

Научная статья

УДК 669.15

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-35-44

АНАЛИЗ СКЛОННОСТИ К ДЕФОРМАЦИОННОМУ УПРОЧНЕНИЮ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАБОТКИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ ИЗ АЗОТСОДЕРЖАЩЕЙ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ

Г.С. Севальнев¹, К.В. Дульнев¹, К.Д. Обливанцев¹

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

Аннотация. Исследована склонность к деформационному упрочнению коррозионно-стойкой азотсодержащей стали 15X15N4AGM-Ш, применяемой для изготовления тонкостенных труб авиационного назначения. На основе упрощенной модели Джонсона–Кука по результатам испытаний рассчитаны параметры деформационного упрочнения A , B и n , а также введенный коэффициент упрочнения H_c . Установлено, что отпуск при 500 °С обеспечивает максимальные значения коэффициента B (500 МПа) и показателя n (0,23), тогда как при 600 °С формируется более низкий уровень прочностных свойств ($\sigma_{0,2} = 1165$ МПа) при сохранении достаточной пластичности.

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

Для цитирования: Севальнев Г.С., Дульнев К.В., Обливанцев К.Д. Анализ склонности к деформационному упрочнению в зависимости от температуры обработки тонкостенных труб из азотсодержащей коррозионностойкой стали // Труды ВИАМ. 2026. № 4 (158). С. 35–44. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-35-44.

Scientific article

STUDY OF STRAIN HARDENING PROPENSITY AS A FUNCTION OF PROCESSING TEMPERATURE IN THIN-WALLED TUBES PRODUCED FROM NITROGEN-CONTAINING CORROSION-RESISTANT STEEL

G.S. Sevalnev¹, K.V. Dulnev¹, K.D. Oblivantsev¹

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 strain hardening propensity of nitrogen-containing corrosion-resistant steel 15Kh15N4AGM-Sh used for manufacturing thin-walled tubes for aviation applications was investigated. Based on the simplified Johnson–Cook model, strain hardening parameters A , B , and n , as well as the introduced hardening coefficient H_c , were calculated based on test results. It was determined that tempering at 500 °C provides maximum values of coefficient B (500 MPa) and exponent n (0,23), while tempering at 600 °C results in reduced strength properties ($\sigma_{0,2} = 1165$ MPa) while maintaining sufficient ductility.

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

For citation: Sevalnev G.S., Dulnev K.V., Oblivantsev K.D. Study of strain hardening propensity as a function of processing temperature in thin-walled tubes produced from nitrogen-containing corrosion-resistant steel. *Trudy VIAM*, 2026, no. 4 (158), pp. 35–44. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-35-44.

Введение

Холоднокатаные тонкостенные трубы из коррозионностойких сталей находят широкое применение в авиационной, ракетно-космической технике, энергетическом машиностроении и химической промышленности, где требуется сочетание высокой прочности, коррозионной стойкости и минимальной массы конструкции [1–5]. Особый интерес представляют трубы из высокопрочных мартенситных, мартенсито-аустенитных и мартенситно-старееющих коррозионностойких сталей с пределом прочности >1700 МПа, способных работать в агрессивных средах при высоких механических нагрузках [6–10]. Однако производство таких труб методами холодной деформации сопряжено со значительными технологическими трудностями, обусловленными комплексным взаимодействием процессов деформационного упрочнения, формирования структурной неоднородности и ограниченной технологической пластичности материала при обработке давлением [11].

Процесс изготовления труб на станах холодной прокатки или волочильных станах является многопроходной операцией, при которой материал испытывает значительные степени деформации (суммарно до 60–80 %) при комнатной температуре [12–16]. Для высокопрочных коррозионностойких сталей с исходным пределом прочности ≥ 1700 МПа характерны следующие особенности, осложняющие процесс:

- интенсивное деформационное упрочнение. Высокопрочные мартенситные и мартенсито-аустенитные стали демонстрируют значительное увеличение прочности в процессе холодной деформации. Согласно модели Джонсона–Кука, напряжение течения описывается уравнением $\sigma = A + B\varepsilon^n$, где A – условный предел текучести материала, МПа; B – коэффициент упрочнения, характеризующий способность материала сопротивляться деформации, МПа; ε – эффективная пластическая деформация; n – показатель степени упрочнения, характеризующий поведение материала при больших деформациях. Для сталей данного класса коэффициент деформационного упрочнения B может достигать 400–600 МПа, а показатель упрочнения n составляет 0,10–0,20 [17, 18]. Это приводит к тому, что уже после первых проходов прокатки напряжение течения материала возрастает на 20–30 %, что требует существенного увеличения усилий деформированием и может приводить к перегрузке оборудования [19];

- ограниченная технологическая пластичность. Высокопрочные стали характеризуются низким показателем деформационного упрочнения ($n < 0,15$) и малым равномерным удлинением ($\delta < 5–7$ %), что значительно сужает технологическое окно для холодной деформации [11]. При превышении критической степени деформации за один проход (обычно 15–25 % для данного класса сталей) происходит локализация деформации с образованием полос сдвига и микротрещин, что приводит к браку продукции [13, 14];

- высокие контактные напряжения и износ инструмента. Прокатка высокопрочных материалов сопровождается повышенными контактными напряжениями на границе «металл–инструмент», которые могут достигать 2000–2500 МПа [20]. Это приводит к интенсивному износу валков и оправок, образованию задиров на поверхности труб и снижению качества готовой продукции. Коэффициент трения в зоне деформации возрастает из-за прорыва смазочной пленки при высоких давлениях.

Интенсивное деформационное упрочнение металлических материалов при пластическом деформировании является одним из ключевых факторов, определяющих как технологичность при обработке давлением, так и надежность изделий авиационной и космической техники в условиях эксплуатационных нагрузок. Для высокопрочных конструкционных сталей и различных сплавов, применяемых в ответственных узлах авиационных конструкций, характеристики деформационного упрочнения приобретают особое значение, поскольку обеспечивают дополнительный запас прочности при локальных перегрузках и определяют стабильность процессов пластического формообразования [8, 21, 22].

Современные подходы к количественной оценке способности материалов к деформационному упрочнению основаны на анализе диаграмм растяжения и определении параметров феноменологических моделей пластического течения. Наибольшее распространение получили модели Холломона ($\sigma = K\varepsilon^n$, где K – коэффициент прочности металла) [23], Людвики ($\sigma = \sigma_0 + B\varepsilon^n$, где σ_0 – начальное напряжение течения, соответствующее пределу текучести материала) и Джонсона–Кука [17, 18], параметры которых имеют ясную физическую интерпретацию и непосредственно связаны с дислокационной структурой материала.

Отечественный и зарубежный опыт обработки высокопрочных сталей давлением показывает, что значение показателя деформационного упрочнения n в значительной степени определяет технологическую пластичность материала. Для обеспечения равномерного течения металла при штамповке сложнопрофильных деталей авиационного назначения рекомендуется использовать стали с показателем $n > 0,18\text{--}0,20$ [17, 18]. При меньших значениях n возрастает риск локализации деформации и образования дефектов. В свою очередь коэффициент деформационного упрочнения B определяет абсолютную величину увеличения прочности при пластическом деформировании и непосредственно влияет на усилия формообразования при получении конечного полуфабриката.

В работе [8] показано, что высокопрочная коррозионностойкая мартенсито-аустенитная сталь 15X15H4АГМ-Ш при классической обработке, включающей закалку, обработку холодом и старение, обладает высокими показателями предела прочности, предела текучести и относительного удлинения. Однако для получения тонкостенных труб необходимо использовать высокотехнологичное оборудование, обеспечивающее большое усилие при обработке давлением. В противном случае узлы оборудования будут претерпевать значительный износ и ускоренный выход из строя. Для данной стали ключевой температурный интервал для обработки давлением составляет $600\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$: отпуск в этом диапазоне приводит к формированию высокоотпущенного мартенсита, значительному снижению прочности ($\sigma_b = 1320\text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 990\text{ МПа}$) и сохранению достаточной пластичности ($\delta_5 \approx 19\%$) [8]. С целью повышения эффективности холодной обработки давлением необходимо проанализировать склонность к деформационному упрочнению в зависимости от температуры обработки и реализованного структурного состояния.

Цель данной работы – экспериментальная оценка параметров деформационного упрочнения высокопрочной коррозионностойкой стали 15X15H4АГМ-Ш по результатам механических испытаний образцов в соответствии с моделью Джонсона–Кука.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали цилиндрические заготовки из высокопрочной коррозионностойкой азотсодержащей стали 15X15H4АГМ-Ш, которые используются для изготовления тонкостенных труб на стане холодной прокатки [8]. Для исследования механических свойств образцы подвергали термической обработке, включающей закалку для обеспечения однородной мартенсито-аустенитной структуры, и последующему отпуску при различных температурах в интервале $200\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Механические свойства (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ_5) после термической обработки определяли путем испытания образцов, вырезанных из трубных заготовок, на статическое растяжение при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в соответствии с ГОСТ 1497–2023 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» с применением разрывной машины. Скорость испытаний образцов составила $0,01\text{ с}^{-1}$.

Для определения скорости деформационного упрочнения в различных состояниях проводили расчеты в соответствии с упрощенным вариантом математической модели Джонсона–Кука, достаточной для определения склонности материала к деформационному упрочнению.

Помимо расчета коэффициентов, в соответствии с моделью определены показатель относительного упрочнения $\Delta U = ((\sigma - A)/A) \cdot 100 \%$, скорость упрочнения $\Theta = d\sigma/d\varepsilon$ и проанализирован коэффициент упрочнения $H_c = Bn$, введенный на основе анализа полученных данных.

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

Результаты и обсуждение

Вид диаграмм растяжения образцов в зависимости от температуры отпуска после испытаний при 20 °С представлен на рис. 1. Пилообразный вид диаграмм растяжения может быть связан либо с динамическим деформационным старением (взаимодействие дислокаций с атмосферами примесей С и N), либо с периодическим образованием и разрушением барьеров Ломер–Коттрелла. Стабильность аустенитной структуры в стали 15X15H4АГМ-Ш не способствует образованию полос Чернова–Людерса.

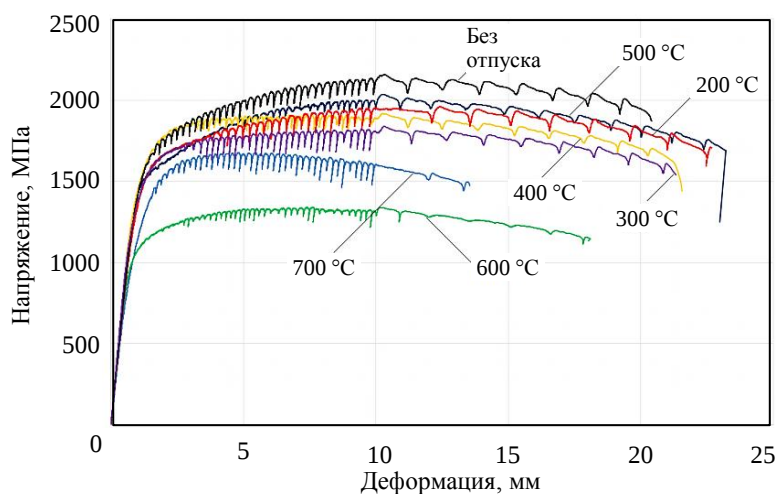


Рис. 1. Диаграммы растяжения образцов из высокопрочной коррозионностойкой азотсодержащей стали 15X15H4АГМ-Ш при различных температурах отпуска

Для оценки степени деформационного упрочнения в соответствии с упрощенной моделью Джонсона–Кука первоначально определен условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ (параметр A) по диаграммам растяжения (рис. 2).

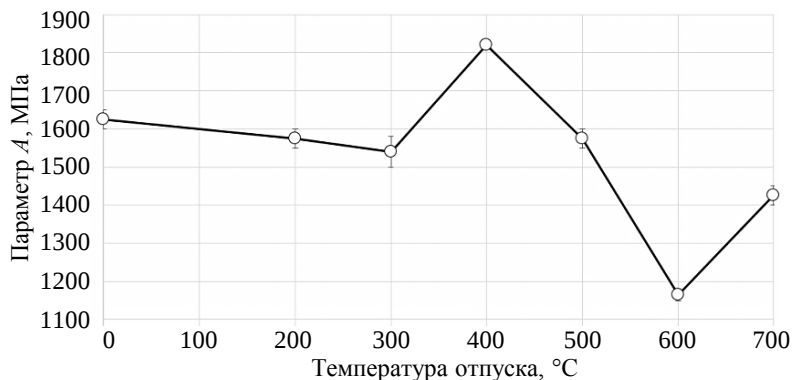


Рис. 2. Изменение параметра A для образцов из высокопрочной коррозионностойкой азотсодержащей стали 15X15H4АГМ-Ш в зависимости от температуры отпуска

При отсутствии отпуска (точка 0 °С на рис. 2–4) и в интервале температур отпуска от 200 до 300 °С происходит снижение параметра A с 1625 до 1540 МПа, что связано с выделением углерода из твердого раствора. Значительное увеличение параметра A до 1820 МПа при температуре отпуска 400 °С связано с протеканием мартенситного ($\gamma \rightarrow \alpha$)-превращения и интенсивным выделением карбидов хрома $Cr_{23}C_6$. Дальнейшее уменьшение показателя до 1165 МПа в температурном интервале 400–600 °С связано с выделением карбидов и нитридов легирующих элементов из твердого раствора, подготовкой структуры для реализации ($\alpha \rightarrow \gamma$)-превращения.

Расчет параметров B и n (рис. 3) показал, что наиболее интенсивно деформационное упрочнение протекает при отсутствии отпуска (непосредственно после закалки), а также при температурах отпуска 200 и 500 °С. При увеличении температуры отпуска с 200 до 400 °С происходит снижение параметра B на 76 % (до 120 МПа), параметра n – на 47 %, что свидетельствует о значительном уменьшении интенсивности протекания деформационного превращения. Несмотря на то что при температуре отпуска 500 °С не реализуется наименьшее значение параметра A , параметры B и n максимальные, что, вероятно, связано с началом процесса перестаривания и интенсивного выделения карбидов и нитридов. Согласно расчетам, при данной температуре отпуска может реализоваться наилучшее деформационное упрочнение среди представленной выборки образцов, а также достигнута высокая технологичность материала. Однако, как упомянуто ранее, высокие прочностные характеристики требуют применения высокотехнологичного оборудования с высокими усилиями при холодной обработке давлением.

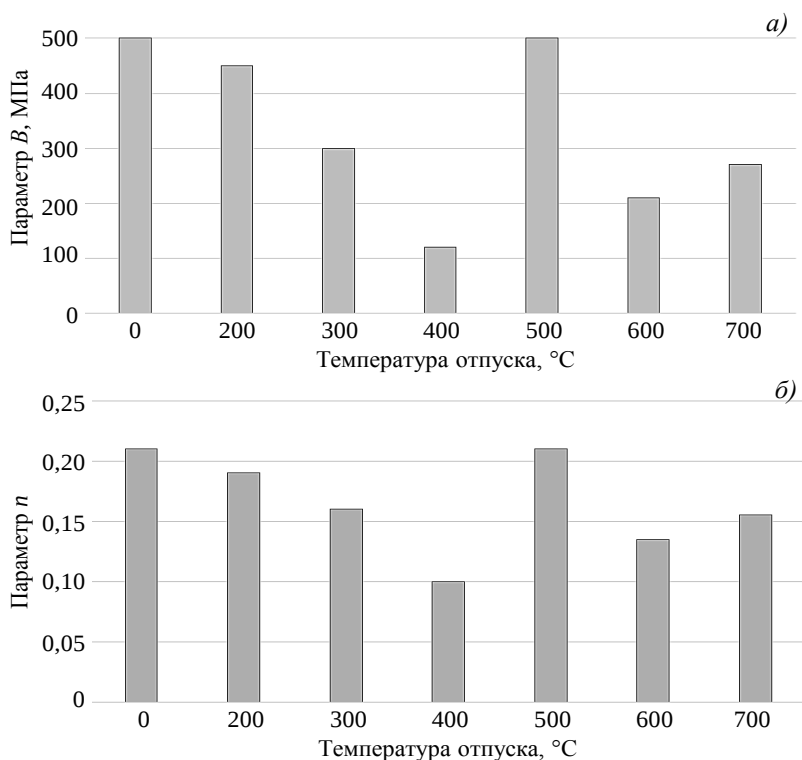


Рис. 3. Изменение параметров B (а) и n (б) для образцов из высокопрочной коррозионно-стойкой азотсодержащей стали 15X15H4AGM-III в зависимости от температуры отпуска

Для оценки деформационного упрочнения также рассмотрены показатели относительного упрочнения ΔU , скорости упрочнения Θ и введенный коэффициент упрочнения H_c . Результаты расчета показателей представлены на рис. 4.

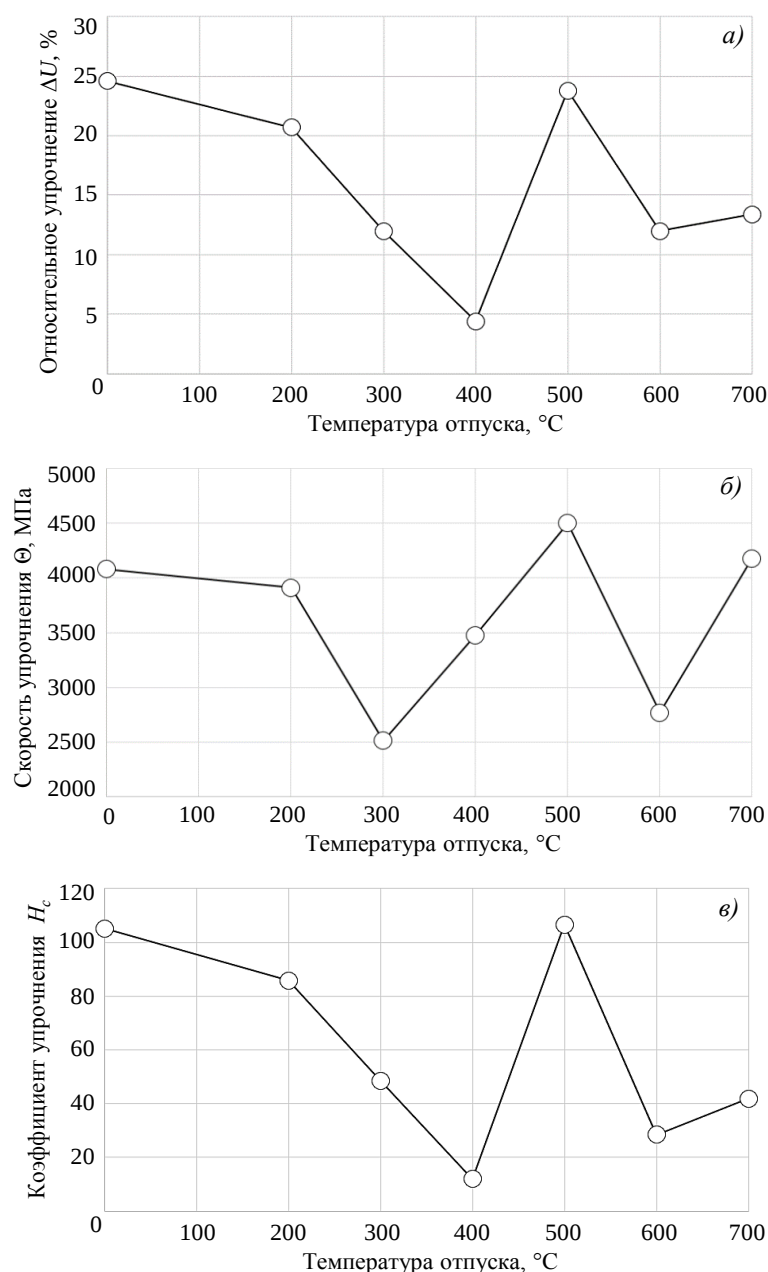


Рис. 4. Изменение относительного упрочнения ΔU (а), скорости упрочнения Θ (б) и коэффициента упрочнения H_c (в) для образцов из высокопрочной коррозионностойкой азотсодержащей стали 15X15N4AGM-III в зависимости от температуры отпуска

Наибольшей степенью относительного упрочнения (>23 %) обладают образцы после закалки и после отпуска при 500 °C (рис. 4, а). При этом обработка при температуре 200 °C приводит к незначительному снижению относительного упрочнения (до 20 %), что, вероятно, связано с уменьшением доли аустенита в структуре вследствие его фазового перехода с промежуточным выделением карбидов из твердого раствора. Это косвенно подтверждается значительным уменьшением доли относительного упрочнения при увеличении температуры отпуска до 400 °C, при которой начинается активное выделение карбидов из твердого раствора. При этом скорость упрочнения (рис. 4, б) при температуре отпуска 500 °C выше на 10 % по сравнению с закалкой без отпуска, что может объясняться напряженностью мартенсито-аустенитной структуры при закалке. Высокие показатели скорости упрочнения для температур отпуска 400

и 700 °С обусловлены малым интервалом деформации при статическом нагружении, а не высокой способностью к деформационному упрочнению.

Выявлен идентичный характер изменения показателя относительного упрочнения и введенного коэффициента деформационного упрочнения H_c , представляющего собой произведение показателей B и n . Для образцов без отпуска, а также подвергнутых термической обработке при 500 °С реализуется наибольшая степень упрочнения. Минимальный показатель упрочнения после термической обработки при 400 °С обусловлен протяженной упругой зоной и малым запасом пластичности в связи с дополнительным выделением мелкодисперсных фаз из твердого раствора. Воздействие данной температуры приводит к значительному снижению технологичности материала при обработке давлением.

Для температур обработки 600 и 700 °С положение значений индекса упрочнения ниже по сравнению с другими температурами обработки. Данный момент обуславливает необходимость рассмотрения обоих показателей при разработке технологических режимов термической обработки и холодной деформации цилиндрических заготовок тонкостенных труб из высокопрочной коррозионностойкой азотсодержащей стали 15X15H4АГМ-Ш.

С целью уменьшения износа технологического оборудования при холодной прокатке труб необходимо, чтобы материал обладал низкими показателями предела прочности и условного предела текучести. Обеспечиваемое в этом случае усилие позволяет пластически деформировать заготовку в направлении прокатки. При этом показатель деформационного упрочнения n для обеспечения технологичности материала должен превышать 0,2 с целью исключения ускоренного трещинообразования при холодной обработке давлением. В то же время наиболее интенсивное деформационное упрочнение может стать причиной ускоренного накопления дислокаций, что потребует увеличения усилий при прокатке и снизит технологичность конечной заготовки.

Температура обработки 600 °С при отпуске обеспечивает наименьший уровень прочностных характеристик, но при этом показатели B , n , ΔU и H_c немного выше, чем при 400 °С, что характеризует малый запас пластичности и низкую интенсивность деформационного упрочнения. Однако при холодной обработке давлением это может обеспечить более высокую технологичность материала, и рабочие узлы технологического оборудования будут изнашиваться в меньшей степени. С другой стороны, выделение карбидов и нитридов из твердого раствора при температуре обработки 500 °С может обеспечить более высокий уровень запаса пластичности и технологичности материала при обработке давлением. Для более корректного выбора режима обработки давлением необходимо провести прокатку цилиндрических заготовок и сравнительную оценку полученных результатов.

Заключения

Проведено экспериментальное исследование влияния температуры отпуска (200–700 °С) на параметры деформационного упрочнения высокопрочной коррозионностойкой азотсодержащей стали 15X15H4АГМ-Ш по упрощенной модели Джонсона–Кука. Установлено, что параметр A изменяется в диапазоне 1165–1820 МПа в зависимости от температуры отпуска, достигая максимума при 400 °С вследствие мартенситного ($\gamma \rightarrow \alpha$)-превращения и выделения карбидов хрома Cr_{23}C_6 .

Показано, что максимальные значения коэффициента упрочнения B (до 500 МПа) и показателя степени упрочнения n (до 0,23) реализуются при температуре отпуска 500 °С, что связано с интенсивным выделением карбидов и нитридов из твердого раствора.

При температуре отпуска 400 °С отмечены минимальные значения параметров деформационного упрочнения ($B = 120$ МПа, снижение на 76 %; n уменьшается на 47 %), что свидетельствует о низкой интенсивности деформационного упрочнения.

Установлено, что температура отпуска 600 °С обеспечивает оптимальное сочетание пониженных прочностных характеристик и умеренных показателей деформационного упрочнения, что может способствовать повышению технологичности при холодной прокатке труб и снижению износа оборудования.

Введенный коэффициент деформационного упрочнения $H_c = Bn$ продемонстрировал корреляцию с показателем относительного упрочнения ΔU , что подтверждает целесообразность его использования для комплексной оценки склонности материала к деформационному упрочнению.

Для окончательного выбора оптимального режима термической обработки перед холодной прокаткой необходимо провести промышленные испытания цилиндрических заготовок при температурах отпуска 500 и 600 °С с оценкой технологичности процесса и качества труб.

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. 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. научная школа для молодежи «Материаловедение и металлофизика легких сплавов». Екатеринбург, 2012. С. 3–4.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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). С. 18–27. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-18-27.
7. 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). С. 3–12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-3-12.
8. 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 (138). С. 41–52. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-41-52.
9. 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.
10. 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.
11. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Соппротивление пластической деформации металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1976. 488 с.

12. Данченко В.Н., Коликов А.П., Романцев Б.А., Самусев С.В. Технология трубного производства: учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности «Обработка металлов давлением». М.: Интермет Инжиниринг, 2002. 638 с.
13. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. М.: Metallurgiya, 1985. 376 с.
14. Королев А.А. Механическое оборудование прокатных цехов черной и цветной металлургии. М.: Metallurgiya, 1976. 542 с.
15. Целиков А.И., Смирнов В.В. Прокатные станы. М.: Metallurgizdat, 1958. 432 с.
16. Слоним А.З., Сонин А.Л. Машины для правки листового и сортового проката. М.: Машиностроение, 1975. 208 с.
17. Johnson G.R., Cook W.N. A constitutive model and data for metals subjected to large strains. High rates and high temperatures // *Proceedings of the 7th International symposium on ballistics*. Hague, 1983. P. 541–547.
18. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures // *Engineering Fracture Mechanics*. 1985. Vol. 21. No. 1. P. 31–48.
19. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Metallurgiya, 1986. 688 с.
20. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: Metallurgiya, 1973. 224 с.
21. Лукин Е.И., Ашмарин А.А., Банных И.О. и др. Исследование влияния величины обжатия при холодной прокатке на фазовый состав, текстуру и остаточные напряжения в стали 20X15АНЗМД2 // *Металлы*. 2023. № 6. С. 26–34. DOI: 10.31857/S0869573323060046.
22. Власов И.И., Севальнев Г.С., Ляхов А.А., Нефедкин Д.Ю. Исследование структуры и механических свойств Ni–Co–Cr энтропийного сплава в литом состоянии // *Труды ВИАМ*. 2024. № 12 (142). С. 18–30. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-18-30.
23. Hollomon J.H. Tensile deformation // *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1945. Vol. 162. P. 268–290.

References

1. Loginov Yu.N., Shimov G.V., Bushueva N.I. On the forecast of martensitic transformation development during mandrel-free drawing of austenitic steel pipes. *Chernye metally*, 2021, no. 4, pp. 25–31. DOI: 10.17580/chm.2021.04.05.
2. Priymak E.Yu., Stepanchukova A.V. Formation of steel structure for the production of drill pipes during friction welding. *XIII Int. sci.-tech. Ural School-Seminar of Young Scientists-Metallophysicists. II Int. Sc. School for Youth «Materials Science and Metal Physics of Light Alloys»*. Ekaterinburg, 2012, pp. 3–4.
3. 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.
4. Nikitin K.N., Osadchiy V.Ya., Safyanov A.V. et al. Development and implementation of import-substituting technology for the production of seamless bimetallic pipes for nuclear power engineering. *Stal*, 2017, no. 7, pp. 44–50.
5. Komarov A.I., Nikitin K.N., Safyanov A.V. et al. Improvement of the production technology of seamless bimetallic pipes for pipelines of nuclear power plants. *Chernye metally*, 2017, no. 9, pp. 68–73.
6. Eliseev E.A., Karpukhin S.D., Druzhinina M.E. The effect of nickel on the structure of the nitrided layer of low-carbon martensitic steels. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 1 (78), pp. 18–27. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 11, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-18-27.
7. 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), pp. 3–12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 11, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-3-12.

8. 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), pp. 41–52. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 11, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-41-52.
9. 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 tensiometry, texture and phase analysis. *Metally*, 2022, no. 6, pp. 66–72.
10. 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.
11. Polukhin P.I., Gun G.Ya., Galkin A.M. Resistance to Plastic Deformation of Metals and Alloys. Moscow: Metallurgiya, 1976, 488 p.
12. Danchenko V.N., Kolikov A.P., Romantsev B.A., Samusev S.V. *Pipe Production Technology: a textbook for university students majoring in Metal Forming*. Moscow: Intermet Inzhiniring, 2002, 638 p.
13. Korolev A.A. *Design and Calculation of Rolling Mill Machines and Mechanisms*. Moscow: Metallurgiya, 1985, 376 p.
14. Korolev A.A. *Mechanical Equipment of Rolling Shops of Ferrous and Non-Ferrous Metallurgy*. Moscow: Metallurgiya, 1976, 542 p.
15. Tselikov A.I., Smirnov V.V. *Rolling mills*. Moscow: Metallurgizdat, 1958, 432 p.
16. Slonim A.Z., Sonin A.L. *Machines for straightening sheet and rolled products*. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 208 p.
17. Johnson G.R., Cook W.N. A constitutive model and data for metals subjected to large strains. High rates and high temperatures. *Proceedings of the 7th International symposium on ballistics*. Hague, 1983, pp. 541–547.
18. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, vol. 21, no. 1, pp. 31–48.
19. Kolmogorov V.L. *Mechanics of Metal Forming*. Moscow: Metallurgiya, 1986, 688 p.
20. Tretyakov A.V., Zyuzin V.I. *Mechanical Properties of Metals and Alloys during Forming*. Moscow: Metallurgiya, 1973, 224 p.
21. Lukin E.I., Ashmarin A.A., Bannykh I.O. et al. Study of the Effect of Reduction Amount during Cold Rolling on the Phase Composition, Texture, and Residual Stresses in 20Kh15AN3MD2 Steel. *Metally*, 2023, no. 6, pp. 26–34. DOI: 10.31857/S0869573323060046.
22. Vlasov I.I., Sevalnev G.S., Lyahov A.A., Nefedkin D.Yu. Study of the structure and mechanical properties of Ni–Co–Cr entropy alloy in the cast state. *Trudy VIAM*, 2024, no. 12 (142), pp. 18–30. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 22, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-18-30.
23. Hollomon J.H. Tensile deformation. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 1945, vol. 162, pp. 268–290.

Информация об авторах

Севальнев Герман Сергеевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Дульнев Константин Владимирович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Обливанцев Кирилл Дмитриевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

German S. Sevalnev, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Konstantin V. Dulnev, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Kirill D. Oblivantsev, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 10.11.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.11.2025.
The article was submitted 10.11.2025; approved and accepted for publication after reviewing 28.11.2025.