



УДК 669.14.018.295:621.78

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-1-1

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ  
БЕРИЛЛИЙСОДЕРЖАЩЕЙ СТАЛИ ВНС-32-ВИ**

**А.И. Щербаков**

*кандидат технических наук*

**А.Н. Мосолов**

**В.А. Калицев**

*кандидат технических наук*

**Май 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.

*А.И. Щербаков<sup>1</sup>, А.Н. Мосолов<sup>1</sup>, В.А. Калицев<sup>1</sup>*

## **ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ БЕРИЛЛИЙСОДЕРЖАЩЕЙ СТАЛИ ВНС-32-ВИ**

*Исследованы металлургические особенности получения высокопрочной бериллийсодержащей стали ВНС-32-ВИ, включая выплавку в вакуумных индукционных печах, процессы ковки и прокатки, режимы термической обработки горячекатаных прутков диаметром 10–27 мм и кованных – до 50 мм, предназначенных для износостойких элементов систем топливорегулирующей аппаратуры. Оптимизированы термовременные параметры деформации и термической обработки прутков, обеспечивающие стабильность механических свойств и низкий уровень неметаллических включений. Определены способы снижения количества хрупкой фазы –  $\delta$ -феррита – в стали.*

**Ключевые слова:** *нержавеющая сталь, бериллийсодержащая, выплавка, раскисление, ковка, прокатка, отжиг, закалка, термическая обработка, модуль упругости, твердость, неметаллические включения, фаза,  $\delta$ -феррит.*

*A.I. Cherbakov<sup>1</sup>, A.N. Mosolov<sup>1</sup>, V.A. Kalicev<sup>1</sup>*

## **RECOVERY OF TECHNOLOGY FOR THE BERYLLIUM-CONTAINING STEEL VNS-32-VI OBTAINING**

*This paper studied metallurgic features of the high-strength beryllium-containing steel VNS-32-VI obtaining including smelting in the vacuum induction furnaces, forging and rolling processes, heat treatment modes of hot-rolled bars with diameter 10–27 mm and forged to 50 mm, intended for hardwearing elements of fuel control apparatus. There were optimized temperature-time parameters of deformation and thermal treatment of bars working. These parameters provided the stability of the mechanical properties and low level of non-metallic inclusions. There were identified the ways of  $\delta$ -ferrite embrittlement phase content decreasing in the steel.*

**Key words:** *stainless steel, beryllium-containing steel, smelting, deoxidation, forging, rolling, annealing, hardening, heat treatment, elastic modulus, hardness, non-metallic inclusions, phase,  $\delta$ -ferrite.*

<sup>1</sup> Федеральное 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

Создание современных авиационных материалов в настоящее время – первоочередная задача [1]. В конце 70-х годов XX столетия в ВИАМ разработан ряд бериллийсодержащих сталей, которые широко применяются для изготовления деталей трения для прецизионных приборов, полуфабрикатов, износостойких элементов для систем топливорегулирующей аппаратуры, газотурбинных двигателей, агрегатов и систем авиационной техники, высоконагруженных опор авиационных приборов, работающих во всеклиматических условиях [2]. Разработанные материалы обеспечивают высокие точность и надежность работы систем, длительный ресурс аппаратуры в условиях криогенных и повышенных температур, агрессивных рабочих сред и являются незаменимым конструкционным материалом для существующих и перспективных изделий авиационной и космической техники [3–5].

Стали отечественного производства не в полной мере отвечают требованиям, предъявляемым к деталям и узлам перспективных изделий авиационной и аэрокосмической техники, таким как: ресурсные показатели в агрессивной среде, точность и надежность работы систем топливорегулирующей аппаратуры и др. Как показывают исследования, введение в состав сталей бериллия существенно улучшает их свойства, в первую очередь износостойкость, коррозионную стойкость, модуль упругости и др. [6–8]. К таким сталям относится сталь 32Х13Н6К3М2БДЛТ-ВИ (ВНС-32-ВИ), технология изготовления полуфабрикатов из которой была утрачена.

Бериллий обладает ограниченной растворимостью в кобальте и железе и при нагреве выделяется в виде интерметаллидного соединения (NiBe в тонкодисперсной форме), повышает твердость, износостойкость, модуль упругости [9, 10] в результате дисперсионного твердения в сталях и сплавах и при этом обеспечивает размерную стабильность деталей и узлов в диапазоне температур от -196 до +450°С.

Однако с 90-х годов производство бериллийсодержащих сталей (ЭИ928, ЭП354 и ВНС-13 и др.) было прекращено, а потребность в выпуске сталей для износостойких элементов авиационных двигателей, систем топливорегулирующей аппаратуры, гидросистем авиационной и ракетной техники и других видов технических средств – не снизилась. Предпринятые попытки по замене бериллийсодержащих сталей другими материалами не увенчались успехом.

Цель настоящей работы – разработка технологий выплавки, деформации и термической обработки бериллийсодержащей высокопрочной стали ВНС-32-ВИ, позволяющих решить задачу создания новых образцов современной авиационной и аэрокосмической техники, а также изделий для машиностроительной отрасли.

### Методика проведения исследований

Разработку технологии выплавки стали ВНС-32-ВИ проводили в вакуумной индукционной печи периодического типа емкостью 10–30 кг применительно к условиям производства Воскресенского экспериментального технологического центра (ВЭТЦ) ФГУП «ВИАМ». Химический состав полученных слитков определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрометре «Varian 240» по ГОСТ 11739.3–82, ГОСТ Р 51056–97, ГОСТ 13899, ГОСТ 138987.

С учетом результатов испытаний экспериментальных плавок оптимизирован технологический режим выплавки стали ВНС-32-ВИ, включающий в себя последовательность введения в расплав углерода, титана, бериллия и РЗМ, а также температурный режим разлива стали.

Прутки из стали ВНС-32-ВИ диаметром 12 и 22 мм получали в условиях ОАО «Наро-Фоминский машиностроительный завод» (ОАО «НФМЗ») на прокатном стане «ВНИИМЕТМАШ».

Микроструктуру горячедеформированных прутков из стали ВНС-32-ВИ после отжига и окончательной термической обработки исследовали на оптическом микроскопе «АХЮ Imager A1» (на шлифах, вырезанных из прутков диаметром 12 и 22 мм в продольном направлении). Травление проводили электролитическим методом в щавелевой кислоте.

Контроль на загрязненность неметаллическими включениями проводился на оптическом микроскопе «Leica» с цифровой камерой «VEC-335» по ГОСТ 1778–70, вариант Ш4 (поле зрения при увеличении  $\times 100$ , продольное направление), по следующим видам: оксиды точечные и строчечные, нитриды и карбонитриды точечные и строчечные.

Определение модуля упругости при растяжении при 20°C проводилось по ГОСТ 1497–84 на электромеханической испытательной машине Zwick/Roell Z400.

Предел прочности при растяжении при 20°C определялся на испытательной машине ИР-5113 по ГОСТ 1497–84.

Испытания стали ВНС-32-ВИ на стойкость:

- к межкристаллитной коррозии по ГОСТ 6032–2003 метод А (Монипени–Штрауса);
- к питтинговой коррозии по ГОСТ 9.912–89 (СТИ СЭВ 6446–88);
- к общей коррозии в условиях камеры солевого тумана (КСТ-35), камеры тропического климата (КТК) и промышленной атмосферы (МЦКИ, открытый стенд).

Образцы перед коррозионными испытаниями обезжировали и пассивировали в соответствии с требованиями ТР 1.2А.503–98.

## Результаты исследований и их обсуждение

Проведенный анализ существующих технологий получения бериллийсодержащих высокопрочных сталей показал, что оптимальной технологией получения качественных полуфабрикатов из высокопрочной бериллийсодержащей стали ВНС-32-ВИ, обеспечивающей стабильность химического состава, низкое содержание вредных примесей, является выплавка в вакуумных индукционных печах с последующей деформацией на прутки заданного размера.

Основными задачами разработки являлись обеспечение стабильности химического состава выплавляемого металла, чистоты металла по вредным примесям (сере, кислороду, азоту) и неметаллическим включениям (оксиды, нитриды и карбонитриды), высокой технологической пластичности литого металла (слитков).

Особенностью разработанной технологии выплавки является технология предварительного и окончательного раскисления расплава стали редкоземельными металлами (РЗМ), обеспечивающими низкий уровень примесей: 0,0002–0,0006% серы, 0,0016–0,0025% азота, 0,0007–0,0010% кислорода, и стабильность усвоения основных легирующих элементов ( $\pm 0,1\%$ ).

Для определения температурных параметров деформации слитков из стали ВНС-32-ВИ построена диаграмма пластичности литого металла с определением предела прочности, пластических характеристик, ударной вязкости, степени деформации в диапазоне температур 900–1200°C (рис. 1), на основании которой определен температурный интервал (температуры начала и конца деформации) при ковке слитков из стали ВНС-32-ВИ.

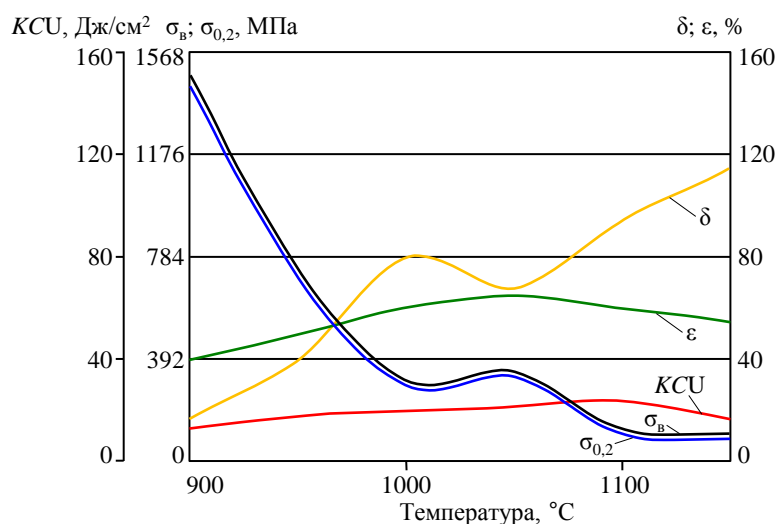


Рисунок 1. Зависимость механических свойств от температуры деформации прутков из стали ВНС-32-ВИ

Внешний вид прутков диаметром 12 и 22 мм, полученных в условиях ОАО «НФМЗ» на прокатном стане «ВНИИМЕТМАШ», представлен на рис. 2, а, б.

Термообработкой по стандартному режиму не удалось обеспечить необходимую твердость прутков ( $\leq 34$  HRC) в отожженном состоянии для выполнения требований ТУ 14-1-3695–84.

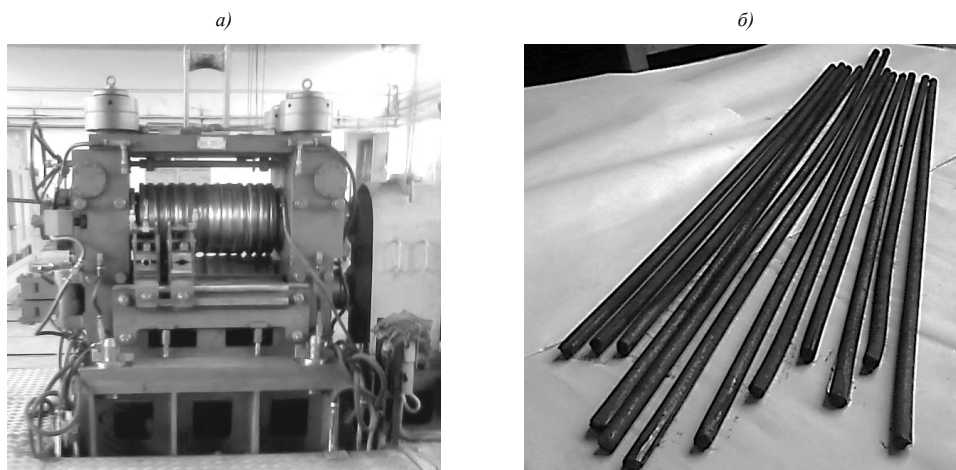


Рисунок 2. Внешний вид прокатного стана «ВНИИМЕТМАШ» (а) и горячекатаных прутков  $\varnothing 22$  мм (б)

По результатам исследований микроструктуры прутков диаметром 12 и 22 мм после отжига установлено, что причиной повышенной твердости горячедеформированных прутков является остаточный мартенсит (рис. 3).

Введение дополнительного режима термообработки – высокого отпуска – позволило стабилизировать структуру отпущенного мартенсита и снизить твердость прутков из стали ВНС-32-ВИ до требуемых величин ( $\leq 34$  HRC). Микроструктура прутков после отжига представляет собой высокоотпущенный мартенсит с карбидами, расположенными по границам и телу зерна. На всех прутках после отжига с высоким отпуском твердость была на уровне 31,3–33,3 HRC.

В результате исследований стали ВНС-32-ВИ на загрязненность неметаллическими включениями выявлено: содержание нитридов и карбонитридов строчечных и оксидов точечных – не превышает 1 балла; нитридов и карбонитридов точечных – не превышает 3 баллов (рис. 4, а); среднее содержание оксидов строчечных – не превышает 1 балла, однако на одном из шлифов обнаружено включение оксида строчечного размером 2 балла (рис. 4, б).

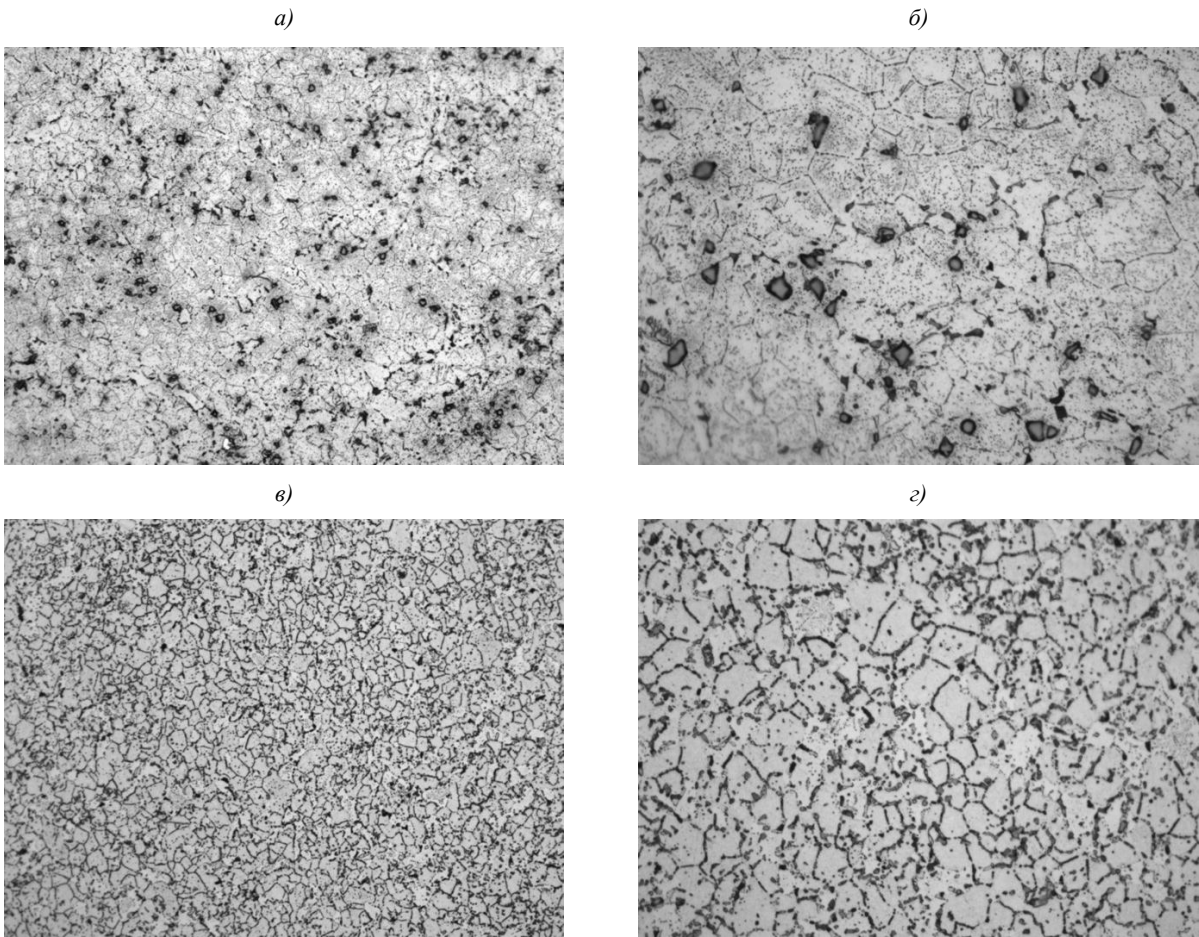


Рисунок 3. Микроструктура горячедеформированных прутков из стали ВНС-32-ВИ после отжига по ТУ (*а, б*) и отжига по ТУ + дополнительного отжига (*в, г*)

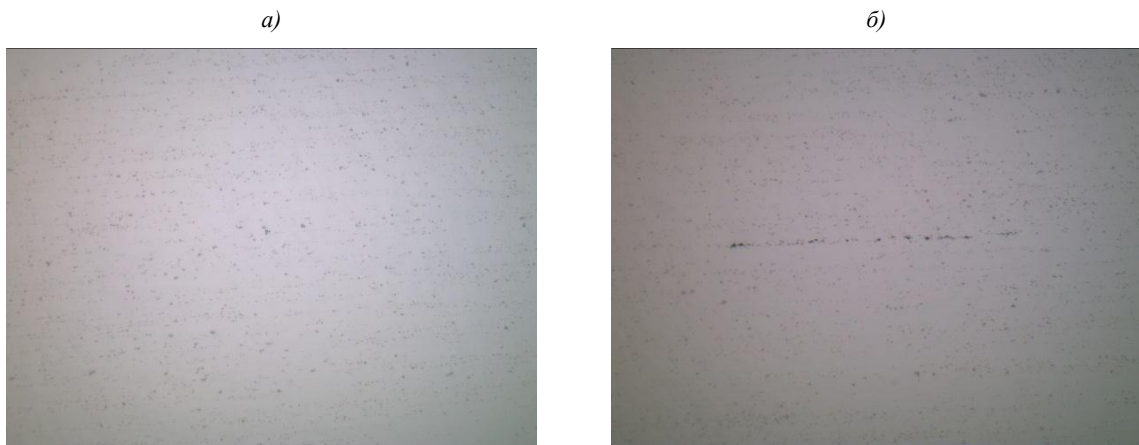


Рисунок 4. Микроструктура прутков из стали ВНС-32-ВИ без дефектов (*а*) и с неметаллическим включением (оксид строчечный 2 балла) (*б*)

Проведено исследование микроструктуры прутков из стали ВНС-32-ВИ после окончательной термической обработки. Микроструктура состоит из состаренного мартенсита и включений  $\delta$ -феррита и соответствует нормально-упрочненному состоянию

стали ВНС-32-ВИ. Увеличение твердости при повышении температуры отпуска происходит путем вторичного твердения при выделении мелкодисперсных фаз карбидов и карбонитридов хрома, связанных когерентно с матрицей, и дополнительного упрочнения благодаря выделению фазы с медью и титаном в процессе старения [11] (рис. 5). При этом твердость прутков: 60,7–62,0 HRC, что соответствует требованиям технических условий ТУ 14-1-3695–84.

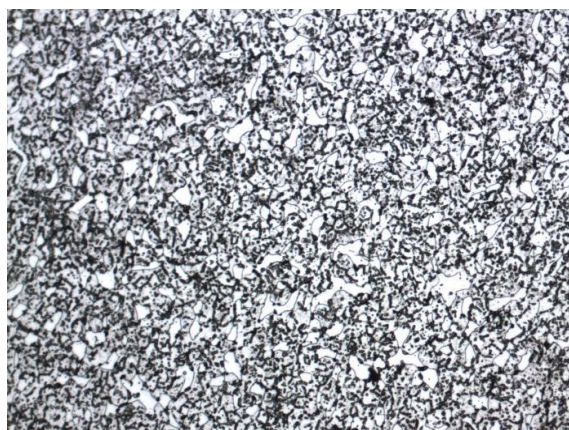


Рисунок 5. Микроструктура горячедеформированных прутков из стали ВНС-32-ВИ после полной термической обработки по ТУ

Восстановленная технология получения стали ВНС-32-ВИ, включающая вакуумную выплавку, деформацию и термическую обработку, позволила получать металл с высоким комплексом механических свойств (см. таблицу).

**Механические свойства горячедеформированных прутков из стали ВНС-32-ВИ**

Модуль упругости $E$ , ГПа	Твердость HRC		Предел прочности $\sigma_B$ , МПа
	после отжига	после полной термической обработки	
220–222	31,3–33,3	60,7–62,0	2210–2400

Проведены испытания на коррозионную стойкость: скорость коррозии на стали ВНС-32-ВИ при МКК составляет 1,45 (г/м<sup>2</sup>)/ч, а при испытании на стойкость к питтинговой коррозии составляет 40,6–51,0 (г/м<sup>2</sup>)/ч. Межкристаллитная коррозия металлографическим методом не обнаружена. Сталь ВНС-32-ВИ обладает удовлетворительной коррозионной стойкостью в общеклиматических условиях и может применяться для изготовления износостойких элементов систем топливорегулирующей аппаратуры, прецизионных деталей и узлов, высоконагруженных опор авиационных приборов в составе планера и газотурбинных двигателей.

По результатам исследований стали ВНС-32-ВИ установлено, что следует учитывать возможность появления  $\delta$ -феррита в структуре бериллийсодержащей стали (см.

рис. 5), который способствует образованию в материале хрупких трещин с последующим разрушением образца [12–14].

По диаграмме Я.М. Потака и Е.А. Сагалевич [15] с использованием данных из работы [16] проведен расчет хромового эквивалента мартенсито- и ферритообразования для стали ВНС-32-ВИ. Определено, что при наличии в стали 12–14% Cr: хромовый эквивалент ферритообразования ( $Cr_{\text{ЭКВ}}^{\text{Ф}}$ ) равен +1,5, а хромовый эквивалент мартенситообразования ( $Cr_{\text{ЭКВ}}^{\text{М}}$ ) равен -14,2, что предполагает появление  $\delta$ -феррита в структуре бериллийсодержащей стали ВНС-32-ВИ.

С учетом отрицательного влияния остаточного  $\delta$ -феррита на деформируемость прутков и пластичность стали ВНС-32-ВИ целесообразным является проведение комплекса работ по усовершенствованию элементного состава стали ВНС-32-ВИ с корректировкой режимов термической обработки – для исключения образования  $\delta$ -феррита в структуре и стабилизации свойств [17–20].

Из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- восстановлена технология получения горячекатаных прутков из высокопрочной бериллийсодержащей стали ВНС-32-ВИ в соответствии с требованиями ТУ 14-1-3695–84;
- оптимизированы технологические параметры выплавки, деформации и режимы термической обработки, обеспечивающие высокий и стабильный уровень свойств;
- исследованы способы снижения охрупчивающей фазы  $\delta$ -феррита в стали.

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотемпературных нагруженных деталей газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 13–19.
3. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
4. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.

5. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 19–36.
6. Тонышева 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.
7. Салахова Р.К. Коррозионная стойкость стали 30ХГСА с «трехвалентным» хромовым покрытием в естественных и искусственных средах //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 59–66.
8. Братухин А.Г. Демченко О.Ф., Долженков Н.Н., Кривоногов Г.С. Высокопрочные коррозионностойкие стали современной авиации. М.: МАИ. 2006. С. 112–121, 130–143.
9. Солнцев Ст.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Каськов В.С. Комплексная система защиты бериллия от окисления //Авиационные материалы и технологии. 2010. №1. С. 12–16.
10. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сенник В.Я., Коновалов В.В., Трунин Ю.П., Нестеренко Г.И. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 14–16.
11. Вознесенская Н.М., Изотов В.И., Ульянова Н.В., Попова Л.С., Потак Я.М. Структура и свойства высокопрочной нержавеющей стали 1Х15Н4АМЗ //МиТОМ. 1971. №1. С. 32–35.
12. Саввина Н.А., Косарина Е.И., Мирошин К.Г., Степанов А.В. Теоретический расчет и практические способы определения вероятности обнаружения дефектов в авиационных материалах //Авиационные материалы и технологии. 2005. №1. С. 16–22.
13. Кривоногов Г.С., Каблов Е.Н. Границы зерен и их роль в охрупчивании высокопрочных коррозионностойких сталей //Металлы. 2002. №1. С. 35–45.
14. Wagatsuma K., Hirokawa Kh. Observation of ion nitriding on Fe–Cr, Fe–Ni and Ni–Cr alloy surfaces in a glow discharge plasma //Surface and interface analysis. 2012. V. 8. №1. P. 37–42.
15. Потак Я.М., Сагалевиц Е.А. Структурная диаграмма деформируемых нержавеющей сталей //МиТОМ. 1971. №9. С. 12–16.

16. Кривоногов Г.С., Каблов Е.Н. Математическая модель структурной диаграммы малоуглеродистых коррозионностойких сталей и ее применение при разработке новых материалов //Металлы. 2001. №5. С. 42–48.
17. 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.
18. Смолякова М.Ю., Вершинин Д.С., Трегубов И.М. Исследование влияния низкотемпературного азотирования на структурно-фазовый состав и свойства аустенитной стали /В сб. докладов 9-ой Международной конф. «Взаимодействие излучений с твердым телом». Минск. 2011. С. 176–177.
19. Косолапов Г.Ф., Герасимов С.А. О структуре  $\alpha$ -фазы азотированного слоя стали 38Х2МЮА и 10Х13 //МиТОМ. 2011. №5. С. 71–73.
20. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г. Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. С. 508–509.

#### REFERENCES LIST

1. 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 manufacturing technologies for aircraft engine] //Kryl'ja Rodiny. 2012. №3–4. S. 34–38.
2. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Bazyleva O.A. Materialy dlja vysokotepλονagruzhennyh detalej gazoturbennyh dvigatelej [Materials for high-thermal components of gas turbine engines] //Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 13–19.
3. 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] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
4. Kablov E.N. Sovremennye materialy – osnova innovacionnoj modernizacii Rossii [Modern materials – the basis of innovative modernization of Russia] //Metally Evrazii. 2012. №3. S. 10–15.
5. Ospennikova O.G. Strategija razvitija zharoprochnyh spлавov i stalej special'nogo naznachenija, zashhitnyh i teplozashhitnyh pokrytij [The development strategy of superalloys and special steels, protective and heat-protective coatings] //Metally Evrazii. 2012. №3. S. 10–15.

- eralloys and special steel, protective and thermal barrier coatings] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 19–36.
6. Tonysheva O.A., Voznesenskaja N.M., Shal'kevich A.B., Petrakov A.F. Issledovanie vlijaniya vysokotemperaturnoj termomechanicheskoj obrabotki na strukturu, tehnologicheskie, mehanicheskie i korrozionnye svojstva vysokoprochnoj korrozionnostojkoj stali perehodnogo klassa s povyshennym sodержaniem azota [Investigation of the influence of high-temperature thermomechanical treatment on the structure, process, mechanical and corrosion properties of high-grade stainless steel transition with a high content of nitrogen] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №3. S. 31–36.
  7. Salahova R.K. Korrozionnaja stojkost' stali 30HGSA s «trivalentnym» hromovym pokrytiem v estestvennyh i iskusstvennyh sredah [The corrosion resistance of steel with 30KhGSA «trivalent» chromium plated in natural and artificial environments] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 59–66.
  8. Bratuhin A.G. Demchenko O.F., Dolzhenkov N.N., Krivonogov G.S. Vysokoprochnye korrozionnostojkie stali sovremennoj aviacii [High-strength corrosion-resistant steel of modern aviation]. M.: MAI. 2006. S. 112–121, 130–143.
  9. Solncev St.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A., Kas'kov V.S. Kompleksnaja sistema zashhity berillija ot okislenija [Comprehensive system protection against oxidation of beryllium] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №1. S. 12–16.
  10. Erasov V.S., Grinevich A.V., Senik V.Ja., Konovalov V.V., Trunin Ju.P., Nesterenko G.I. Raschetnye znachenija harakteristik prochnosti aviacionnyh materialov [Calculated values of the strength characteristics of aircraft materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 14–16.
  11. Voznesenskaja N.M., Izotov V.I., Ul'janova N.V., Popova L.S., Potak Ja.M. Struktura i svojstva vysokoprochnoj nerzhavejushhej stali 1H15N4AM3 [Structure and properties of high strength stainless steel 1H15N4AM3] //MiTOM. 1971. №1. S. 32–35.
  12. Savvina N.A., Kosarina E.I., Miroshin K.G., Stepanov A.V. Teoreticheskij raschet i prakticheskie sposoby opredelenija verojatnosti obnaruzhenija defektov v aviacionnyh materialah [Theoretical calculation and practical ways to determine the probability of detection of defects in aircraft materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2005. №1. S. 16–22.
  13. Krivonogov G.S., Kablov E.N. Granicy zeren i ih rol' v ohrupchivanii vysokoprochnyh korrozionnostojkikh stalej [Grain boundaries and their role in the embrittlement of high-strength stainless steels] //Metally. 2002. №1. S. 35–45.

14. Wagatsuma K., Hirokawa Kh. Observation of ion nitriding on Fe–Cr, Fe–Ni and Ni–Cr alloy surfaces in a glow discharge plasma //Surface and interface analysis. 2012. V. 8. №1. P. 37–42.
15. Potak Ja.M., Sagalevich E.A. Strukturnaja diagramma deformiruemyh nerzhavjushchih stalej [Structure diagram deformable stainless steels] //MiTOM. 1971. №9. S. 12–16.
16. Krivonogov G.S., Kablov E.N. Matematicheskaja model' strukturnoj diagrammy malouglerodistyh korroziionnostojkih stalej i ee primenenie pri razrabotke novyh materialov [Mathematical model of the structural diagram of low carbon stainless steels and its application in the development of new materials] //Metally. 2001. №5. S. 42–48.
17. Tonysheva O.A., Voznesenskaja N.M., Eliseev Je.A., Shal'kevich A.B. Novaja vysokoprochnaja jekonomnolegirovannaja azotsoderzhashhaja stal' povyshennoj nadezhnosti [New high cost-doped nitrogen-containing steel increased reliability] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 84–88.
18. Smoljakova M.Ju., Vershinin D.S., Tregubov I.M. Issledovanie vlijanija nizkotemperaturnogo azotirovanija na strukturno-fazovyj sostav i svojstva austenitnoj stali [Investigation of the influence of low-temperature nitridation on the structural and phase composition and properties of austenitic steel] /V sb. dokladov 9-oj Mezhdunarodnoj konf. «Vzaimodejstvie izluchenij s tverdym telom». Minsk. 2011. S. 176–177.
19. Kosolapov G.F., Gerasimov S.A. O strukture  $\alpha$ -fazy azotirovannogo sloja stali 38H2MJuA i 10H13 [The structure of  $\alpha$ -phase steel nitrided layer 38H2MYUA and 10X13] //MiTOM. 2011. №5. S. 71–73.
20. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G. Struktura i iznosostojkost' azotirovannyh konstrukcionnyh stalej i splavov [Structure and wear resistance of nitrided structural steels and alloys]. M.: MGTU im. N.Je. Baumana. 2012. S. 508–509.