

Научная статья

УДК 669.14.018.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-3-12

ВЫСОКОПРОЧНАЯ КОРРОЗИОННОСТОЙКАЯ СТАЛЬ ВНС-74 ПРИМЕНИТЕЛЬНО К КРЕПЕЖНЫМ ДЕТАЛЯМ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

О.А. Тонышева¹, Н.М. Вознесенская¹, В.И. Громов¹, А.В. Леонов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлена разработка технологии выплавки и деформации коррозионностойкой стали мартенситного класса ВНС-74 (05X16H5AB), легированной повышенным содержанием азота (>0,10 % (по массе)). Рассмотрены структура и ее влияние на твердость и прочностные характеристики калиброванных прутков разного сечения (от 6 до 16 мм), изготовленных из стали ВНС-74 методом холодной и горячей деформации. Показана высокая технологическая пластичность тонких прутков в холодном состоянии, необходимая для проведения операции холодной высадки головки болтов. Исследованы механические свойства и стойкость к коррозии под напряжением болтов холодной и горячей высадки без перекоса и с перекосом 8 градусов под головкой и под гайкой.

Ключевые слова: коррозионностойкая сталь, термообработка, механические свойства, крепежные детали

Для цитирования: Тонышева О.А., Вознесенская Н.М., Громов В.И., Леонов А.В. Высокопрочная коррозионностойкая сталь ВНС-74 применительно к крепежным деталям авиационной техники // Труды ВИАМ. 2022. № 7 (113). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-3-12.

Scientific article

HIGH STRENGTH CORROSION RESISTANT STEEL VNS-74 AS APPLIED TO AIRCRAFT FASTENERS

O.A. Tonyшева¹, N.M. Voznesenskaya¹, V.I. Gromov¹, A.V. Leonov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article is devoted to the development of technology for smelting and deformation of VNS-74 (05Kh16N5AB) corrosion resistant steel with an increased nitrogen content (more than 0.10 % by weight). The structure and its influence on the hardness and strength characteristics of calibrated bars (different sections from 6 to 16 mm), made of steel VNS-74 by cold and hot deformation, are considered. The high technological plasticity of thin rods in the cold state, which is necessary for carrying out the operation of cold upsetting of the bolt heads, is shown. The mechanical properties and stress corrosion resistance of cold and hot heading bolts with 8° misalignment under the head and under the screw-nut and without misalignment were studied.

Keyword: corrosion resistant steel, heat treatment, mechanical properties, fasteners

For citation: Tonyшева O.A., Voznesenskaya N.M., Gromov V.I., Leonov A.V. High strength corrosion resistant steel VNS-74 as applied to aircraft fasteners. *Trudy VIAM*, 2022, no. 7 (113), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-3-12.

Введение

Крепежные изделия относятся к числу изделий, наиболее широко применяемых в современных самолетных и вертолетных конструкциях (в конструкциях крыла, фюзеляжа, вертикального и горизонтального оперения, элементов управления воздушным судном).

В настоящее время в качестве таких крепежных деталей используют: конструкционную сталь 30ХГСА с пределом прочности 1080 МПа, а также коррозионностойкие стали 07Х16Н6 с пределом прочности 1177 МПа и 14Х17Н2 с пределом прочности 1080 МПа. Однако эти стали обладают недостаточной технологической пластичностью в холодном состоянии из-за повышенного содержания углерода.

Для развития промышленности, конкурентоспособности и, как следствие, социальной стабильности нашей страны необходимо проводить разработки в области новых материалов и технологий их получения [1–3]. К современным материалам, обладающим высоким уровнем надежности, предъявляют также требования по снижению экономической нагрузки на их производство [4].

Тенденцией последних лет в области совершенствования сталей является легирование азотом. Это один из самых доступных на нашей планете элементов, который в качестве легирующей добавки вызывает интерес уже больше века [5].

Существует немалое количество работ, посвященных изучению структуры и свойств азотсодержащих сталей [6–10], подтверждающих целесообразность введения в них азота.

Замена азотом части углерода в сталях наделяет материал уникальным сочетанием свойств «прочность–пластичность–вязкость». Например, в сложнелегированной азотсодержащей коррозионностойкой стали 17Х13Н4К6САМЗч аустенито-мартенситного (переходного) класса при суммарном легировании углеродом и азотом до 0,30 % (по массе) достигают следующих значений механических свойств: предел прочности 1810 МПа, относительное сужение 50 %, ударная вязкость образцов с V-образным надрезом 81 Дж/см² [11].

Азотсодержащие стали обладают хорошей технологической пластичностью в холодном состоянии и способны деформироваться со степенью обжатия до 90 % [12].

Использование азота сокращает применение дорогостоящих и редких легирующих элементов в составе стали. Например, никель как легирующий элемент присутствует во многих сталях, благодаря чему сталь приобретает пластичность и вязкость. Кроме того, никель является сильным аустенитообразующим элементом. Однако этот металл в ряде стран является дефицитным. Частичная замена никеля в хромоникелевых и хромоникельмарганцевых сталях привела не только к снижению стоимости материала, но и к улучшению его физико-механических свойств [6].

Азотсодержащие стали нашли широкое применение в различных областях техники. В зависимости от структурного состояния стали с азотом можно использовать для производства деталей электро- и парогенератора в качестве конструкционных материалов, обладающих высокими жаропрочностью и коррозионной стойкостью; силовых элементов планера и шасси авиационной техники, а также в судостроении, в медицинских изделиях в качестве имплантов и для изготовления медицинских инструментов. В работе [13] аустенитные высокоазотистые стали предложено применять для баллистической защиты.

Для крепежных деталей в авиационной технике Институтом металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана новая экономнолегированная коррозионностойкая азотсодержащая сталь ВНС-74 (05Х16Н5АБ) [14] с пределом прочности не менее 1400 МПа,

сопротивлением срезу не менее 950 МПа и высокой технологической пластичностью в холодном состоянии.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Материалы и методы

Объектом исследования являлась коррозионноустойчивая сталь ВНС-74 мартенситного класса с повышенным содержанием азота ($>0,10\%$ (по массе)) с регламентированным содержанием мартенсита и аустенита в виде калиброванных прутков размером от 6 до 16 мм промышленного производства. Сталь выплавляли в открытой индукционной печи емкостью 1 т с дальнейшим электрошлаковым переплавом.

Фазовый состав литого металла определяли на приборе МКЛ-3М путем измерения в процессе выплавки магнитности литой пробы, закаленной в воде и охлажденной до комнатной температуры. В случае необходимости выполняли доводку фазового состава до заданных значений магнитности.

Фазовый состав образцов из прутков определяли на основе измерения величины намагниченности насыщения $4\pi I_s$ на баллистической установке «Штеблейн» индукционным методом.

Из слитков стали ВНС-74 изготовлены калиброванные прутки диаметром 6–16 мм. Полуфабрикаты таких размеров получены из заготовки круглого сечения 95 мм. Прутки изготовили путем горячего деформирования (прокатки). В процессе их изготовления между операциями прокатки для улучшения технологичности выполняли отжиг. Тонкие прутки диаметром 6–8 мм получили после смягчающего отжига из прутков диаметром 10 мм методом холодного волочения за две протяжки.

Болты из прутков диаметром 6–8 мм изготавливали методом холодной штамповки головки, а из прутков диаметром 10–16 мм – методом горячей штамповки головки. Для операции горячей высадки головок болтов использовали нагрев токами высокой частоты от многовиткового индуктора, питающегося от транзисторного генератора ВЧГ-40, в течение не более 30 с при температуре 1050–1100 °С. Накатывание резьбы проводили цилиндрическими роликами.

Определение содержания азота в стали ВНС-74 осуществляли методом газового анализа на газоанализаторе CS-600.

Твердость определяли на твердомере EmcoTest Duravision.

Испытания прутков на растяжение проводили на универсальной испытательной машине LFM-125 в соответствии с ГОСТ 1497–84.

Механические испытания болтов выполняли в соответствии с ГОСТ 1759.4–87.

Для определения стойкости к коррозионному растрескиванию в камере солевого тумана КСТ-35 перед испытаниями проводили подготовку болтов: крепежные детали обезжировали и создавали пассивную пленку на поверхности. Качество пассивированной поверхности контролировали методом осаждения меди при нанесении медного купороса – отсутствие следов меди указывает на сплошность пассивной пленки. Часть болтов испытывали с перекосом, используя специальные втулки, у которых один торец имел скос 8 градусов (торец со скосом устанавливали под гайкой). Испытания проводили при приложенных напряжениях $0,5M_p = 440$ МПа и $0,7M_p = 617$ МПа, где $M_p = 882$ МПа – разрушающий момент. Стойкость к коррозии под напряжением болтов определяли по ГОСТ 9.308–85.

Исследование микроструктуры стали ВНС-74 проводили на шлифах, травленных электролитическим методом, на оптическом микроскопе Olympus GX 51 при увеличении $\times 500$.

Результаты и обсуждение

Сталь ВНС-74 относится к сталям мартенситного класса, она упрочняется углеродом и азотом. Концентрация последнего достигает 0,12–0,13 % (по массе), суммарное содержание данных элементов внедрения составляет ~0,20 % (по массе). Указанное количество азота в сталях данной марки является сверхравновесным, что может привести к образованию пористости в слитке в процессе его кристаллизации.

Для предотвращения образования дефектов выплавку стали с повышенным содержанием азота желательно проводить в печи с избыточным давлением [15]. При наличии полупромышленной установки электрошлакового переплава под давлением ДЭШП-0,1 [16] в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ возможно получение слитка стали массой до 100 кг.

С целью получения в условиях металлургического завода плотного, без газовых пузырей и пористости, слитка сталь ВНС-74 плавил в открытой индукционной печи емкостью 1 т. Расчет химического состава плавки вели таким образом, чтобы содержание хрома и марганца соответствовало верхнему пределу марочного состава, так как хром и марганец расширяют область растворимости азота. Однако повышенное количество этих элементов, а также увеличение концентрации азота снижают температуру мартенситного превращения, что приводит к росту количества остаточного аустенита в литом металле после охлаждения, снижающего прочностные характеристики стали.

В работе [17] установлено, что для получения уровня прочности не менее 1400 МПа необходимо выплавлять сталь ВНС-74 с фазовым составом, состоящим из ~60 % магнитной фазы (мартенсита) и ~40 % немагнитной фазы (аустенита) (значение 130 мкА по магнитной пробе на приборе МКЛ-3М) [18]. Помимо рационального легирования элементами, повышающими растворимость азота, наличие остаточного аустенита является благоприятным фактором для получения плотного слитка, поскольку в аустените растворимость азота больше [19].

Готовый качественный слиток стали ВНС-74, содержащий 0,12 % (по массе) азота, подвергали электрошлаковому переплаву при атмосферном давлении, при этом количество азота сохранилось на заданном уровне.

Исследование твердости калиброванных прутков, изготовленных из полученного слитка стали ВНС-74, показало, что твердость тонкого полуфабриката (диаметром 6–8 мм), отожженного после холодной деформации, больше твердости отожженных горячекатаных прутков и составила 3,3 мм (твердость горячекатаных прутков 3,5 мм), поскольку высокая степень обжатия при холодном волочении и отсутствие рекристаллизации создали структуру с высокой плотностью дислокаций.

По-видимому, этим можно объяснить и более высокие значения предела текучести после упрочняющей термообработки тонких прутков (табл. 1).

Таблица 1

Механические свойства прутков из стали ВНС-74 после упрочняющей термической обработки (закалка, обработка холодом, низкий отпуск)

Диаметр прутка, мм	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ
	МПа		%	
6–8	1450–1520	1200–1260	15–18	55–62
10–16	1460–1470	1110–1140	21–22	64–67

При этом следует отметить, что размер зерна после закалки как холодно-, так и горячекатаных прутков одинаковый (рис. 1).

Процесс рекристаллизации в холоднодеформированных прутках протекает при более низких температурах вследствие накопленной энергии дефектов кристаллической решетки. Избыток энергии провоцирует снижение температуры рекристаллизации, так как является импульсом для перераспределения дислокаций, необходимых для зарождения центров рекристаллизации [20].

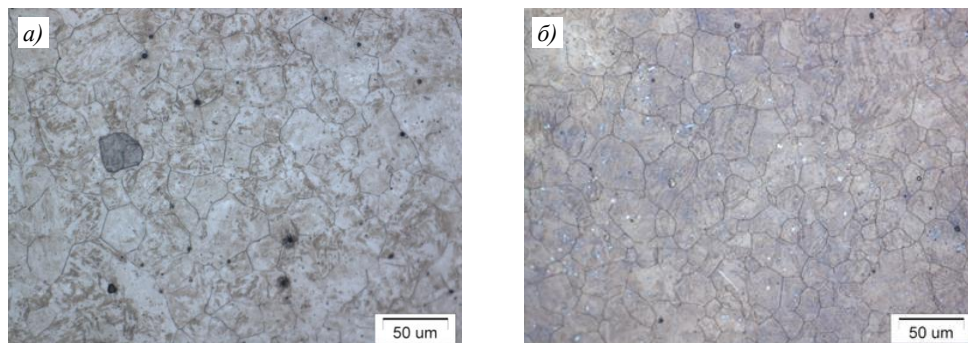


Рис. 1. Зеренная структура прутков диаметром 6 (а) и 16 мм (б) после упрочняющей термической обработки (закалки, обработки холодом, низкого отпуска). Травление на зерно

В многочисленных центрах рекристаллизации в металле после холодного волочения зарождается множество мелких зерен, которые, однако, при выдержке при довольно высокой температуре закалки, растворяющей карбонитриды, интенсивно растут. Вследствие этого после закалки размер зерен одинаков как в холодно-, так и в горячедеформированном материалах.

Для получения требуемого уровня механических свойств крепежных деталей из стали ВНС-74 упрочняющая термическая обработка проводится по следующему режиму: закалка с температуры растворения карбонитридов, обработка холодом для дополнительного превращения аустенита в мартенсит, низкий отпуск. Микроструктура стали после указанной термообработки представлена на рис. 2.

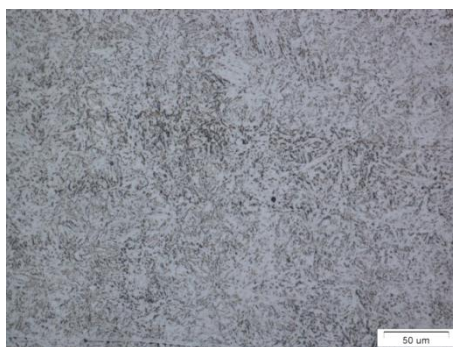


Рис. 2. Микроструктура стали ВНС-74 после закалки, обработки холодом и низкого отпуска: мартенсит (темные зоны), остаточный аустенит (светлые зоны), отдельные карбонитриды

В процессе деформации и последующей термической обработки часть аустенита, полученного после выплавки, превращается в мартенсит. Исследование фазового состава стали показало, что в ней остаются стабильный аустенит (15–20 %), мартенсит и отдельные карбонитриды.

Структура металла после отжига на высокоотпущенный мартенсит является наиболее благоприятной для проведения холодной пластической деформации. Мягкий (обезлегированный углеродом и азотом) мартенсит обладает высокой пластичностью.

Степень осадки при комнатной температуре отожженных холоднокатаных прутков диаметром 6–8 мм составила >80 % за один проход без образования трещин (рис. 3).



Рис. 3. Вид образцов диаметром 8 (а) и 6 мм (б) после осадки >80 % отожженных холоднокатаных прутков из стали ВНС-74 при комнатной температуре

Таким образом, сталь ВНС-74 с повышенным содержанием азота, выплавленная в промышленных условиях, имеет высокий уровень механических свойств и обладает повышенной технологичностью, необходимой для изготовления крепежных деталей (болтов, шпилек и т. д.) методом горячей и холодной высадки.

Калиброванные прутки из стали ВНС-74 опробованы при изготовлении в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ совместно с ОАО «Национальный институт авиационных технологий» высадного крепежа (болты) различного диаметра (от 6 до 16 мм) методом холодной и горячей штамповки головки (рис. 4).



Рис. 4. Высадные болты М16 (а), М8 (б) и М6 (в) из стали ВНС-74, изготовленные методом горячей (а) и холодной (б, в) штамповки головки

Механические испытания показали, что болты из стали ВНС-74 не чувствительны при растяжении к перекоосу 8 градусов под головкой и гайкой (табл. 2). Болты М6 и М8 из тонких холоднодеформированных прутков, выполненные холодной высадкой, обладают большим сопротивлением отрыву и срезу по сравнению болтами М10–М16, выполненными горячей высадкой, вследствие наследования дефектной структуры после холодной деформации.

Таблица 2

**Результаты механических испытаний крепежных деталей (болтов)
из стали ВНС-74 (данные ОАО НИАТ)**

Тип болтов	Способ высадки головки	σ_b			$\tau_{ср}$
		без перекоса	с перекосом 8 градусов		
			под гайкой	под головкой болта	
МПа					
М6–М8	Холодная	1930–1945	1895–1955	1965–1990	955–1025
М10–М16	Горячая	1775–1920	1735–1865	1765–1890	960–1010

Все болты разрушались в местах наибольшей концентрации напряжений – в резьбе или под головкой; излом болтов – с вязким характером разрушений (рис. 5).



Рис. 5. Излом болта М8 с перекосом 8 градусов в резьбе из стали ВНС-74 после испытания на растяжение

Исследована стойкость к коррозионному растрескиванию болтов из стали ВНС-74 с перекосом 8 градусов и без перекоса в камере солевого тумана КСТ-35. Установлено, что за 10 мес испытаний трещин не обнаружено.

Заключения

В промышленных условиях с целью получения плотных слитков, а также требуемых механических свойств стали с повышенным содержанием азота (0,12 % (по массе)) ее выплавку проводили на верхнем пределе по хрому и марганцу и с заданным фазовым составом по магнитной пробе (значения 130 мкА на приборе МКЛ-3М).

Из полученного слитка изготовлены калиброванные прутки диаметром 10–16 (горячей прокаткой) и 6–8 мм (методом холодного волочения).

Исследованы твердость и механические свойства калиброванных прутков. Установлено, что значения прочности и твердости холоднодеформированных полуфабрикатов больше, чем у горячедеформированного металла, что связано с хорошо развитой дислокационной структурой, образованной сильным обжатием, и наследованием такой структуры после отжига и закалки.

Изучение зеренной структуры прутков показало, что величина зерна после закалки по одному и тому же режиму у холоднодеформированного полуфабриката тонкого сечения (до 8 мм) и горячекатаного прутка с большим диаметром практически одинаковая, поскольку сильно наклепанная структура в металле холодного волочения приводит к интенсификации процессов рекристаллизации при более низких температурах и, таким образом, теряется возможность получения более мелкого зерна после закалки.

Исследована технологическая пластичность тонких прутков диаметром 6–8 мм. Показано, что при комнатной температуре степень обжатия составила >80 %, что позволяет изготавливать болты методом холодной высадки головки.

Установлена нечувствительность к перекосу 8 градусов под головкой и под гайкой болтов из стали ВНС-74 при растяжении и срезе, а также стойкость к коррозионному растрескиванию в камере солевого тумана КСТ-35.

Сталь ВНС-74 рекомендована в качестве крепежных деталей для изделий авиационной техники.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Без новых материалов – нет будущего // *Металлург*. 2013. № 12. С. 4–8.
2. 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.
3. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // *Тенденции и ориентиры инновационного развития России*. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
4. Якушева Н.А. Высокопрочные конструкционные стали для деталей шасси перспективных изделий авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2. С. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-3-9.
5. Чижевский Н.П. Железо и азот. Томск: Типолитография сибирского товарищества печатного дела, 1914. 91 с.
6. Банных И.О. Влияние легирования на прочностные свойства и механизмы упрочнения азотсодержащих аустенитных сталей после горячей деформации и отжига // *Металлы*. 2017. № 6. С. 74–80.
7. Костина М.В., Банных О.А., Блинов В.М. Особенности сталей, легированных азотом // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2000. № 12. С. 3–6.
8. Алексеев В.И. Перспективы применения конструкционных сталей со сверхравновесным содержанием азота в условиях повышенных температур и давлений водорода // *Металлы*. 2000. № 4. С. 47–52.
9. Артемьева Д.А., Анастасиади Г.П. Влияние легирования азотом на кратковременные и длительные механические свойства стали 07X12НМФБ // *Металловедение и термическая обработка металла*. 2018. № 1. С. 39–43.
10. Севальнев Г.С., Анцыферова М.В., Дульнев К.В., Севальнева Т.Г., Власов И.И. Влияние концентрации азота на структуру и свойства экономнолегированной конструкционной стали // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 10–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-10-16.
11. Тоньшева О.А., Вознесенская Н.М., Шестаков И.И., Елисеев Э.А. Влияние режимов высокотемпературной термомеханической обработки на структуру и свойства высокопрочной коррозионностойкой стали аустенито-мартенситного класса 17X13H4K6CAM3ч // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 1 (46). С. 11–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-11-16.
12. Банных И.О., Банных О.А. Современное состояние исследований и применение высокоазотистых аустенитных сталей. М.: Наука и технологии, 2017. 64 с.
13. Bhav Singh B., Sivakumar K., Balakrishna Bhat T. Effect of cold rolling on mechanical properties and ballistic performance of nitrogen-alloyed austenitic steels // *International Journal of Impact Engineering*. 2009. Vol. 36. P. 611–620.
14. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГПУ «ВИАМ» (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
15. Рашев Ц.В. Высокоазотистые стали: металлургия под давлением. София: Проф. Марин Дринов, 1995. 268 с.

16. Крылов С.А., Евгенов А.Г., Щербаков А.И., Макаров А.А. Новая электрошлаковая печь под давлением ДЭШП-0,1: освоение и перспективы развития // Труды ВИАМ. 2016. № 5 (41). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.03.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-4-4.
17. Тоньшева О.А. Особенности формирования структуры и свойств при выплавке, термической обработке и пластической деформации коррозионноустойчивых свариваемых хромоникелевых сталей, легированных азотом: автореф. ... дис. канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2014. 27 с.
18. Потак Я.М., Сагалевич Е.А. Структурная диаграмма деформируемых нержавеющей сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 1971. № 9. С. 12–16.
19. Гудремон Э. Специальные стали: в 2 т. / пер. с нем. 2-е изд., перераб. М.: Metallurgia, 1966. Т. 2. С. 1097.
20. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. 3-е изд. М.: Metallurgia, 1978. С. 47.

References

1. Kablov E.N. Without new materials, there is no future. *Metallurg*, 2013, no. 12, pp. 4–8.
2. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
3. Kablov E.N. The key problem is materials. *Trends and guidelines for Russia's innovative development*. Moscow: VIAM, 2015, pp. 458–464.
4. Yakusheva N.A. High-strength constructional steels for landing gears of perspective products of aircraft equipment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-3-9.
5. Chizhevsky N.P. *Iron and nitrogen*. Tomsk: Typolitography of the Siberian Printing Association, 1914. 91 p.
6. Bannykh I.O. Influence of alloying on the strength properties and hardening mechanisms of nitrogen-containing austenitic steels after hot deformation and annealing. *Metally*, 2017, no. 6, pp. 74–80.
7. Kostina M.V., Bannykh O.A., Blinov V.M. Features of steels alloyed with nitrogen. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2000, no. 12, pp. 3–6.
8. Alekseev V.I. Prospects for the use of structural steels with a superequilibrium nitrogen content under conditions of elevated temperatures and hydrogen pressures. *Metally*, 2000, no. 4, pp. 47–52.
9. Artemeva D.A., Anastasiadi G.P. Influence of alloying with nitrogen on the short-term and long-term mechanical properties of steel 07Kh12NMFБ. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*, 2018, no. 1, pp. 39–43.
10. Sevalnev G.S., Antsyferova M.V., Dulnev K.V., Sevalneva T.G., Vlasov I.I. Influence of nitrogen concentration on the structure and properties of sparingly alloyed structural steel. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 10–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-10-16.
11. Tonysheva O.A., Voznesenskaya N.M., Shestakov I.I., Eliseyev E.A. Influence of modes of high-temperature thermomechanical processing on structure and properties of high-strength corrosion-resistant steel of austenitic-martensitic class 17X13H4K6CAM3ч. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 1 (46), pp. 11–16. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-11-16.
12. Bannykh I.O., Bannykh O.A. *Current state of research and application of high-nitrogen austenitic steels*. Moscow: Nauka i tekhnologii, 2017, 64 p.
13. Bhav Singh B., Sivakumar K., Balakrishna Bhat T. Effect of cold rolling on mechanical properties and ballistic performance of nitrogen-alloyed austenitic steels. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, vol. 36, pp. 611–620.
14. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.

15. Rashev Ts.V. *High nitrogen steels: Metallurgy under pressure*. Sofia: Prof. Marin Drinov, 1995, 268 p.
16. Krylov S.A., Evgenov A.G., Shherbakov A.I., Makarov A.A. New pressure electroslag remelting furnace PESR-0,1: development and prospects for improvement. *Trudy VIAM*, 2016, no. 5, paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 20, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-4-4.
17. Tonysheva O.A. *Features of the formation of the structure and properties during smelting, heat treatment and plastic deformation of corrosion-resistant weldable chromium-nickel steels alloyed with nitrogen*: thesis abstract, Cand. Sc. (Tech.). Moscow: VIAM, 2014, 27 p.
18. Potak Ya.M., Sagalevich E.A. Structural diagram of wrought stainless steels. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1971, no. 9, pp. 12–16.
19. Goodremont E. *Special steels*: in 2 vols. Trans. from Germ. 2nd ed., rev. Moscow: Metallurgiya, 1966, vol. 2, p. 1097.
20. Novikov I.I. *Theory of heat treatment of metals*. 3rd ed. Moscow: Metallurgiya, 1978, p. 47.

Информация об авторах

Тоньшева Ольга Александровна, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Вознесенская Наталья Михайловна, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Громов Валерий Игоревич, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Леонов Александр Владимирович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Olga A. Tonysheva, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Natalya M. Voznesenskaya, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Valeriy I. Gromov, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander V. Leonov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 18.05.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 24.05.2022.

The article was submitted 18.05.2022; approved and accepted for publication after reviewing 24.05.2022.