



УДК 629.7.023

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-7-7

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
ХИМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ Ni–В**

С.С. Виноградов

А.А. Никифоров

С.В. Балахонов

кандидат технических наук

К.А. Лещев

Декабрь 2014

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: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-7-7

С.С. Виноградов¹, А.А. Никифоров¹, С.В. Балахонов¹, К.А. Лецев¹

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ХИМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ Ni–В

Исследованы микроструктура и фазовый состав химического покрытия системы Ni–В. Показано, что при нагревании покрытия аморфный осадок переходит в кристаллическое состояние, исчезает слоисто-столбчатая структура, микротвердость возрастает и достигает максимальных значений микротвердости хромового твердого покрытия, пористость при температуре 300°C незначительно уменьшается, а при температурах 350 и 400°C – незначительно увеличивается.

Ключевые слова: химическое покрытие системы Ni–В, микроструктура, фазовый состав, микротвердость, пористость.

S.S. Vinogradov, A.A. Nikiforov, S.V. Balakhonov, K.A. Leshchev

NI–B CHEMICAL COATING'S STRUCTURE AND PROPERTIES INVESTIGATION

The microstructure and the phase composition of Ni–B chemical coating have been investigated. The amorphous precipitate is shown to be crystallized during heating, and the layered-columnar structure disappears; microhardness increases and reaches the maximum value of chrome coating's microhardness. The porosity slightly decreases at 300°C, and thereafter slightly increases at 350–400°C.

Keywords: Ni–B chemical coating, microstructure, phase composition, microhardness, porosity.

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

Качество машин и приборов, их надежность и долговечность во многом зависят от их способности противостоять воздействию коррозионно-активных сред, механических нагрузок и других факторов (напряжений, вибраций, температур эксплуатации) [1]. Решение проблемы надежности и долговечности машин и механизмов, экономного расходования материалов, энергии и трудовых ресурсов неразрывно связано с обеспечением эффективной защиты поверхностей деталей и конструкций от коррозии и изнашивания. По мере развития и совершенствования техники постоянно растут требования к условиям их эксплуатации (повышение скоростей, температуры, нагрузок, агрессивности среды, уменьшение массы и др.). Технологическое улучшение свойств поверхности материала расширяет перспективы проектирования и производства различного оборудования с более высоким уровнем эксплуатационных показателей. Механическая прочность детали гарантируется благодаря применению определенного материала, а специальные свойства поверхности обеспечиваются сплошным или локальным формированием на ней покрытий, обладающих высоким уровнем требуемых свойств – коррозионной стойкости, износостойкости, твердости, жаростойкости [2].

Повышение износостойкости и усталостной прочности деталей основано на воздействии на рабочую поверхность деталей и элементы кристаллической решетки металла путем применения различных видов обработки: механическое упрочнение или наклеп (вибровыглаживание, дробеструйная и гидроструйная обработка, дорнование, обкатывание, электромеханическое упрочнение, электроискровая обработка); слесарно-механическая (шабрение, шлифование, полирование, хонингование), термическая (отжиг, закалка, отпуск и дисперсионное твердение или старение) и химико-термическая обработка (азотирование, фосфатирование, анодирование, цианирование, сульфидирование, борирование, цементация, нанесение гальванических покрытий) [3–25].

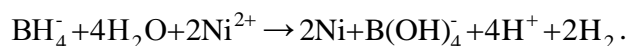
Для повышения твердости и износостойкости деталей (например, штоков, цилиндров, поршней, валиков, золотников и др.) из различных конструкционных материалов в промышленности широко применяется электролитическое хромирование. Хромовое покрытие позволяет увеличить сопротивление деталей механическому износу в 5–10 раз [26, 27]. Актуальность проблемы и перспективность разработки способов замены хромовых покрытий обусловлены требованиями директивы Евросоюза (RoHS), ограничивающей использование токсичных канцерогенных соединений шестивалентного хрома. Кроме того, электрохимический способ нанесения покрытий имеет ряд существенных недостатков, сужающих область его применения, таких как неравномерность

распределения покрытия по поверхности деталей сложного профиля, трудности при нанесении покрытия на узлы, элементы которых изготовлены из различных материалов (металлов и неметаллов). Химический способ нанесения покрытий лишен указанных недостатков.

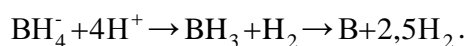
Применение нанесенных химическим способом покрытий систем Ni-P и Ni-B может быть одним из способов замены соединений шестивалентного хрома в гальваническом производстве. Химические никелевые покрытия по своим служебным характеристикам приближаются к хромовым. Особенностью химических покрытий является их равномерность по толщине на деталях сложной конфигурации, в том числе на деталях с узкими зазорами и глухими отверстиями. Химически осажденный никель обладает более высокой твердостью, износостойкостью и высокими защитными свойствами вследствие меньшей пористости, чем электрохимически осажденный никель [28–34].

Механизм процесса химического никелирования сложен. Согласно последним исследованиям механизм реакций при осаждении химического покрытия системы Ni-B носит стадийный характер [34].

Первой стадией процесса является реакция взаимодействия восстановителя (боргидрида) с водой, в результате которой восстановитель окисляется с образованием электрона и атома водорода. При наличии в растворе ионов никеля электроны восстанавливают их до металла. Суммарную реакцию восстановления ионов никеля можно представить в виде следующего уравнения:



Одновременно с восстановлением никеля протекает реакция восстановления бора в результате каталитического распада восстановителя:



Целью работы является изучение структуры, микротвердости и пористости химического покрытия системы Ni-B.

Материалы и методы

Все исследования и испытания проводятся в соответствии с ГОСТ. За результат испытаний принимается среднее арифметическое из трех параллельных определений.

Покрытие системы Ni-B наносили на пластины из стали 30ХГСА из щелочного раствора, содержащего никель двуххлористый, гидроксид натрия, натрий боргидрид,

этилендиамин, тиомочевину и калий-натрий виннокислый. Температура раствора для получения покрытия составляет 85–90°C, плотность загрузки 1–2 дм²/л, pH раствора – не менее 13.

При исследовании рельефа поверхности и микроструктуры покрытий подготовку образцов проводили на оборудовании металлографического центра фирмы Струерс. Стальные образцы запрессовывали на установке Laborpress-3 в токопроводящую обойму. Для приготовления шлифов использовали шлифовально-полировальный станок RotoPol-21. Электронно-микроскопический анализ проводили с помощью растрового электронного микроскопа JSM-840 (фирмы Jeol, Япония) по режиму COMPO, контраст изображения в котором формируется отраженными электронами вследствие разницы средних атомных масс компонентов сплавов в исследуемых областях или фазах. На микроструктуре фазы на основе элементов с небольшой атомной массой (например, бор) выглядят в виде темных образований, а на основе элементов с большой атомной массой (например, никель) – в виде светлых частиц.

Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре PANalytical Empyrean с гониометром системы Альфа 1 с монохроматором Johanson. Радиус гониометра 240 мм, угловой диапазон: 360 град – без модулей и 111 град 2θ <math><168</math> град – в зависимости от модулей. Определив местоположение линий на рентгенограмме (ее угол θ) и зная длину волны излучения, по формуле Вульфа–Брегга можно определить значения межплоскостных расстояний: $d_{HKL} = \lambda / (2 \sin \theta)$. Сравнивая полученный набор межплоскостных расстояний (d_{HKL}) исследуемого материала с табличными значениями для чистых веществ и их соединений, устанавливали фазу исследуемого материала.

Микротвердость определяли по ГОСТ 9450–76 путем вдавливания в поверхность образца четырехгранной алмазной пирамиды (с углом при вершине 136 град) при нагрузках 0,05–5 Н. Твердость по Виккерсу определяли в автоматическом режиме с помощью оборудования DuraScan фирмы Струерс (программное обеспечение ecos Workflow). Измерение микротвердости проводили на образцах – по 15 измерений на каждый образец.

Пористость химических покрытий определяли по ГОСТ 9.302 методом наложения фильтровальной бумаги.

Результаты, обсуждение и заключения

Покрyтия системы Ni–В в исходном состоянии обладают аморфной структурой или представляют собой неупорядоченный пересыщенный твердый раствор бора в гранецентрированной кубической решетке β -никеля [34].

В исходном состоянии наблюдается слоистость покрyтия. Природа слоистости объясняется изменением концентрации бора по толщине слоя осадка. При нагревании аморфный осадок переходит в кристаллическое состояние. В покрyтии системы Ni–В структурно-фазовые превращения при 300°C приводят к ослаблению, а при 550°C – к исчезновению слоисто-столбчатой структуры (рис. 1).

Качество поверхности и микроструктура химического никелевого покрyтия системы Ni–В исследовали на пластинах из высокопрочной стали 30ХГСН2А методом растровой электронной микроскопии с помощью микроскопа JSM-840 (фирмы Jeol, Япония) в режиме СОМРО (ВЕС) – на образцах, подготовленных на оборудовании металлографического центра фирмы Струерс.

Внешний вид поверхности и микроструктура покрyтий системы Ni–В толщиной 20 и 32 мкм при различном увеличении приведены на рис 2 и 3. Видно, что поверхность покрyтия имеет рельеф, на отдельных участках обнаружены поры и выкрашивания частиц покрyтия. Электронно-микроскопический анализ поверхности и структуры покрyтий системы Ni–В показал, что покрyтие имеет столбчатую и, начиная с толщины ~19 мкм, двухслойную структуру (см. рис. 3).

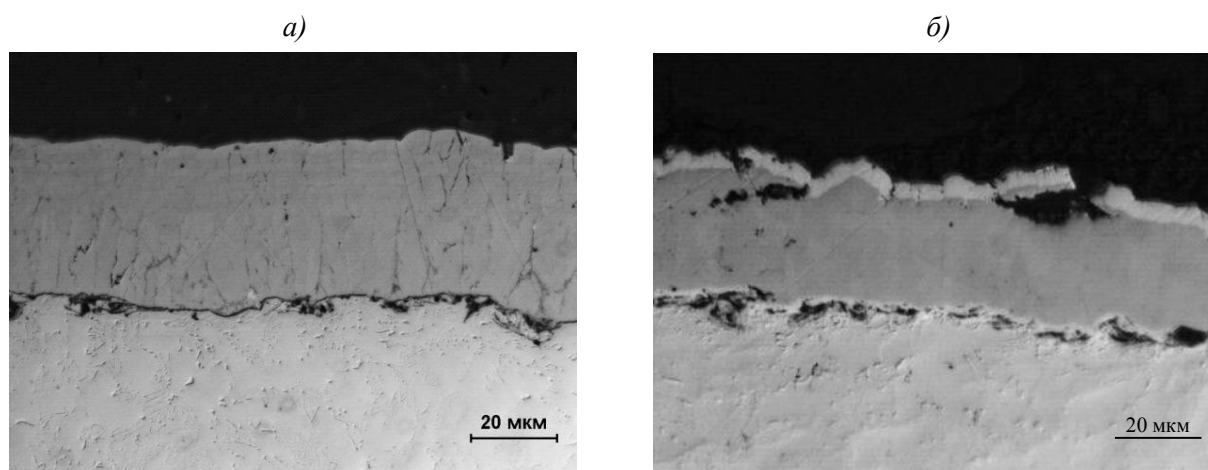
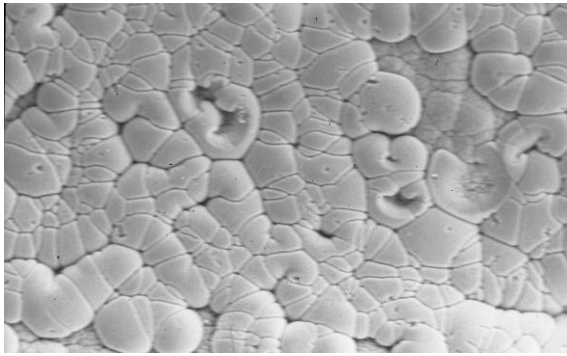
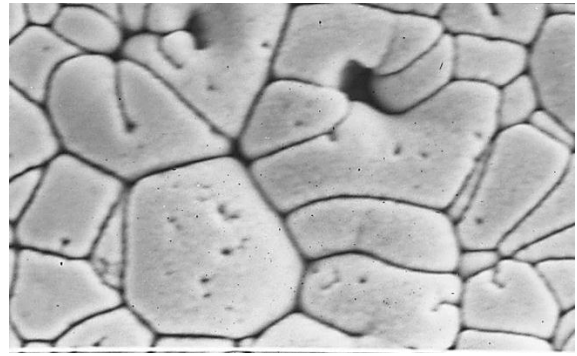


Рисунок 1. Поперечный шлиф покрyтия системы Ni–В толщиной 35 мкм после термообработки при 300 (а) и 600°C (б)

a)

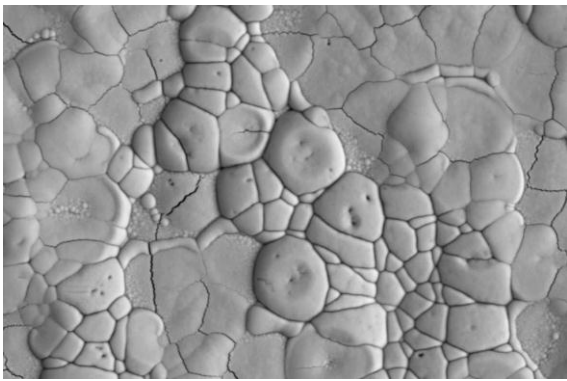


×1000

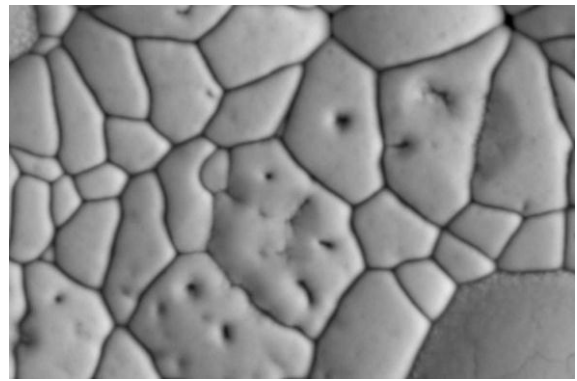


×3500

б)



×1500



×3500

Рисунок 2. Поверхность покрытия системы Ni–W толщиной 20 мкм без отжига (*a*) и после отжига при 300°C, 1 ч (*б*)

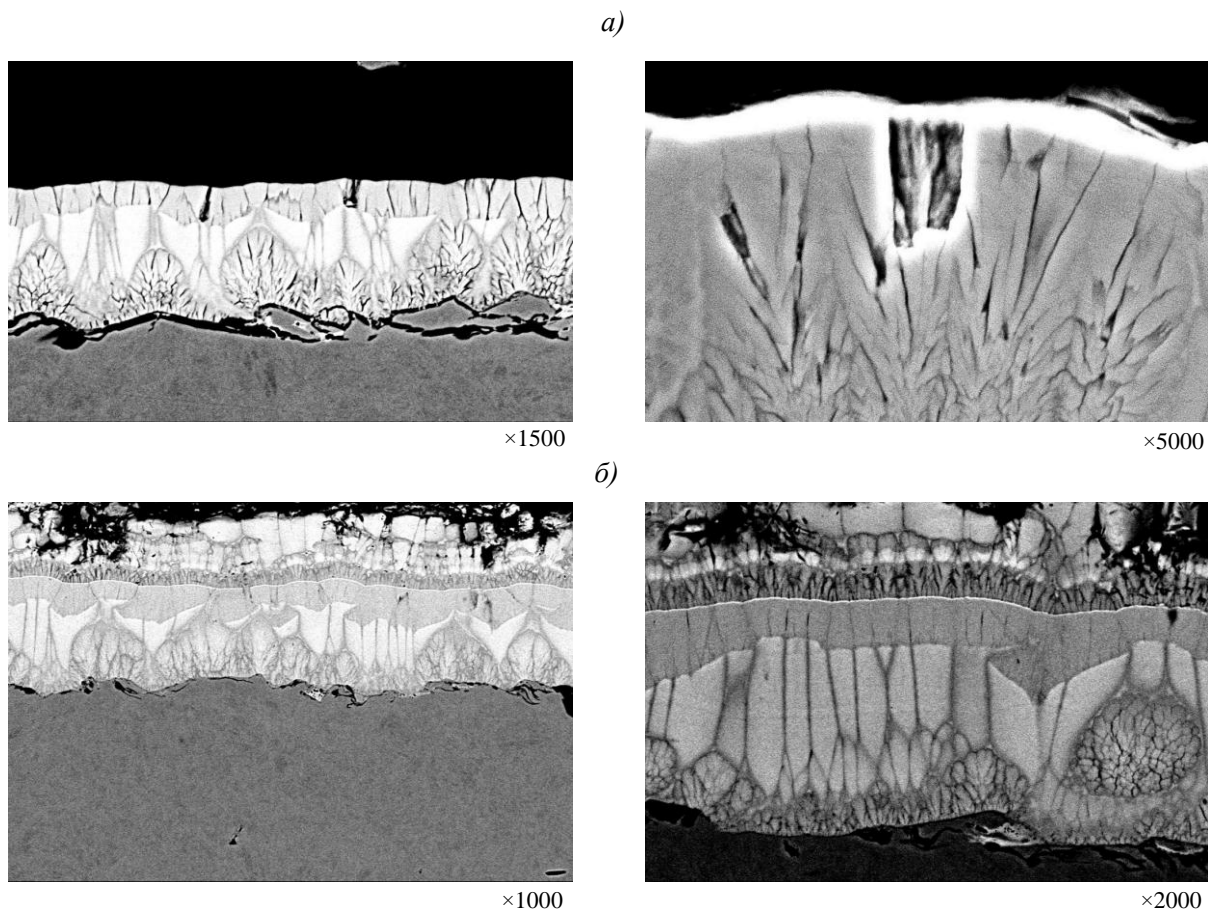


Рисунок 3. Поперечный шлиф покрытия системы Ni–В толщиной 20 (а) и 32 мкм (б) после отжига при 300°C, 1 ч

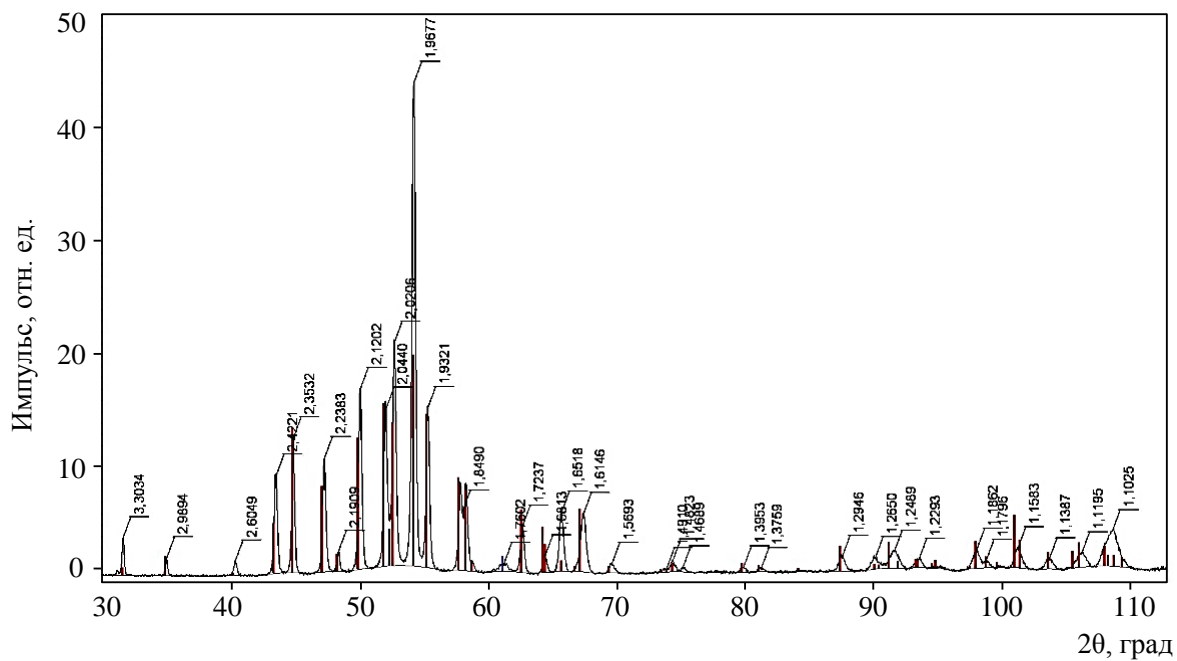


Рисунок 4. Рентгенограмма покрытия системы Ni–В после отжига при 300°C, 1 ч

Сквозные поры, доходящие до основного материала, не обнаружены – поры располагаются в верхнем слое покрытия и распространяются на глубину ~5 мкм. Покрытие имеет хорошее сцепление с основным материалом.

Методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре PANalytical Empyrean определен фазовый состав покрытия системы Ni–В. Рентгенограмма покрытия системы Ni–В после его отжига при температуре 300°C в течение 1 ч представлена на рис. 4. По результатам анализа межплоскостных расстояний d_{HKL} , рассчитанных по формуле Вульфа–Брегга, можно утверждать о наличии фаз никеля и борида никеля (Ni₃B) с кристаллической структурой в исследуемом покрытии.

Таким образом, подтверждено известное явление [1] перехода (при нагреве) аморфного осадка в кристаллическое состояние. Происходит необратимый процесс распада пересыщенного метастабильного твердого раствора бора в никеле с выделением фазы Ni₃B. По мере повышения температуры и продолжительности нагрева частицы химического соединения Ni₃B коагулируют и становятся более различимыми.

Одной из важнейших эксплуатационных характеристик покрытий является их твердость. Как известно, микротвердость осажденного из горячих электролитов электрохимического никелевого покрытия составляет 140–160 HV₂₅, а из холодных электролитов равна 300–500 HV₂₅ [35], микротвердость хромового твердого покрытия составляет 735–1078 HV₂₅ [36]. Определена микротвердость химического покрытия системы Ni–В при различных технологических режимах термической обработки.

Установлено, что при температурах термообработки 400 и 500°C в течение 1 ч при толщине 15 мкм микротвердость покрытия Ni–В составляет 980 и 1145 HV₂₅ соответственно, что находится на уровне максимальных значений для хромового твердого покрытия. Характер изменения микротвердости покрытия системы Ni–В в зависимости от температуры термообработки в течение 1 ч представлен на рис. 5.

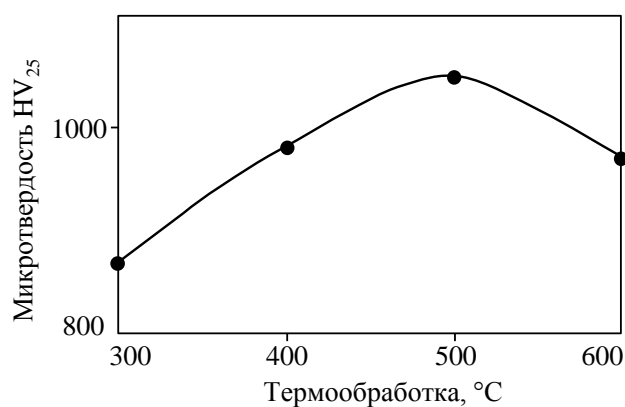


Рисунок 5. Зависимость микротвердости покрытия системы Ni–В от температуры термообработки в течение 1 ч

Значения микротвердости покрытия системы Ni–В в зависимости от способа обработки поверхности стали 30ХГСА перед нанесением покрытия, толщины и режима термической обработки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Микротвердость покрытия системы Ni–В, нанесенного на поверхность стали 30ХГСА

Обработка стали	Толщина покрытия, мкм	Термообработка (ТО) стали	Микротвердость покрытия	
			по Виккерсу HV ₂₅ *	МПа
Шлифование+пескоструйная обработка	15	Без ТО	732	7181
		300°С, 1 ч	870	8526
		350°С, 1 ч	876	8584
		400°С, 1 ч	980	9604
		500°С, 1 ч	1145	11221
		600°С, 1 ч	970	9506
	25	Без ТО	738	7240
		300°С, 1 ч	910	8918

* Среднее значение 10 измерений.

Из полученных данных видно, что микротвердость химического покрытия системы Ni–В после термообработки при температурах 400 и 500°С в течение 1 ч достигает максимальных значений микротвердости, характерных для хромового твердого покрытия. Дальнейшее повышение температуры термообработки снижает микротвердость покрытия.

Никелевое покрытие, нанесенное электрохимическим или химическим способом, по отношению к деталям из углеродистых низколегированных сталей является катодным. Поэтому такие покрытия предназначены не для защиты стальных деталей от атмосферной коррозии, а для придания им других функциональных свойств, таких как износостойкость и антифрикционность.

Увеличение износостойкости и снижение коэффициента трения покрытий достигается дополнительной обработкой смазочными композициями, для длительного сохранения которых между трущимися поверхностями стремятся повысить пористость износостойкого покрытия. Поэтому измерена пористость химического покрытия системы Ni–В на стали 30ХГСА (в зависимости от подготовки стальной основы, толщины химического покрытия Ni–В и режима его термической обработки).

Влияние способа обработки поверхности стальной основы, толщины химического покрытия системы Ni–В и режима его термической обработки на пористость покрытия представлено в табл. 2.

Таблица 2

Пористость покрытия системы Ni–В, нанесенного на поверхность стали 30ХГСА

Обработка стали	Толщина покрытия, мкм	Термообработка (ТО) стали	Пористость покрытия, количество сквозных пор/см ²
Шлифование	15	Без ТО 300°С, 1 ч	1,47 1,07
	25	Без ТО 300°С, 1 ч	0,12 0,12
Шлифование+пескоструйная обработка	15	Без ТО 300°С, 1 ч	0,41 0,43
		350°С, 1 ч	2,2
		400°С, 1 ч	2,8
	25	Без ТО 300°С, 1 ч	0,06 0,1

Полученные данные свидетельствуют о незначительной пористости покрытия системы Ni–В, нанесенного на поверхность стали 30ХГСА после шлифования и пескоструйной обработки, которая уменьшается с увеличением толщины покрытия.

Проведение термической обработки при 300°С в течение 1 ч незначительно уменьшает пористость покрытия системы Ni–В, а термообработка при температурах 350 и 400°С в течение 1 ч приводит к незначительному увеличению пористости покрытия системы Ni–В, нанесенного на поверхность стали после пескоструйной обработки.

Покрытия толщиной 40–80 мкм практически беспористые.

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. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада //Авиационные материалы и технологии. 2013. №51. С. 3–9.
3. Елагина О.Ю. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин: Учеб. пособие. М.: Логос. 2009. 488 с.
4. Гаркунов Д.Н. Повышение износостойкости деталей самолетов. М.: Оборонгиз. 1960. 142 с.
5. 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.
6. Тоньшева 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Рябов Д.К., Колобнев Н.И. Изменение механических свойств сплава 1913 при двухступенчатом искусственном старении //Авиационные материалы и техноло-

- гии. 2013. №4. С. 3–7.
12. Солнцев Ст.С. Эрозионностойкие влагозащитные терморегулирующие покрытия многоразовой теплозащиты орбитального корабля «Буран» //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 94–124.
 13. Иванов Е.В. Создание износостойких и антифрикционных материалов и покрытий для космического корабля «Буран» //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 142–151.
 14. 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.
 15. Разуваев Е.И., Капитаненко Д.В. Влияние термомеханической обработки на структуру и свойства аустенитных сталей //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 01 (viam-works.ru).
 16. Розененкова В.А., Солнцев Ст.С., Миронова Н.А. Тонкопленочные покрытия для уплотнительных истираемых материалов на основе дискретных волокон для прочного тракта ГТД //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 04 (viam-works.ru).
 17. 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).
 18. 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.
 19. 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).
 20. Балдаев Л.Х. Реновация и упрочнение деталей машин методами газотермического напыления. М.: Изд-во КХТ. 2004. 134 с.
 21. Петров Г.Л., Буров Н.Г. Технология и оборудование газопламенной обработки металлов. М.: Машиностроение. 1969. 288 с.
 22. 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).
 23. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Ионное травление и модифицирование поверхно-

- сти ответственных деталей машин в вакуумно-дуговой плазме //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 149–163.
24. Ерасов В.С., Котова Е.А. Эрозионная стойкость авиационных материалов к воздействию твердых (пылевых) частиц //Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 30–36.
25. 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.
26. Богорад Л.Я. Хромирование. Л.: Машиностроение. 1984. 97 с.
27. Солодкова Л.Н., Кудрявцев В.Н. Электролитическое хромирование. М.: Глобус. 2007. 191 с.
28. Беляев П.П., Зильберфарб М.И., Гаретовская М.П. Металлические покрытия в химическом машиностроении. Сб. II. М.: Машгиз. 1951. 144 с.
29. Борисов В.С., Каспарова Е.В. Химическое никелирование. Сб. 2. М.: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского. 1958.
30. 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.
31. Горбунова К.М., Никифорова А.А. Физико-химические основы процесса химического никелирования. М.: АН СССР. 1960. 448 с.
32. 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 /Труды ЦНИИТМАШ. 1961. №22. 37 с.
33. Вишенков С.А., Каспарова Е.В. Повышение надежности и долговечности деталей машин химическим никелированием. М.: Машгиз. 1963. 208 с.
34. Вансовская К.М. Металлические покрытия, нанесенные химическим способом. Л.: Машиностроение. 1985. 103 с.
35. Гальванические покрытия в машиностроении: Справочник в 2-х т. Т. 1. /Под ред. М.А. Шлугера. М.: Машиностроение. 1985. 248 с.
36. ГОСТ 9.303–84. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования к выбору.

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 technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
2. 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.
3. 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.
4. Garkunov D.N. Povysenie iznosostojkosti detalej samoletov [Wear resistance aircraft parts]. M.: Oborongiz. 1960. 142 s.
5. 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 korroziionnostojkoj 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.
6. Tonysheva O.A., Voznesenskaja N.M., Eliseev Je.A., Shal'kevich A.B. Novaja vysokoprochnaja jekonomnolegirovannaja azotsoderzhashhaja stal' povyshennoj nadezhnosti [New high springly nitrogen-containing steel of high reliability] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 84–88.
7. Gromov V.I., Kurpjakova N.A., Sedov O.V., Korobova E.N. Vakuumnaja i ionno-plazmennaja himiko-termicheskaja obrabotka otvetstvennyh detalej gazoturbinyh dvigatelej [Vacuum and ion-plasma chemical-thermal processing of critical parts of gas turbine engines] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 147–156.
8. 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.

9. 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.
10. Azarovskij E.N., Mubojadzhjan 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.
11. Rjabov D.K., Kolobnev N.I. Izmenenie mehanicheskikh svojstv splava 1913 pri dvuhstu-penchatom 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.
12. Solncev St.S. Jerozionnostojkie vlagozashhitnye termoregulirujushhie pokrytija mnogorazovoj 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.
13. Ivanov E.V. Sozdanie iznosostojkih 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.
14. Azarovskij E.N., Mubojadzhjan 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]. Chast' II //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №1. S. 3–11.
15. 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).
16. Rozenenkova V.A., Solncev St.S., Mironova N.A. Tonkoplenochnye pokrytija dlja uplot-nitel'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 GTD] //Trudy VIAM. 2013. №5. St. 04 (viam-works.ru).
17. Markova E.S., Jakusheva N.A., Pokrovskaja N.G., Shal'kevich A.B. Tehnologicheskie osobennosti proizvodstva martensitostarejushhej stali VKS-180 [Technological features

- of production martensite-aging steel VKS-180] //Trudy VIAM. 2013. №7. St. 01 (viam-works.ru).
18. 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.
 19. Bakradze M.M., Ovsepjan S.V., Shugaev S.A., Letnikov M.N. Vlijanie rezhimov zalki na strukturu i svojstva shtampovok diskov iz zharoprochnogo nikelvogo 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).
 20. 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.
 21. Petrov G.L., Burov N.G. Tehnologija i oborudovanie gazoplamenoj obrabotki metallov [Technology and equipment flame treatment of metals]. M.: Mashinostroenie. 1969. 288 s.
 22. Mazalov I.S., Filonova E.V., Lomberg B.S. Formirovanie struktury pri deformacii i termicheskoj obrabotke zagotovok detalej iz nikelvogo vysokoprochnogo svariyaemogo 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).
 23. 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.
 24. Erasov V.S., Kotova E.A. Jerozionnaja stojkost' aviacionnyh materialov k vozdejstvu tverdyh (pylevykh) chastic [Erosion resistance to the effects of aircraft materials solid (dust) particles] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №3. S. 30–36.
 25. Kablov E.N., Starcev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Klimaticeskoe 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.
 26. Bogorad L.Ja. Hromirovanie [Chromium-plating]. L.: Mashinostroenie. 1984. 97 s.

27. Solodkova L.N., Kudrjavcev V.N. Jeletroliticheskoe hromirovanie [Electrolytic chrome]. M.: Globus. 2007. 191 s.
28. Beljaev P.P., Zil'berfarb M.I., Garetovskaja M.P. Metallicheskie pokrytija v himicheskome mashinostroenii [Metal coatings in chemical engineering]. Sb. II. M.: Mashgiz. 1951. 144 s.
29. Borisov V.S., Kasparova E.V. Himicheskoe nikelirovanie [Chemical nickel plating]. Sb. 2. M.: MDNTP im. F.Je. Dzerzhinskogo. 1958.
30. Vishenkov S.A., Kasparova E.V. Povyszenie 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.
31. Gorbunova K.M., Nikiforova A.A. Fiziko-himicheskije osnovy processa himicheskogo nikelirovanija [Physico-chemical foundations of electroless nickel plating]. M.: AN SSSR. 1960. 448 s.
32. 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.
33. Vishenkov S.A., Kasparova E.V. Povyszenie nadezhnosti i dolgovechnosti detalej mashin himicheskim nikelirovaniem [Improving the reliability and durability of machine parts electroless nickel plating]. M.: Mashgiz. 1963. 208 s.
34. Vansovskaja K.M. Metallicheskie pokrytija, nanesennye himicheskim sposobom [Metal coatings deposited by chemical means]. L.: Mashinostroenie. 1985. 103 s.
35. Gal'vanicheskie pokrytija v mashinostroenii [Electroplating in mechanical engineering]: Spravochnik v 2-h t. T. 1. /Pod red. M.A. Shlugera. M.: Mashinostroenie. 1985. 248 s.
36. GOST 9.303–84. Pokrytija metallicheskie i nemetallicheskie neorganicheskie. Obshhie trebovanija k vyboru [Metallic and non-metallic mineral. General requirements for the selection].