

Научная статья

УДК 669.15

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-41-52

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВЫСОКОПРОЧНОЙ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ АЗОТСОДЕРЖАЩЕЙ СТАЛИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БЕСШОВНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ

Г.С. Севальнев<sup>1</sup>, К.В. Дульнев<sup>1</sup>, П.В. Рыжков<sup>1</sup>, А.В. Леонов<sup>1</sup>, Н.М. Вознесенская<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Рассмотрена оптимизация термической обработки для получения тонкостенных труб холодной прокаткой из высокопрочной коррозионностойкой стали 15X15N4AGM-Ш с прочностью после закалки ( $\sigma_6 > 1700$  МПа), затрудняющей деформацию. Установлено, что отжиг стали приводит к значительному охрупчиванию. Отпуск при температуре 600–700 °С формирует высокоотпущенный мартенсит, снижая прочность ( $\sigma_{0,2} \approx 990$  МПа при 600 °С) при сохранении пластичности ( $\delta_5 \approx 19$  %). Показано, что оптимальное снижение прочностных характеристик без значительного уменьшения пластичности происходит в интервале температур 630–660 °С.

**Ключевые слова:** высокопрочная коррозионностойкая сталь, высокоазотистая сталь, тонкостенные трубы, фазовый состав, механические свойства, технологичность

**Для цитирования:** Севальнев Г.С., Дульнев К.В., Рыжков П.В., Леонов А.В., Вознесенская Н.М. Оптимизация термической обработки высокопрочной коррозионностойкой азотсодержащей стали для получения бесшовных тонкостенных труб // Труды ВИАМ. 2025. № 8 (150). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-41-52.

Scientific article

## OPTIMIZATION OF HEAT TREATMENT FOR HIGH-STRENGTH CORROSION-RESISTANT NITROGEN-CONTAINING STEEL TO PRODUCE SEAMLESS THIN-WALLED TUBES

G.S. Sevalnev<sup>1</sup>, K.V. Dulnev<sup>1</sup>, P.V. Ryzhkov<sup>1</sup>, A.V. Leonov<sup>1</sup>, N.M. Voznesenskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal 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 examines the optimization of heat treatment for producing thin-walled pipes via cold rolling from high-strength corrosion-resistant steel 15Kh15N4AGM-Sh. The high strength of this steel after quenching ( $\sigma_6 > 1700$  MPa) makes deformation difficult. It was established that annealing the steel leads to significant embrittlement. Tempering at 600–700 °C forms a highly tempered martensite structure, reducing strength ( $\sigma_{0,2} \approx 990$  MPa at 600 °C) while maintaining ductility ( $\delta_5 \approx 19$  %). Based on the research results, it was determined that the best reduction in strength characteristics without a significant decrease in ductility occurs in temperature range 630–660 °C.

**Keywords:** high-strength corrosion-resistant steel, high-nitrogen steel, thin-walled pipes, phase composition, mechanical properties, manufacturability

**For citation:** Sevalnev G.S., Dulnev K.V., Ryzhkov P.V., Leonov A.V., Voznesenskaya N.M. Optimization of heat treatment for high-strength corrosion-resistant nitrogen-containing steel to produce seamless thin-walled tubes. *Trudy VIAM*, 2025, no. 8 (150), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-41-52.

### Введение

В тяжелом машиностроении тонкостенные трубы выступают ключевым полуфабрикатом для создания легких, прочных и долговечных конструкций [1–4]. Использование тонкостенных труб позволяет снизить массу узлов на 20–40 % при сохранении несущей способности, что критически важно для авиации, автомобилестроения и робототехники.

В настоящее время основными материалами для производства тонкостенных труб являются:

- конструкционные стали перлитного класса [5, 6];
- коррозионностойкие стали аустенитного, мартенситного и дуплексных классов [7–13];
- биметаллические материалы с плакирующим слоем [14–16];
- высокопрочные сплавы специального назначения [17–19].

Основные методы производства труб из различных материалов включают [20]:

- горячее деформирование (прессование, прокатка);
- холодное деформирование (волочение, прокатка);
- комбинированные методы обработки давлением.

Для перспективных летательных аппаратов, в частности беспилотных, используют тонкостенные трубы в качестве тяжелонагруженных конструктивных элементов, а именно для трубчатых ползковых шасси. Широкое применение трубчатое ползковое шасси, изготавливаемое из конструкционной стали перлитного класса 30ХГСА, получило для вертолетной техники. При эксплуатации данного типа техники в различных регионах и климатических условиях проявляются недостатки тонкостенных труб из стали 30ХГСА: отсутствие коррозионной стойкости и недостаточная износостойкость в связи с необходимостью посадки летательного аппарата на абразивные поверхности.

В современных условиях развития промышленности особую актуальность приобретает производство тонкостенных труб из высокопрочных коррозионностойких сталей. Коррозионностойкие трубы находят широкое применение в атомной энергетике, химической промышленности, нефтегазодобывающем секторе и других высокотехнологичных отраслях.

Несмотря на высокое сопротивление коррозионно-агрессивным средам, коррозионностойкие стали аустенитного класса обладают недостаточным уровнем прочностных характеристик и меньшей износостойкостью по сравнению с конструкционной сталью 30ХГСА. В связи с этим необходимо использовать в качестве материала для изготовления тонкостенных труб высокопрочные коррозионностойкие стали мартенситного или мартенсито-аустенитного класса.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана широкая номенклатура высокопрочных коррозионностойких сталей [21–24], однако наиболее перспективными в данном направлении являются стали системы Fe–C–N–Cr–Ni–Mo–Mn с повышенным содержанием азота. Данные стали обладают высоким уровнем механических свойств, коррозионной стойкости и свариваемостью. Однако ввиду высоких прочностных характеристик после термической обработки ( $\sigma_b > 1700$  МПа,  $\sigma_{0,2} > 1200$  МПа) из-за высокого содержания элементов внедрения и легирующих элементов при производстве тонкостенных труб из высокопрочных коррозионностойких сталей системы Fe–C–N–Cr–Ni–Mo–Mn возникает ряд технологических проблем, в частности необходимость:

- обеспечения требуемой точности геометрических параметров ввиду высокого сопротивления стали пластическим деформациям;
- использования мощного прокатного оборудования;
- достижения высокого качества поверхности;

– минимизации прокатных и структурных дефектов.

Для получения качественных полуфабрикатов в виде тонкостенных труб из высокопрочной мартенсито-аустенитной коррозионностойкой стали необходимо обеспечить высокую технологичность при достаточном снижении уровня прочностных характеристик. Для большинства сталей, в том числе коррозионностойких, такой комплекс свойств достигается путем проведения отжига или высокотемпературного отпуска. Однако для сталей системы Fe–C–N–Cr–Ni–Mo–Mn с повышенным содержанием азота это осложнено выделением из твердого раствора избыточных карбидных и нитридных фаз легирующих элементов, снижающих пластичность и приводящих к растрескиванию во время контактно-деформационного воздействия. В связи с этим данная научно-исследовательская работа направлена на оптимизацию режима термической обработки высокопрочной коррозионностойкой азотсодержащей стали для получения бесшовных тонкостенных труб путем холодной пластической деформации.

### Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали заготовки труб из высокопрочной коррозионностойкой азотсодержащей стали 15X15H4АГМ-Ш. Для исследования характеристик трубы подвергали термической обработке – закалке при температуре, достаточной для растворения избыточных фаз в твердом растворе и получения однородной мартенсито-аустенитной структуры, и последующему отпуску при различных температурах.

Металлографический анализ структур стали 15X15H4АГМ-Ш после термической обработки проводили на оптическом инвертированном микроскопе при увеличении  $\times 500$ . Твердость  $HV_1$  определяли по методу Виккерса с помощью твердомера при нагрузке 1 кг (10 Н) в соответствии с ГОСТ 2999–75.

Механические свойства ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta_5$ ) после термической обработки определяли путем испытания образцов, вырезанных из трубных заготовок, на статическое растяжение при температуре 20 °С в соответствии с ГОСТ 1497–2023 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» с применением разрывной машины. Скорость испытаний образцов составила  $0,01 \text{ с}^{-1}$ .

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

### Результаты и обсуждение

Для анализа структурно-фазовых изменений в высокопрочной коррозионностойкой стали 15X15H4АГМ-Ш расшифрована термограмма, полученная с применением дифференциальной сканирующей калориметрии (рис. 1). По результатам анализа определены основные точки температурных интервалов с экзо- и эндотермическими реакциями. Установлено, что в температурном интервале:

– 1–2 реализуется процесс старения (как и в большинстве коррозионностойких сталей такой системы легирования), сопровождающийся выделением карбидов  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  из мартенситной матрицы;

– 2–3 происходят дальнейшее перестаривание выделением карбидов  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  и нитридов (Cr, V)N (в связи с микролегированием стали ванадием) из твердого раствора, снижение тетрагональности мартенсита и подготовка микроструктуры к полиморфному превращению  $\alpha \rightarrow \gamma$ ;

– 3–4 осуществляется смена кристаллической решетки мартенсита на аустенит;

– 4–5 происходят выравнивание теплового потока и подготовка микроструктуры к растворению части избыточных фаз в твердом растворе;

- 5–6 растворяются карбиды цементитного типа;
- 6–7 происходят выравнивание теплового потока и подготовка микроструктуры к дальнейшим структурно-фазовым изменениям;
- 7–8 растворяются карбиды  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ;
- 8–9 происходит переход z-фазы  $(\text{Cr}, \text{V})\text{N}$  в нитриды  $\text{VN}$ ;
- 9–10 нитриды ванадия растворяются в твердом растворе;
- 10–11 осуществляются выравнивание теплового потока и подготовка микроструктуры к дальнейшим структурно-фазовым изменениям;
- 11–12 происходит частичная смена кристаллической решетки аустенита на мартенсит.

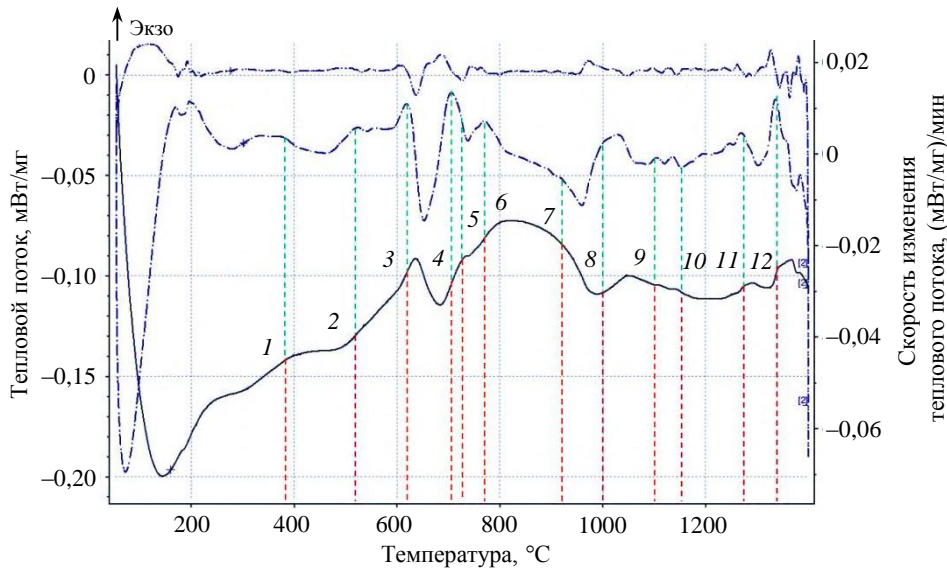


Рис. 1. Термограмма (—), первая (---) и вторая (-·-·) производные для высокопрочной коррозионностойкой стали 15X15N4AGM-III, полученные методом дифференциальной сканирующей калориметрии

Для высокопрочной коррозионностойкой стали 15X15N4AGM-III в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан режим закалки, обеспечивающий высокий уровень механических свойств ( $\sigma_b > 1700$  МПа,  $\sigma_{0,2} > 1200$  МПа,  $\delta_5 > 15$  %). Однако для холодной прокатки труб полученные прочностные характеристики высокие, а пластичность удовлетворительная, в связи с чем большинство видов оборудования не позволит получить тонкостенные трубы с равномерной толщиной стенки. С учетом расшифровки термограммы дифференциальной сканирующей калориметрии структурно-фазовых превращений для исследований кинетики изменения механических свойств выбран температурный интервал отпуска 200–700 °С и реализовано ускоренное охлаждение образцов для закрепления структуры, а также использованы различные варианты отжига при температуре выше температуры полиморфного превращения.

Для оценки изменения свойств образцов определена твердость по Виккерсу после отпуска при различных температурах. Кинетика изменения твердости в зависимости от температуры отпуска (рис. 2) согласуется с результатами термограммы. После закалки формируется мартенсит с твердостью ~560  $\text{HV}_1$ , который в дальнейшем при температуре 300 °С из-за выделения карбидов цементитного типа обедняется углеродом с последующим снижением твердости. Увеличение температуры отпуска до 400–500 °С способствует повышению твердости из-за выделения карбидов легирующих

элементов, в частности хрома, а также в результате образования z-фазы нитридов (Cr, V)N. Увеличение температуры отпуска до 600 °С привело к значительному снижению твердости (на 30 %) из-за формирования высокоотпущенного мартенсита. Обработка при температуре 700 °С из двухфазной области приводит к полиморфному превращению  $\alpha \rightarrow \gamma$ , что при ускоренном охлаждении в воде способствует образованию мартенсита и увеличению твердости.

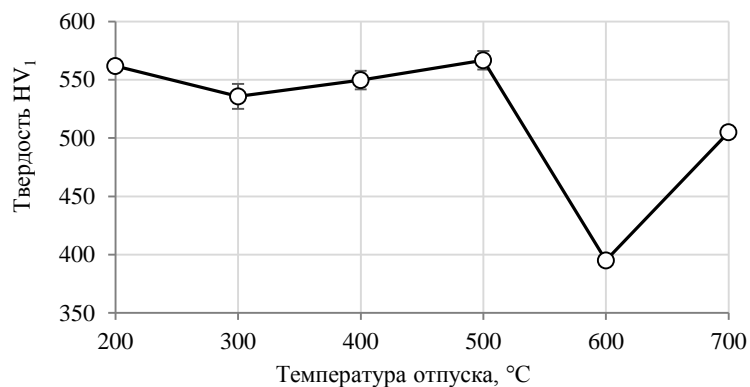


Рис. 2. Влияние температуры отпуска на твердость высокопрочной коррозионностойкой стали 15X15H4AGM-Ш

Металлографический анализ микроструктуры (рис. 3) позволил установить, что после закалки и отпуска при температуре 200 °С формируется мартенсито-аустенитная структура, которая сохраняется до температуры 400 °С. Начиная с температуры 400 °С происходят активное выделение избыточных фаз (карбидов и нитридов) из твердого раствора и формирование четких контуров мартенситной структуры. Дальнейшее увеличение температуры отпуска до 500–700 °С интенсифицирует процесс выделения избыточных фаз, приводит к формированию высокоотпущенного мартенсита и подготовке микроструктуры к полиморфному превращению.

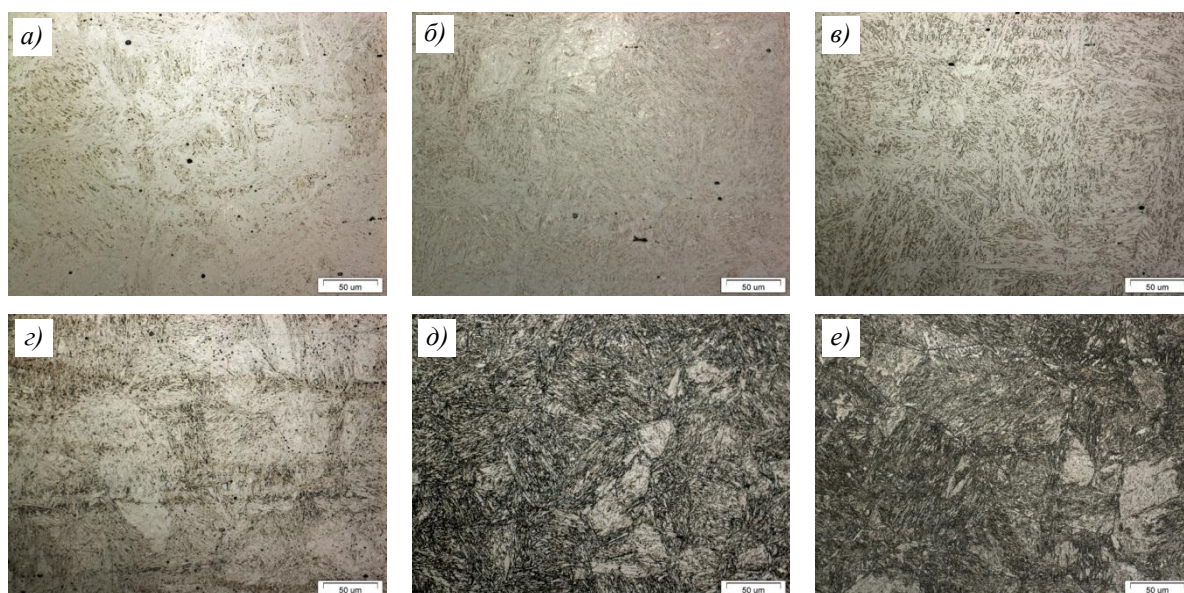


Рис. 3. Микроструктуры ( $\times 500$ ) высокопрочной коррозионностойкой стали 15X15H4AGM-Ш после отпуска при температурах 200 (a), 300 (б), 400 (в), 500 (г), 600 (д) и 700 °С (e)

Результаты изучения механических свойств в зависимости от температуры отпуска (рис. 4) позволили установить, что при закалке без последующего отпуска реализуется высокий уровень механических характеристик с наибольшей прочностью ( $\sigma_B = 2160$  МПа) и высоким относительным удлинением ( $\delta_5 = 19\%$ ). Последующий отпуск при температуре до  $300^\circ\text{C}$  приводит к снижению напряженности мартенситной структуры, в результате чего  $\sigma_B$  снижается до  $1840$  МПа, а  $\delta_5$  увеличивается до  $20\text{--}21,5\%$ . При температуре отпуска  $500^\circ\text{C}$  за счет дисперсионного твердения (выделения карбидов и нитридов из твердого раствора) формируются наибольший предел текучести ( $\sigma_{0,2} = 1550$  МПа) и высокий предел прочности ( $\sigma_B = 1990$  МПа), при этом также достигается высокое относительное удлинение ( $\delta_5 = 20,5\%$ ). Формирование высокоотпущенного мартенсита приводит к общему снижению механических свойств ( $\sigma_B = 1320$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 990$  МПа,  $\delta_5 = 18,9\%$ ). Благодаря достаточному уровню пластичности и значительному снижению прочностных характеристик после отпуска при данной температуре можно проводить прокатку трубных заготовок, однако не любое оборудование позволяет достичь необходимого усилия, чтобы продеформировать заготовку с пределом текучести  $>990$  МПа для получения тонкостенной трубы с высоким качеством поверхности.

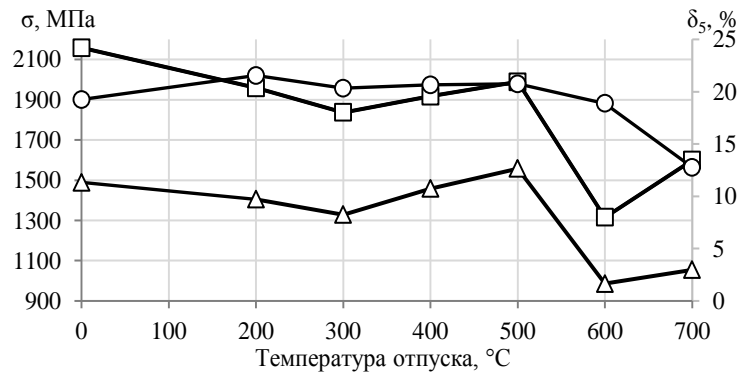


Рис. 4. Влияние температуры отпуска на механические свойства ( $\square - \sigma_B$ ,  $\triangle - \sigma_{0,2}$ ,  $\circ - \delta_5$ ) высокопрочной коррозионностойкой стали 15X15H4AGM-III

Помимо отпуска, для сталей различных классов возможно применение двухступенчатого отжига с целью снижения прочностных характеристик и формирования пластических свойств. Для стали 15X15H4AGM-III данный отпуск сопровождается выделением большой доли избыточных фаз из твердого раствора, что может снижать пластичность. Анализ механических свойств стали после отжига (рис. 5) показал, что данная термическая обработка приводит к значительному снижению пластичности и увеличению степени охрупчивания, ввиду чего не рекомендована при подготовке труб под прокатку.

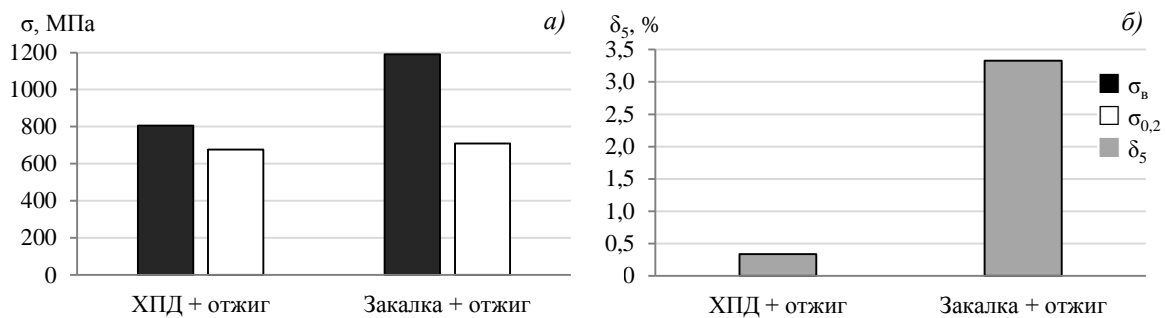


Рис. 5. Влияние холодной пластической деформации (ХПД) и закалки совместно с отжигом на пределы прочности и текучести (а), относительное удлинение (б) стали 15X15H4AGM-III

Проанализирован коэффициент  $K_\sigma$  – соотношение предела прочности  $\sigma_b$  к пределу текучести  $\sigma_{0,2}$  (рис. 6). Показано, что увеличение температуры отпуска до 500 °С приводит к уменьшению коэффициента, что свидетельствует о снижении деформируемости заготовок при холодной пластической деформации. В интервале температур 600–700 °С наблюдается значительное повышение  $K_\sigma$ , что может способствовать повышению деформируемости, а также дальнейшему снижению прочностных характеристик. В связи с этим проведено дальнейшее исследование влияния температуры отпуска в данном температурном интервале с изменением продолжительности выдержки.

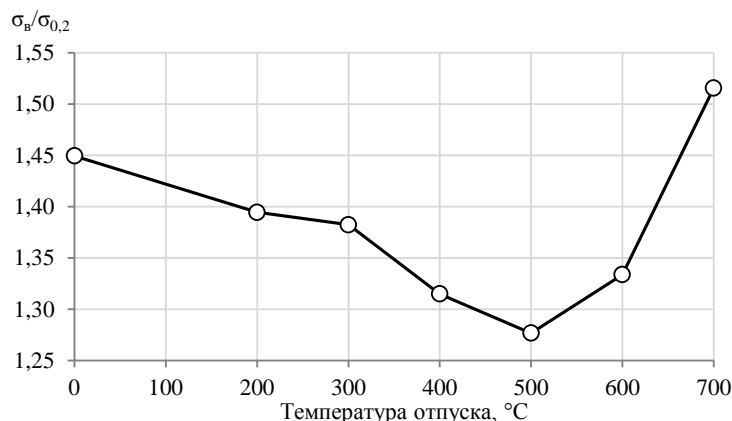


Рис. 6. Соотношение предела прочности  $\sigma_b$  к пределу текучести  $\sigma_{0,2}$  в зависимости от температуры отпуска стали 15X15H4АГМ-Ш

В температурных интервалах отпуска 630–660 и 660–700 °С (рис. 7) с различной продолжительностью выдержки твердость стали варьируется от 350 до 430 HV<sub>1</sub>. Высокое значение твердости в температурном интервале 660–700 °С при выдержке 1 ч связано с обработкой в двухфазной области и частичным протеканием мартенситного превращения. Дальнейшее снижение твердости связано с выделением карбидов и нитридов легирующих элементов из твердого раствора и снижением дисперсности высокоотпущенного мартенсита.

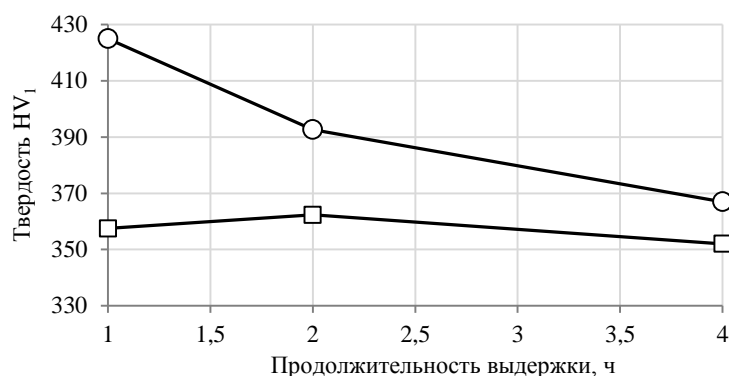


Рис. 7. Влияние продолжительности выдержки при отпуске в температурных интервалах 630–660 (□) и 660–700 °С (○) на твердость стали 15X15H4АГМ-Ш

Металлографический анализ микроструктуры образцов показал, что в температурном интервале 630–660 °С независимо от продолжительности выдержки формируется высокоотпущенный мартенсит, в то время как при температурах 660–700 °С реализуется превращение  $\alpha \rightarrow \gamma$  (рис. 8). При отпуске в температурном интервале 660–700 °С формируется микроструктура, благоприятная для достижения высокого качества поверхности при изготовлении тонкостенных труб из высокопрочной коррозионностойкой стали

15X15H4АГМ-Ш за счет образования аустенита, однако это также может приводить к увеличению механических характеристик.

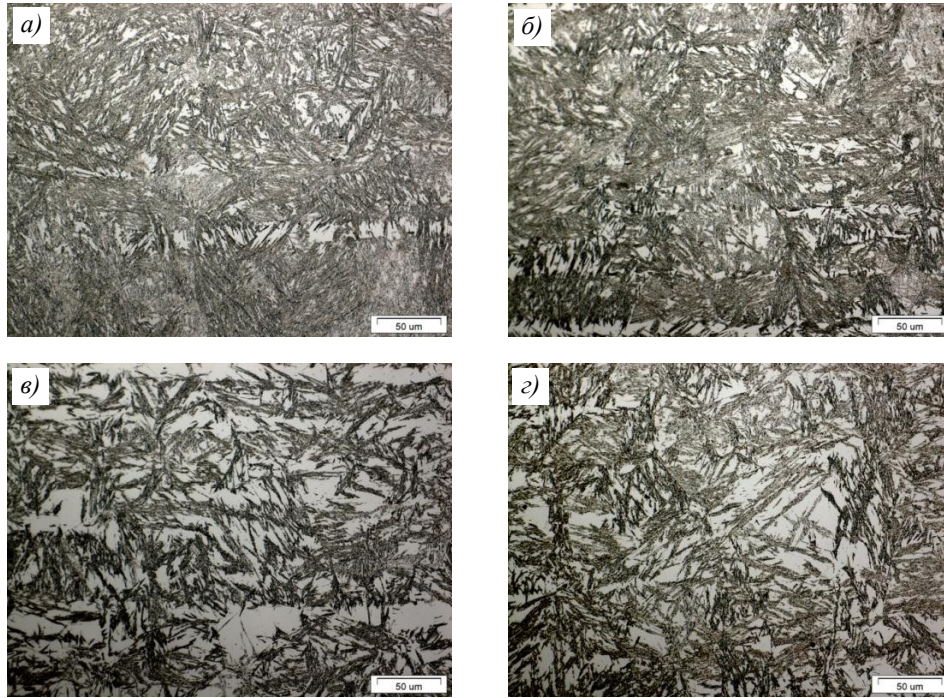


Рис. 8. Микроструктуры ( $\times 500$ ) стали 15X15H4АГМ-Ш в температурных интервалах 630–660 (а, б) и 660–700 °С (в, г) при продолжительности выдержки 1 (а, в) и 4 ч (б, г)

Анализ механических свойств стали в температурных интервалах 630–660 и 660–700 °С (рис. 9) показал, что увеличение продолжительности выдержки с 2 до 4 ч приводит к снижению прочностных характеристик ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ), однако при этом повышается относительное удлинение  $\delta_5$  с 12–16 до 18–19 %, что благоприятно влияет на технологическую пластичность. В обоих температурных интервалах продолжительность выдержки 4 ч позволяет достичь оптимального уровня характеристик для последующей холодной пластической деформации, однако в результате отпуска при 630–660 °С получен лучший уровень свойств.

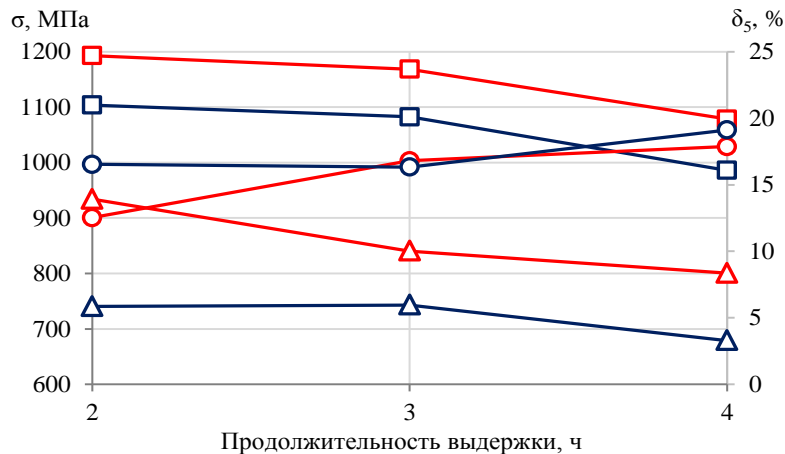


Рис. 9. Влияние продолжительности выдержки при отпуске в температурных интервалах 630–660 (—) и 660–700 °С (—) на механические свойства ( $\square$  –  $\sigma_B$ ,  $\triangle$  –  $\sigma_{0,2}$ ,  $\circ$  –  $\delta_5$ ) стали 15X15H4АГМ-Ш

### Заключения

На основании проведенных исследований по оптимизации термической обработки высокопрочной коррозионностойкой азотсодержащей стали 15X15H4АГМ-Ш для производства тонкостенных труб методом холодной деформации можно сформулировать следующие ключевые выводы.

Стандартная закалка стали обеспечивает высокие прочностные характеристики ( $\sigma_b > 1700$  МПа,  $\sigma_{0,2} > 1200$  МПа), что делает невозможной ее эффективную холодную прокатку на различном трубопрокатном оборудовании для получения тонкостенных труб с требуемыми точностью геометрических параметров и качеством поверхности из-за чрезмерного сопротивления деформации.

Основным методом снижения прочности при сохранении приемлемой пластичности и коррозионной стойкости является отпуск. Анализ структурно-фазовых превращений методом дифференциальной сканирующей калориметрии и кинетики изменения свойств выявил четкую зависимость механических характеристик и микроструктуры от температуры отпуска:

- низкотемпературный отпуск (200–400 °С) приводит к умеренному снижению прочности при сохранении мартенсито-аустенитной структуры;

- отпуск при температуре 500 °С вызывает дисперсионное твердение (выделение карбидов  $Cr_{23}C_6$  и нитридов (Cr, V)N), повышая предел текучести ( $\sigma_{0,2} = 1550$  МПа) и сохраняя высокую прочность ( $\sigma_b = 1990$  МПа);

- отпуск в ключевом интервале (600–700 °С) приводит к формированию высокоотпущенного мартенсита, значительному снижению прочности ( $\sigma_b = 1320$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 990$  МПа при 600 °С) и сохранению достаточной пластичности ( $\delta_5 \approx 19\%$ ).

Двухступенчатый отжиг, применяемый для снижения прочности в других сталях, оказался неприемлемым для стали 15X15H4АГМ-Ш, так как приводит к резкому охрупчиванию и снижению пластичности из-за интенсивного выделения избыточных фаз.

Проведено детальное исследование температурных интервалов отпуска 630–660 и 660–700 °С с различной продолжительностью выдержки. Выявлено, что обработка в температурном интервале 630–660 °С с выдержкой 4 ч обеспечивает наиболее благоприятное сочетание следующих процессов:

- значительное снижение твердости (до  $\sim 350$  HV<sub>1</sub>);
- отсутствие полиморфного превращения  $\alpha \rightarrow \gamma$  при последующем ускоренном охлаждении, вследствие чего не образуется мартенситная микроструктура;
- формирование микроструктуры, оптимальной для достижения высокого качества поверхности при холодной прокатке;
- достаточное снижение предела текучести ( $\sim 990$  МПа) для проведения деформации на промышленном оборудовании.

### Список источников

1. Логинов Ю.Н., Шимов Г.В., Бушуева Н.И. К прогнозу развития мартенситного превращения при безоправочном волочении труб из аустенитной стали // Черные металлы. 2021. № 4. С. 25–31. DOI: 10.17580/chm.2021.04.05.
2. Фролов А.В., Кравченко А.С. Разработка технологии сварки тонкостенных труб пульсирующей дугой // Мат. II Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению»: в 2 ч. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре гос. ун-т, 2022. Ч. 2. С. 181–185.
3. Смертин С.А., Земцов М.И. Анализ возможности изготовления полуфабрикатов – тонкостенных труб, загнутых на требуемый угол // Сб. мат. Всерос. ежегод. науч.-практ. конф. «Общество, наука, инновации (НПК–2014)». Киров: Вятск. гос. ун-т, 2014. С. 1387–1391.
4. Жителев Д.А., Поздняков Т.Д., Сулегин Д.А., Наумов В.Н. Исследование экспериментального и численного поведения тонкостенных труб при квазистатическом режиме нагружения // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 4 (139). С. 85–96.

5. Приймак Е.Ю., Степанчукова А.В. Формирование структуры сталей для производства буровых труб при сварке трением // XIII Междунар. науч.-техн. Уральская школа-семинар молодых ученых-металловедов. II Междунар. науч. школа для молодежи «Материаловедение и металлофизика легких сплавов». Екатеринбург, 2012. С. 3–4.
6. Пугачева Т.М., Михеев Д.А. Материаловедческое исследование замковых соединений буровых труб после наплавки с использованием различных флюсов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 6. С. 97–102.
7. 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 ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
8. Банных И.О., Ашмарин А.А., Бецофен С.Я. и др. Оптимизация химического состава и параметров термомеханической обработки трип сталей на основе новых методов рентгеновской тензометрии, текстурного и фазового анализов // Металлы. 2022. № 6. С. 66–72.
9. Удод К.А., Трофименко Н.Н., Романенко Д.Н., Севальнев Г.С. Перспективы развития конструкционных сталей, легированных алюминием // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 9–13. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-9-13.
10. Серебряков А.В. Исследования, разработка технологии и освоение производства прецизионных труб из коррозионностойкой стали: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург: Урал. гос. техн. ун-т – УПИ, 2007. 160 с.
11. Атанасов В.Р., Панченко С.А. Развитие научных основ и технологических методов повышения коррозионной стойкости труб из дуплексных сталей // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Сер.: Стародубовские чтения. 2015. № 80. С. 18–26.
12. Большаков В.И., Дергач Т.А., Сухомлин Г.Д., Панченко С.А. Применение зернограничного конструирования для повышения коррозионной стойкости труб из ферритно-аустенитных сталей // Коррозия: материалы, защита. 2014. № 7. С. 20–26.
13. Филистеев В.Г., Стеклова Е.О., Березовский А.В. Свариваемость дуплексных сталей для транспорта агрессивных сред, содержащих сероводород и двуокись углерода // Экспозиция Нефть Газ. 2023. № 2. С. 70–75.
14. Кондратенко Л.А., Терехов В.М., Миронова Л.И. Анализ некоторых проблем механического закрепления теплообменных биметаллических труб в энергетических установках // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2017. № 3. С. 83–88.
15. Никитин К.Н., Осадчий В.Я., Сафьянов А.В. и др. Разработка и освоение импортозамещающей технологии производства бесшовных биметаллических труб для атомной энергетики // Сталь. 2017. № 7. С. 44–50.
16. Комаров А.И., Никитин К.Н., Сафьянов А.В. и др. Совершенствование технологии производства бесшовных биметаллических труб для трубопроводов атомных энергетических установок // Черные металлы. 2017. № 9. С. 68–73.
17. Красных В.И., Жданова А.С., Гаранжа Т.В. Прецизионные сплавы с заданными свойствами упругости: необходимость новой жизни // Сталь. 2015. № 7. С. 60–66.
18. Король Р.М., Мироненко А.Ю., Мироненко М.А. Особенности технологии изготовления высококачественных прецизионных труб из зарубежного аналога молибденового сплава МЧВП // Metallurgical and Mining Industry. 2017. № 3. С. 43–47.
19. Kravchenko O.V. Особенности основных технологических и конструктивных параметров стационарной клетки стана ХПТР для прокатки прецизионных теплообменных труб // HERALD of the Donbass State Engineering Academy. 2019. № 2 (46). С. 64–67.
20. Ушаков А.С., Кондратов Л.А. О производстве стальных труб // Сталь. 2018. № 7. С. 33–43.
21. Севальнев Г.С., Климов В.С., Власов И.И., Мазалова Т.А. Исследование механических свойств синтезированных образцов из стали системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo после различных видов обработки // Труды ВИАМ. 2025. № 6 (148). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.06.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-3-12.
22. Елисеев Э.А., Карпухин С.Д., Дружинина М.Э. Влияние никеля на структуру азотированного слоя низкоуглеродистых сталей мартенситного класса // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 1 (78). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-18-27.

23. Закаланный А.В., Денисова В.С., Власова О.В., Солнцев С.С. Технологические аспекты получения фритты жаростойкой эмали для защиты коррозионностойких сталей // Труды ВИАМ. 2021. № 8 (102). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-43-49.
24. Алексеева М.С., Слободской П.А., Лукина Е.А., Якушева Н.А. Закономерности формирования структуры мартенситостареющей стали системы Fe–Cr–Ni–Mo–Ti в ходе термической обработки // Труды ВИАМ. 2024. № 2 (132). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-3-12.

### References

1. Loginov Yu.N., Shimov G.V., Bushueva N.I. On the forecast of the development of martensitic transformation during mandrel-free drawing of pipes made of austenitic steel. *Chernye metally*, 2021, no. 4, pp. 25–31. DOI: 10.17580/chm.2021.04.05.
2. Frolov A.V., Kravchenko A.S. Development of a technology for welding thin-walled pipes with a pulsed arc. *Reports II Int. Sci. and Pract. Conf. of young scientists «Science, innovation and technology: from ideas to implementation»*: in 2 parts. Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-on-Amur State Univ., 2022, part 2, pp. 181–185.
3. Smertin S.A., Zemtsov M.I. Analysis of the possibility of manufacturing semi-finished products – thin-walled pipes bent to the required angle. *Coll. of materials of the All-Rus. Annual Sci.-Pract. Conf. «Society, science, innovation (NPK-2014)»*. Kirov: Vyatka State Univ., 2014, pp. 1387–1391.
4. Zhitelev D.A., Pozdnyakov T.D., Sulegin D.A., Naumov V.N. Study of experimental and numerical behavior of thin-walled pipes under quasi-static loading mode. *Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev*, 2022, no. 4 (139), pp. 85–96.
5. Priymak E.Yu., Stepanchukova A.V. Formation of the structure of steels for the production of drill pipes by friction welding. *XIII Int. Sci.-Tech. Ural school-seminar of young scientists-metallologists. II Int. Sci. school for youth «Materials science and metalphysics of light alloys»*. Ekaterinburg, 2012, pp. 3–4.
6. Pugacheva T.M., Mikheev D.A. Materials science study of drill pipe lock joints after surfacing using various fluxes. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*, 2018, no. 6, pp. 97–102.
7. 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.
8. Bannykh I.O., Ashmarin A.A., Betzofen S.Ya. et al. Optimization of chemical composition and parameters of thermomechanical processing of TRIP steels based on new methods of X-ray tensometry, texture and phase analysis. *Metally*, 2022, no. 6, pp. 66–72.
9. Udod K.A., Trofimenko N.N., Romanenko D.N., Sevalnev G.S. Prospects for the development of constructional aluminium-doped steels. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 9–13. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-9-13.
10. Serebryakov A.V. *Research, development of technology and mastering the production of precision pipes made of corrosion-resistant steel*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Ekaterinburg: Ural State Tech. Univ. - UPI, 2007, 160 p.
11. Atanasov V.R., Panchenko S.A. Development of scientific foundations and technological methods for increasing the corrosion resistance of pipes made of duplex steels. *Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Ser.: Starodubovskie chteniya*, 2015, no. 80, pp. 18–26.
12. Bolshakov V.I., Dergach T.A., Sukhomlin G.D., Panchenko S.A. Application of grain boundary design to increase the corrosion resistance of pipes made of ferritic-austenitic steels. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2014, no. 7, pp. 20–26.
13. Filisteev V.G., Steklova E.O., Berezovsky A.V. Weldability of Duplex Steels for Transporting Aggressive Environments Containing Hydrogen Sulfide and Carbon Dioxide. *Expositsiya Neft Gaz*, 2023, no. 2, pp. 70–75.
14. Kondratenko L.A., Terekhov V.M., Mironova L.I. Analysis of Some Problems of Mechanical Fastening of Bimetallic Heat Exchange Tubes in Power Plants. *Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii*, 2017, no. 3, pp. 83–88.

15. Nikitin K.N., Osadchiy V.Ya., Safyanov A.V. et al. Development and mastering of import-substituting technology for the production of seamless bimetallic pipes for nuclear power engineering. *Stal*, 2017, no. 7, pp. 44–50.
16. Komarov A.I., Nikitin K.N., Safyanov A.V. et al. Improving the technology for the production of seamless bimetallic pipes for pipelines of nuclear power plants. *Chernyye metally*, 2017, no. 9, pp. 68–73.
17. Krasnykh V.I., Zhdanova A.S., Garanzha T.V. Precision alloys with specified elastic properties: the need for a new life. *Stal*, 2015, no. 7, pp. 60–66.
18. Korol R.M., Mironenko A.Yu., Mironenko M.A. Features of the manufacturing technology of high-quality precision tubes from a foreign analogue of the molybdenum alloy MChVP. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, 2017, no. 3, pp. 43–47.
19. Kravchenko O.V. Features of the main technological and design parameters of the stationary stand of the HPTR mill for rolling precision heat exchange tubes. *HERALD of the Donbass State Engineering Academy*, 2019, no. 2 (46), pp. 64–67.
20. Ushakov A.S., Kondratov L.A. On the production of steel pipes. *Stal*, 2018, no. 7, pp. 33–43.
21. Sevalnev G.S., Klimov V.S., Vlasov I.I., Mazalova T.A. Study of mechanical properties of Fe–Cr–Ni–Co–Mo steel 3D-printed samples after various types of processing. *Trudy VIAM*, 2025, no. 6 (148), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 22, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-3-12.
22. Eliseev E.A., Karpukhin S.D., Druzhinina M.E. The effect of nickel on the structure of the nitrated layer of low-carbon martensitic steels. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 1 (78), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 01, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-18-27.
23. Zakalashnyy A.V., Denisova V.S., Vlasova O.V., Solntsev S.S. Technological aspects of obtaining frit of heat-resistant enamel for the protection of corrosion-resistant steels. *Trudy VIAM*, 2021, no. 8 (102), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 01, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-43-49.
24. Alekseeva M.S., Slobodskoy P.A., Lukina E.A., Yakusheva N.A. Patterns of structure formation for open-hearth steel of the Fe–Cr–Ni–Mo–Ti system during heat treatment. *Trudy VIAM*, 2024, no. 2 (132), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 01, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-3-12.

**Информация об авторах**

**Севальнев Герман Сергеевич**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Дульнев Константин Владимирович**, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Рыжков Петр Валерьевич**, научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Леонов Александр Владимирович**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Вознесенская Наталья Михайловна**, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**German S. Sevalnev**, Head of Sector, Candidate of Science (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Konstantin V. Dulnev**, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Petr V. Ryzhkov**, Researcher, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Alexander V. Leonov**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Natalya M. Voznesenskaya**, Leading Researcher, Candidate of Science (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 17.07.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 25.07.2025.  
The article was submitted 17.07.2025; approved and accepted for publication after reviewing 25.07.2025.