые покрытия по своим служебным характеристикам приближаются к хромовым. Особенностью химических покрытий является равномерность их толщины на деталях сложной конфигурации, в том числе на деталях с узкими зазорами и глухими отверстиями.

Большой вклад в изучение и развитие процесса химического никелирования в нашей стране внесли П.П. Беляев, К.М. Горбунова, М.И. Зильберфарб, С. Панченко, А.А. Никифорова, С.А. Вишенков, К.М. Вансовская, В.А. Ильин [33–39].

Целью и задачей работы является разработка износостойкого покрытия для пар трения для замены хрома на деталях из низко-, среднелегированных сталей средней прочности (до 1370 МПа) и высокопрочных сталей (до 1800 МПа).

Материалы и методика

Все исследования и испытания проведены в соответствии с ГОСТ и методиками ВИАМ, за результат испытаний принимается среднее арифметическое из трех параллельных определений.

Адгезия и прочность покрытия определяются по ГОСТ 16523–89 на пластинах размером 150×70 мм, толщиной 0,8 мм. Эластичность покрытия при изгибе определяется по ГОСТ 13345–85 на пластинах из черной полированной жести длиной 100–150 мм, шириной 20–50 мм, толщиной 0,25–0,32 мм.

Износостойкость покрытий на воздухе определяется при торцевом трении на испытательной машине И-47 согласно ММ 1.595-5-315–2007 при осевой удельной нагрузке 3 МПа и скорости взаимного перемещения 0,3 м/с в условиях сухого трения.

Фреттингостойкость покрытий определялась по методике ВИАМ на установке УИФ-2. Фреттинг-износ антифрикционного покрытия происходил в результате воздействия контртела при возвратно-вращательном движении на неподвижный образец с покрытием. Условия испытаний: удельная нагрузка 80 МПа, амплитуда 400 мкм, частота 16,7 Гц.

Оценка физико-механических свойств проводилась на пластинках размером 150×70 мм, толщиной 0,8 мм. Прочность при ударе измеряется на приборе У-1 по ГОСТ 13345–85, эластичность пленки при изгибе – на приборе ШН по ГОСТ 16523–89.

Толщина покрытий для определения физико-механических свойств составляет 25–30 мкм, на втулках для исследования триботехнических характеристик 25–35 мкм. Замер толщины производится микрометром с индикатором.

Термическая стабильность определяется путем выдержки покрытий в течении 5 ч в муфельной печи при заданной температуре.

Результаты

Для проведения исследований были изготовлены образцы из стали 30ХГСА, на которые наносили покрытие системы никель–бор разной толщины из щелочного раствора, содержащего никель двухлористый, гидроксид натрия, натрий боргидрид, этилендиамин, тиомочевину и калий-натрий виннокислый. Покрытие системы никель–бор наносили по следующей технологической схеме: шлифование→электролитическое обезжиривание→активация→нанесение химического покрытия→термическая обработка покрытия. При этом оптимальная температура раствора для получения покрытия составляет 85–90°C, плотность загрузки 1–2 дм²/л, рН раствора для получения покрытия системы Ni–В – не менее 13; режим термической обработки покрытий: 350°C в течение 1–1,5 ч.

Для химического покрытия системы Ni–В максимальная толщина, получаемая из 1 л раствора при указанных условиях за 4 ч осаждения, составляет ~23 мкм: 19; 3; 0,9 и 0,5 мкм соответственно за каждый час осаждения. В связи с резким снижением скорости осаждения покрытия требуется смена раствора химического никелирования через каждый час. Помимо снижения скорости осаждения покрытия могут быть получены осадки разного состава, что может привести к нестабильности свойств покрытия системы Ni–В.

Указанные технологические параметры являются наиболее оптимальными с точки зрения скорости осаждения покрытия, которая для покрытия системы Ni–В составляет 16–19 мкм/ч. При этом формируется покрытие системы Ni–В на деталях из сталей средней прочности, отвечающее по качеству (внешнему виду и прочности сцепления) требованиям ГОСТ 9.301 и ГОСТ 9.302.

Коэффициент сухого трения, определенный на установке И-47 согласно ММ 1.595-5-315–2007 (в течение 1 ч при удельной нагрузке 3 МПа и скорости взаимного перемещения 0,3 м/с в условиях сухого трения), для покрытия системы Ni–В составляет 0,49–0,51 (для покрытия системы Ni–Р: 0,56–0,77), что находится на уровне коэффициента сухого трения для хромовых покрытий (0,46–0,62).

С целью снижения коэффициента трения использована твердосмазочная пропитка ВАП-5. Проведены испытания трибологических свойств данного покрытия, состоящего из химического покрытия системы Ni–В и суспензии антифрикционной пропитки ВАП-5.

В результате испытаний на фреттингостойкость установлено, что при удельной

нагрузке 80 МПа, амплитуде 400 мкм и частоте 16,7 Гц (на установке УИФ-2) на образцах с покрытиями системы Ni–В в паре с контртелом из стали 30Х13 наблюдается фреттинг через 5–20 мин; на одном образце из десяти через 240 мин очага фреттинга не обнаружено. На образцах с покрытием системы Ni–Р очаги фреттинга появились через 20 мин.

Проведены испытания на трение и износ покрытия системы Ni–В, пропитанного суспензией ВАП-5. Покрытие системы Ni–В, пропитанное суспензией ВАП-5, имеет стабильные значения коэффициента трения – от 0,11 до 0,14, работоспособно на воздухе при температурах от -80 до +250°С и удельных нагрузках до 50 МПа, превосходит серийное покрытие ВАП-2. Триботехнические свойства покрытий приведены в таблице.

Триботехнические свойства покрытий на стали 30ХГСА

Покрытие	Износостойкость, отн. ед.	Коэффициент трения	Фреттингостойкость, ч
Химическое покрытие системы Ni–В, пропитанное ВАП-5	$5 \cdot 10^{-9}$	0,1–0,2	≤ 1
ВАП-2 (серийное)	$5,3 \cdot 10^{-8}$	0,144	≤ 1

Суспензия пленкообразующего состава для пропитки покрытия системы Ni–В состоит из эпоксидной матрицы и включений частиц дисульфида молибдена, графита, нитрида бора и оксида кадмия. Все наполнители просушены и размолоты для получения порошка дисперсностью <5 мкм. Наполнители прочно закреплены в эпоксидной матрице, что создает благоприятные условия для повышения удельных нагрузок в условиях эксплуатации.

Наполнители суспензии имеют кристаллическое строение и обладают различными физико-механическими свойствами по всем направлениям, т. е. они анизотропны. В кристаллической решетке слоистых структур атомы располагаются в виде плоских слоев или гофрированных параллельных пакетов, состоящих из нескольких слоев. В графите атомы расположены в параллельных плоскостях и образуют правильные шестиугольники. Связи между атомами углерода в слое ковалентные, а между атомами углерода разных слоев – металлические. Металлическая связь значительно слабее ковалентной связи, что способствует легкой расщепляемости графита по плоскостям спайности. Слоистая структура дисульфида молибдена представляет собой «пакеты», состоящие из трех слоев, каждый из которых состоит из атомов металла, по обеим сторонам которого находятся атомы галоида. Связь галоида с металлом – ковалентная, а связь галоида с галоидом слабая, благодаря чему «пакеты» могут легко скользить по плоскостям спайности и легко разрушаться при размоле.

Непосредственно перед нанесением пропитывающего состава детали обезжириваются, затем на поверхность наносится пропитывающий состав и он полимеризуется. Исследования на образцах показали, что прочность покрытия при прямом ударе составляет не менее 4,9 МПа – максимально определяемое значение на приборе У-1, а прочность при изгибе 1–3 мм.

Исследовано состояние поверхности образцов и контртела после испытаний на трение и износ. После испытаний на всех образцах структура поверхности неоднородна. Наряду с сохранившимися областями, имеющими практически такую же структуру, как в исходном состоянии, отмечаются неравномерно расположенные по трущейся поверхности области с измененной структурой и области с вторичными структурами, образовавшимися при трении.

Поверхности контртела и покрытия системы Ni–В, пропитанного суспензией ВАП-5, после испытаний на машине И-47 представлены на рис. 1 и 2.

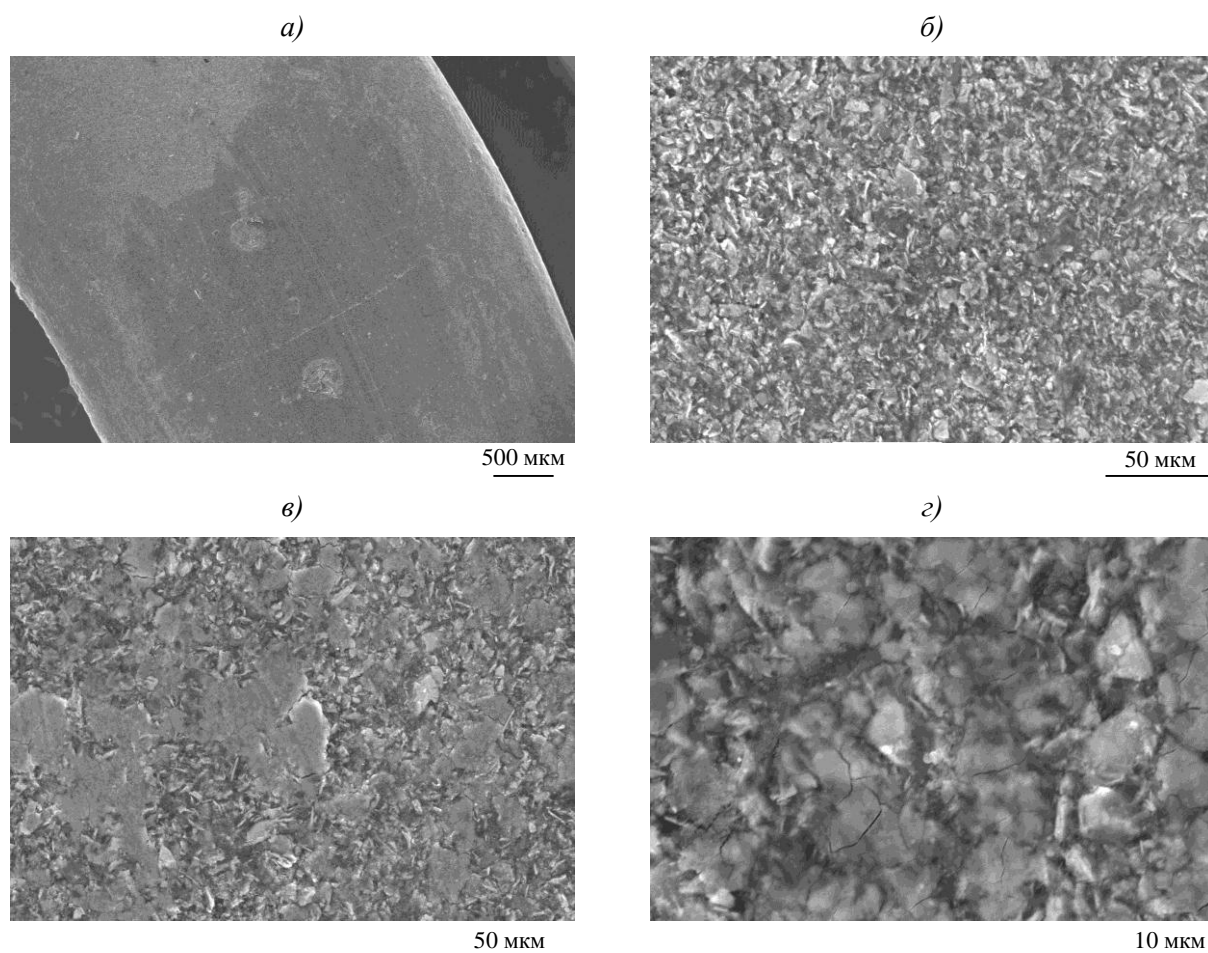


Рисунок 1. Поверхность контртела после испытаний на износ на машине И-47

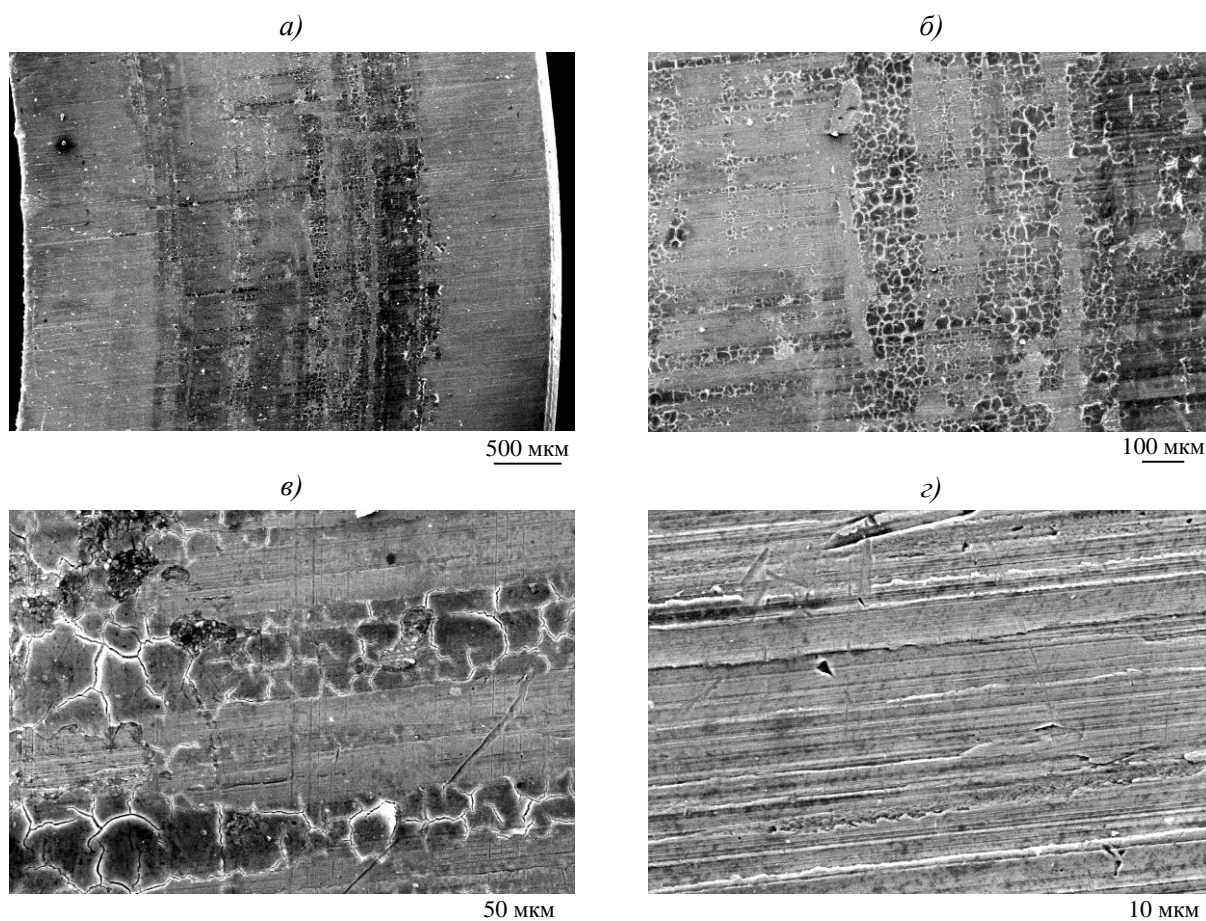


Рисунок 2. Поверхность покрытия системы Ni–В, пропитанного суспензией ВАП-5, после испытания на износ на машине И-47

Результаты исследования позволяют утверждать, что при «тяжелых» режимах трения происходит химическое взаимодействие материалов контртела и покрытий с внешней средой, вследствие этого на контактной поверхности сопряжений образуются сульфиды и оксиды металлов, свойства которых определяют смазочную способность покрытия.

Обсуждение и заключения

Определены трибологические свойства покрытия системы Ni–В, пропитанного суспензией ВАП-5: коэффициент трения от 0,1 до 0,2, износостойкость $5 \cdot 10^{-9}$ (отн. ед.), фреттингостойкость до 1 ч.

Покрытие работоспособно на воздухе в интервале температур от -80 до $+250^{\circ}\text{C}$ и при удельных нагрузках до 50 МПа.

Покрытие системы Ni–В, пропитанное суспензией ВАП-5, рекомендуется взамен стандартного хромового покрытия для деталей в парах «трение–скольжение» (подшипники скольжения, ползуны, направляющие и т. д.), изготовленных из сталей для изде-

лий авиационной техники (двигатели, планер и агрегаты), судостроения, машиностроения и товаров народного потребления.

Использование покрытия системы Ni–В, пропитанного суспензией ВАП-5, позволит повысить ресурс деталей трения и агрегатов до ресурса эксплуатации изделия и уменьшить затраты на нейтрализацию токсических веществ из отработанных растворов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка). Учебник. 2-е изд., переработ. и доп. М.: Машиностроение. 2001. 664 с.
3. Триботехника (износ и безызносность): Учебник /Под ред. Д.Н. Гаркунова. 4-е изд., переработ. и доп. М.: Изд-во МСХА. 2001. 616 с.
4. Трибология. Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ /Под ред. А.В. Белого, К. Лудемы, Н.К. Мышкина. М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон Пресс. 1993. 454 с.
5. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада //Авиационные материалы и технологии. 2013. №51. С. 3–9.
6. Ерасов В.С., Котова Е.А. Эрозионная стойкость авиационных материалов к воздействию твердых (пылевых) частиц //Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 30–36.
7. Гура Г.С. Качение тел с трением. Фреттинг. Сочи: ООО «Полиграфический центр „Дория”». 2009. 295 с.
8. Уотерхауз Р.Б. Фреттинг-коррозия. Л.: Машиностроение. 1976. 272 с.
9. Елагина О.Ю. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. Учеб. пособие. М.: Логос. 2009. 488 с.
10. Гаркунов Д.Н. Повышение износостойкости деталей самолетов. М.: Оборонгиз. 1960. 142 с.
11. Тоньшева О.А., Вознесенская Н.М., Шалькевич А.Б., Петраков А.Ф. Исследование влияния высокотемпературной термомеханической обработки на структуру, технологические, механические и коррозионные свойства высокопрочной коррозионностойкой стали переходного класса с повышенным содержанием азота

- //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 31–36.
12. Тонышева О.А., Вознесенская Н.М., Елисеев Э.А., Шалькевич А.Б. Новая высокопрочная экономнолегированная азотсодержащая сталь повышенной надежности //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 84–88.
 13. Громов В.И., Курпякова Н.А., Седов О.В., Коробова Е.Н. Вакуумная и ионно-плазменная химико-термическая обработка ответственных деталей газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 147–156.
 14. Овсепян С.В., Лукина Е.А., Филонова Е.В., Мазалов И.С. Формирование упрочняющей фазы в процессе высокотемпературного азотирования свариваемого жаропрочного деформируемого сплава на основе системы Ni–Co–Cr //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 3–8.
 15. Рябов Д.К., Колобнев Н.И., Самохвалов С.В., Махсидов В.В. Влияние предварительного естественного старения на свойства сплава 1913 в искусственно состаренном состоянии //Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 8–11.
 16. Азаровский Е.Н., Мубояджян С.А. Модифицирование поверхности деталей из конструкционных сталей в вакуумно-дуговой плазме титана //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 20–25.
 17. Рябов Д.К., Колобнев Н.И. Изменение механических свойств сплава 1913 при двухступенчатом искусственном старении //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 3–7.
 18. Солнцев Ст.С. Эрозионностойкие влагозащитные терморегулирующие покрытия многоразовой теплозащиты орбитального корабля «Буран» //Авиационные материалы и технологии. 2013. №51. С. 94–124.
 19. Иванов Е.В. Создание износостойких и антифрикционных материалов и покрытий для космического корабля «Буран» //Авиационные материалы и технологии. 2013. №51. С. 142–151.
 20. Азаровский Е.Н., Мубояджян С.А. Модифицирование поверхности деталей из конструкционных сталей в вакуумно-дуговой плазме титана. Часть II //Авиационные материалы и технологии. 2014. №1. С. 3–11.
 21. Разуваев Е.И., Капитаненко Д.В. Влияние термомеханической обработки на структуру и свойства аустенитных сталей //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 01 (viam-works.ru).
 22. Розененкова В.А., Солнцев Ст.С., Миронова Н.А. Тонкопленочные покрытия для уплотнительных истираемых материалов на основе дискретных волокон для про-

- точного тракта ГТД //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 04 (viam-works.ru).
23. Маркова Е.С., Якушева Н.А., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б. Технологические особенности производства мартенситостареющей стали ВКС-180 //Труды ВИАМ. 2013. №7. Ст. 01 (viam-works.ru).
 24. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения //Крылья Родины. 2012. №3–4. С. 34–38.
 25. Бакрадзе М.М., Овсепян С.В., Шугаев С.А., Летников М.Н. Влияние режимов закалки на структуру и свойства штамповок дисков из жаропрочного никелевого сплава ЭК151-ИД //Труды ВИАМ. 2013. №9. Ст. 01 (viam-works.ru).
 26. Балдаев Л.Х. Реновация и упрочнение деталей машин методами газотермического напыления. М.: Изд-во КХТ. 2004. 134 с.
 27. Петров Г.Л., Буров Н.Г. Технология и оборудование газопламенной обработки металлов. М.: Машиностроение. 1969. 288 с.
 28. Мазалов И.С., Филонова Е.В., Ломберг Б.С. Формирование структуры при деформации и термической обработке заготовок деталей из никелевого высокопрочного свариваемого сплава ВЖ172 //Труды ВИАМ. 2013. №12. Ст. 01 (viam-works.ru).
 29. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Ионное травление и модифицирование поверхности ответственных деталей машин в вакуумно-дуговой плазме //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 149–163.
 30. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения //Деформация и разрушение материалов. 2011. №1. С. 34–40.
 31. Богорад Л.Я. Хромирование. Л.: Машиностроение. 1984. 97 с.
 32. Солодкова Л.Н., Кудрявцев В.Н. Электролитическое хромирование. М.: Глобус. 2007. 191 с.
 33. Беляев П.П., Зильберфарб М.И., Гаретовская М.П. Металлические покрытия в химическом машиностроении. Сб. II. М.: Машгиз. 1951. 144 с.
 34. Борисов В.С., Каспарова Е.В. Химическое никелирование. Сб. 2. М.: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского. 1958.
 35. Вишенков С.А., Каспарова Е.В. Повышение износостойкости и защита от коррозии деталей из черных и цветных металлов химическим никелированием //Бюллетень обмена производственно-техническим опытом. 1958. №6. 208 с.

36. Горбунова К.М., Никифорова А.А. Физико-химические основы процесса химического никелирования. М.: АН СССР. 1960. 448 с.
37. Рябченков А.В., Велемицина В.И. Химическое никелирование как средство защиты перлитных сталей от высокотемпературной газовой коррозии. Внутренние напряжения никель-фосфорных покрытий и их влияние на усталостную прочность стали /Груды ЦНИИТМАШ. 1961. №22. 37 с.
38. Вишенков С.А., Каспарова Е.В. Повышение надежности и долговечности деталей машин химическим никелированием. М.: Машгиз. 1963. 208 с.
39. Вансовская К.М. Металлические покрытия, нанесенные химическим способом. Л.: Машиностроение. 1985. 103 с.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and processing technologies for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
2. Chichinadze A.V., Braun Je.D., Bushe N.A. i dr. Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka) [Fundamentals of Tribology (friction, wear, lubrication)]. 2-e izd., pererabot. i dop. M.: Mashinostroenie. 2001. 664 s.
3. Tribotekhnika (iznos i bezyznosnost') [Tribotechnics (wear and bezyznosnogo)]: Uchebnik /Pod red. D.N. Garkunova. 4-e izd., pererabot. i dop. M.: Izd-vo MSHA. 2001. 616 s.
4. Tribologija. Issledovanija i prilozhenija: opyt SShA i stran SNG [Tribology. Research and applications: the US experience and CIS] /Pod red. A.V. Belogo, K. Ludemy, N.K. Myshkina. M.: Mashinostroenie; N'ju-Jork: Allerton Press. 1993. 454 s.
5. Kablov E.N. Materialy dlja izdelija «Buran» – innovacionnye reshenija formirovanija shestogo tehnologicheskogo uklada [Materials for the product «Buran» – innovative solutions forming the sixth technological order] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S1. S. 3–9.
6. Erasov V.S., Kotova E.A. Jerozionnaja stojkost' aviacionnyh materialov k vozdeystviyu tverdyh (pylevykh) chastic [Erosion resistance to the effects of aircraft materials solid (dust) particles] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №3. S. 30–36.
7. Gura G.S. Kachenie tel s treniem. Fretting [Rolling bodies with friction. Fretting]. Sochi: OOO «Poligraficheskij centr „Dorija”». 2009. 295 s.
8. Uoterhauz R.B. Fretting-korrozija [Fretting corrosion]. L.: Mashinostroenie. 1976. 272 s.

9. Elagina O.Ju. Tehnologicheskie metody povyshenija iznosostojkosti detalej mashin [Technological methods to improve the wear resistance of machine parts]: Ucheb. posobie. M.: Logos. 2009. 488 s.
10. Garkunov D.N. Povysenie iznosostojkosti detalej samoletov [Wear resistance aircraft parts]. M.: Oborongiz. 1960. 142 s.
11. Tonysheva O.A., Voznesenskaja N.M., Shal'kevich A.B., Petrakov A.F. Issledovanie vlijanija vysokotemperaturnoj termomechanicheskoj obrabotki na strukturu, tehnologicheskie, mehanicheskie i korrozionnye svojstva vysokoprochnoj korrozionnostojkoj stali perehodnogo klassa s povyshennym sodержaniem azota [Investigation of the effect of high-temperature thermomechanical treatment on the structure, process, mechanical and corrosion properties of high-strength stainless steel transition class with a high content of nitrogen] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №3. S. 31–36.
12. Tonysheva O.A., Voznesenskaja N.M., Eliseev Je.A., Shal'kevich A.B. Novaja vysokoprochnaja jekonomnolegirovannaja azotsoderzhashhaja stal' povyshennoj nadezhnosti [New high sparingly nitrogen-containing steel of high reliability] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 84–88.
13. Gromov V.I., Kurpjakova N.A., Sedov O.V., Korobova E.N. Vakuumnaja i ionno-plazmennaja himiko-termicheskaja obrabotka otvetstvennyh detalej gazoturbinnnyh dvigatelej [Vacuum and ion-plasma chemical-thermal processing of critical parts of gas turbine engines] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 147–156.
14. Ovsepjan S.V., Lukina E.A., Filonova E.V., Mazalov I.S. Formirovanie uprochnjajushhej fazy v processe vysokotemperaturnogo azotirovanija svarivaemogo zharoprochnogo deformiruemogo splava na osnove sistemy Ni–Co–Cr [Formation of the reinforcing phase in the high-temperature nitriding process weldable superalloy based wrought alloy of Ni–Co–Cr] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №1. S. 3–8.
15. Rjabov D.K., Kolobnev N.I., Samohvalov S.V., Mahsidov V.V. Vlijanie predvaritel'nogo estestvennogo starenija na svojstva splava 1913 v iskusstvenno sostarennom sostojanii [Effect of prior natural aging on the properties of the alloy 1913 in the artificially aged condition] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №2. S. 8–11.
16. Azarovskij E.N., Mubojadzhan S.A. Modificirovanie poverhnosti detalej iz konstrukcionnyh stalej v vakuumno-dugovoj plazme titana [Surface modification of parts made of structural steel in the vacuum arc plasma titanium] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №3. S. 20–25.

17. Rjabov D.K., Kolobnev N.I. Izmenenie mehanicheskikh svojstv splava 1913 pri dvuhstupenchatom iskusstvennom starenii [Changes in mechanical properties of the alloy 1913 in the two-stage artificial aging] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №4. S. 3–7.
18. Solncev St.S. Jerozionnostojkie vlagozashhitnye termoregulirujushhie pokrytija mnogo-razovoj teplozashhity orbital'nogo korablja «Buran» [Erosion-resistant waterproof thermal control coating reusable thermal protection orbiter «Buran»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S1. S. 94–124.
19. Ivanov E.V. Sozdanie iznosostojkikh i antifrikcionnyh materialov i pokrytij dlja kosmicheskogo korablja «Buran» [Creating a wear-resistant and anti-friction materials and coatings for spacecraft «Buran»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S1. S. 142–151.
20. Azarovskij E.N., Mubojadzhjan S.A. Modificirovanie poverhnosti detalej iz konstrukcionnyh stalej v vakuumno-dugovoj plazme titana. Chast' II [Surface modification of parts made of structural steel in the vacuum arc plasma titanium. Part II] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №1. S. 3–11.
21. Razuvaev E.I., Kapitanenko D.V. Vlijanie termomehanicheskoj obrabotki na strukturu i svojstva austenitnyh stalej [Effect of thermomechanical treatment on the structure and properties of austenitic steels] //Trudy VIAM. 2013. №5. St. 01 (viam-works.ru).
22. Rozenenkova V.A., Solncev St.S., Mironova N.A. Tonkoplennochnye pokrytija dlja uplotnitel'nyh istiraemyh materialov na osnove diskretnyh volokon dlja protochnogo trakta GTD [Thin film coatings for sealing abrasive materials on the basis of discrete fibers to the flow path GTE] //Trudy VIAM. 2013. №5. St. 04 (viam-works.ru).
23. Markova E.S., Jakusheva N.A., Pokrovskaja N.G., Shal'kevich A.B. Tehnologicheskie oso-bennosti proizvodstva martensitostarejushhej stali VKS-180 [Technological features of steel production martensitostareyushey VKS-180] //Trudy VIAM. 2013. №7. St. 01 (viam-works.ru).
24. Kablov E.N., Lomberg B.S., Ospennikova O.G. Sozdanie sovremennyh zharoprochnyh materialov i tehnologij ih proizvodstva dlja aviacionnogo dvigatelestroenija [The creation of modern high-temperature materials and production technologies for aviation engine] //Kryl'ja Rodiny. 2012. №3–4. S. 34–38.
25. Bakradze M.M., Ovsepjan S.V., Shugaev S.A., Letnikov M.N. Vlijanie rezhimov zakalki na strukturu i svojstva shtampovok diskov iz zharoprochnogo nikel'evogo splava JeK151-ID [Effect of tempering on the structure and properties of the disk forgings of

- heat-resistant nickel alloy EK151-ID] //Trudy VIAM. 2013. №9. St. 01 (viam-works.ru).
26. Baldaev L.H. Renovacija i uprochnenie detalej mashin metodami gazotermicheskogo napylenija [Renovation and strengthening of machine parts methods of thermal spraying]. M.: Izd-vo KHT. 2004. 134 s.
 27. Petrov G.L., Burov N.G. Tehnologija i oborudovanie gazoplammennoj obrabotki metallov [Technology and equipment flame treatment of metals]. M.: Mashinostroenie. 1969. 288 s.
 28. Mazalov I.S., Filonova E.V., Lomberg B.S. Formirovanie struktury pri deformacii i termicheskoj obrabotke zagotovok detalej iz nikelovogo vysokoprochnogo svari-vaemogo splava VZh172 [Structure formation during the deformation and heat treatment blanks welded high-strength nickel alloy VZH172] //Trudy VIAM. 2013. №12. St. 01 (viam-works.ru).
 29. Kablov E.N., Mubojadzhan S.A. Ionnoe travlenie i modifizirovanie poverhnosti otvetstvennyh detalej mashin v vakuumno-dugovoj plazme [Ion etching and surface modification of critical parts in machines vacuum arc plasma] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 149–163.
 30. Kablov E.N., Starcev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Klimaticheskoe starenie kompozicionnyh materialov aviacionnogo naznachenija. III. Znachimye faktory starenija [Climatic aging of composite materials aviation applications. III. Significant factors of aging] //Deformacija i razrushenie materialov. 2011. №1. S. 34–40.
 31. Bogorad L.Ja. Hromirovanie [Chromium-plating]. L.: Mashinostroenie. 1984. 97 s.
 32. Solodkova L.N., Kudrjavcev V.N. Jeletroliticheskoe hromirovanie [Electrolytic chrome]. M.: Globus. 2007. 191 s.
 33. Beljaev P.P., Zil'berfarb M.I., Garetovskaja M.P. Metallicheskie pokrytija v himicheskom mashinostroenii [Metal coatings in chemical engineering]. Sb. II. M.: Mashgiz. 1951. 144 s.
 34. Borisov V.S., Kasparova E.V. Himicheskoe nikelirovanie [Chemical nickel plating]. Sb. 2. M.: MDNTP im. F.Je. Dzerzhinskogo. 1958.
 35. Vishenkov S.A., Kasparova E.V. Povyshenie iznosostojkosti i zashhita ot korrozii detalej iz chernyh i cvetnyh metallov himicheskim nikelirovaniem [Wear resistance and corrosion protection of ferrous and non-ferrous metal chemical nickel plating] //Bjulleten' obmena proizvodstvenno-tehnicheskim opytom. 1958. №6. 208 s.

36. Gorbunova K.M., Nikiforova A.A. Fiziko-himicheskie osnovy processa himicheskogo nikelirovanija [Physico-chemical foundations of electroless nickel plating]. M.: AN SSSR. 1960. 448 s.
37. Rjabchenkov A.V., Velemicina V.I. Himicheskoe nikelirovanie kak sredstvo zashhity per-litnyh stalej ot vysokotemperaturnoj gazovoj korrozii. Vnutrennie naprjazhenija nikel'-fosfornyh pokrytij i ih vlijanie na ustalostnuju prochnost' stali [Chemical nickel plating as a means of protection pearlite steels from high-temperature gas corrosion. Internal voltage nickel-phosphorus coatings and their influence on the fatigue strength of steel] /Trudy CNIITMASH. 1961. №22. 37 s.
38. Vishenkov S.A., Kasparova E.V. Povyshenie nadezhnosti i dolgovechnosti detalej mashin himicheskim nikelirovaniem [Improving the reliability and durability of machine parts electroless nickel plating]. M.: Mashgiz. 1963. 208 s.
39. Vansovskaja K.M. Metallicheskie pokrytija, nanesennye himicheskim sposobom [Metal coatings deposited by chemical means]. L.: Mashinostroenie. 1985. 103 s.