

Научная статья

УДК 669.017.13

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-18-30

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ Ni–Co–Cr ЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА В ЛИТОМ СОСТОЯНИИ

И.И. Власов¹, Г.С. Севальнев¹, А.А. Ляхов¹, Д.Ю. Нефедкин¹

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

Аннотация. Проведены исследования микроструктуры, фазового состава, а также изменение механических свойств в зависимости от температуры испытания высокоэнтропийного сплава системы NiCoCrWNbAlTiReC после вакуумной индукционной выплавки. По результатам исследований и испытаний установлено, что структура сплава состоит из гранецентрированного кубического твердого раствора с избыточными фазами, с реализацией механизма деформационного упрочнения при температуре испытания 20 °С и структурно-фазовыми превращениями в интервале температур 900–1100 °С.

Ключевые слова: энтропийные сплавы, легирование, структура, фазовый состав, твердость, механические свойства

Для цитирования: 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). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-18-30.

Scientific article

STUDY OF THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Ni–Co–Cr ENTROPY ALLOY IN THE CAST STATE

I.I. Vlasov¹, G.S. Sevalnev¹, A.A. Lyahov¹, D.Yu. Nefedkin¹

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

Abstract. In the article were studied the microstructure, phase composition, and the change in mechanical properties depending on the test temperature of the high-entropy alloy in the NiCoCrWNbAlTiReC system after vacuum induction melting. According to the results of the studies and tests, it was established that the alloy structure consists of a FCC solid solution with excess phases, with the implementation of the mechanism of strain hardening at the test temperature of 20 °C and structural-phase transformations in the temperature range of 900–1100 °C.

Keywords: entropy alloys, alloying, structure, phase composition, hardness, mechanical properties

For citation: 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), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-18-30.

Введение

В последние десятилетия наблюдается повышенный интерес к разработке и исследованию новых материалов, которые благодаря формируемой структуре могут обеспечить уникальный комплекс физико-механических характеристик [1–5]. Одним из наиболее перспективных направлений является разработка и исследование энтропийных сплавов или сплавов с высокой энтропией смешения [6–10]. Эти новые материалы перспективны для реализации в современном материаловедении, что предполагает уникальные комбинации физико-механических свойств, которые делают их чрезвычайно важными для решения различных инженерных и технологических задач.

Высоко энтропийные сплавы – это многокомпонентные системы, в которых пять или более элементов смешивают в равных (или близких к равным) молярных соотношениях, что приводит к формированию простых кристаллических структур, типичных для чистых металлов или однородных сплавов с основным матричным компонентом. Высокая энтропия смешения в этих системах способствует образованию твердых растворов без значительного образования избыточных фаз и интерметаллидных соединений, что является ключевым фактором, определяющим их уникальные свойства [11–15].

Высокоэнтропийные сплавы демонстрируют достаточно высокую прочность наряду с высокой пластичностью, коррозионной стойкостью и термической стабильностью (рис. 1), что делает их перспективными материалами для использования в экстремальных условиях, таких как высокие температуры, агрессивные среды и высоконагруженные состояния [16]. Кроме того, тонкое регулирование состава и микроструктуры этих сплавов позволяет получать их свойства для конкретного применения, что еще больше расширяет возможности для потенциального использования.

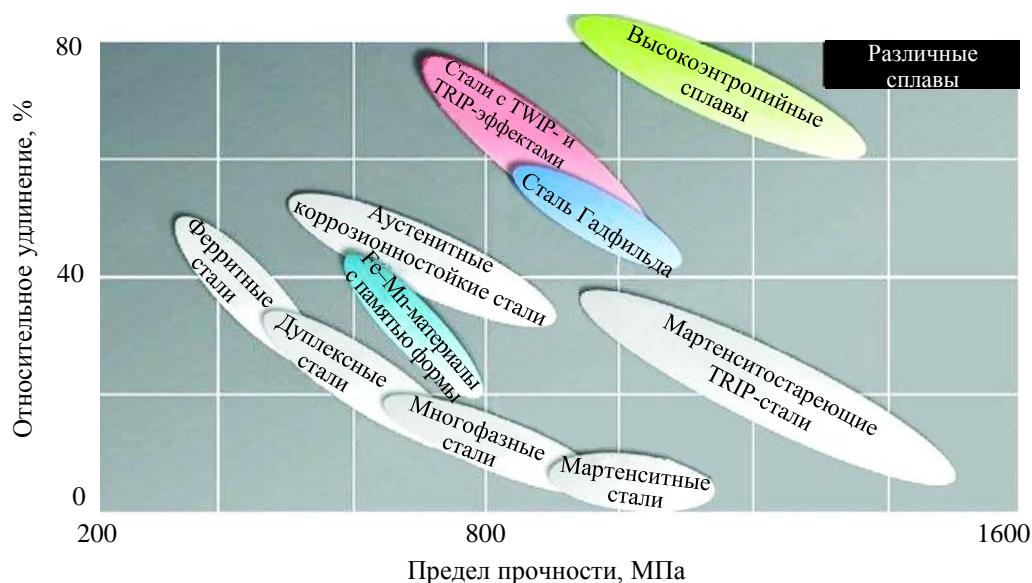


Рис. 1. Соотношение относительного удлинения и предела прочности в различных сталях и высокоэнтропийных сплавах [16]

Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в понимании свойств и поведения энтропийных сплавов, ряд фундаментальных вопросов и практических задач остаются нерешенными. В частности, более глубокое понимание взаимосвязи между составом, микроструктурой и свойствами этих материалов имеет решающее значение для их дальнейшего совершенствования и целенаправленного использования в конкретных узлах агрегатов машиностроительной отрасли.

В настоящее время за рубежом активно развивается направление по разработке и применению энтропийных сплавов для изготовления деталей, работающих при температурах >1000 °С. Одним из таких примеров является новый высокоэнтропийный сплав марки GRX-810 [16–18], который обеспечивает более высокие характеристики прочности и ползучести при температуре 1093 °С в сравнении с современными жаропрочными оксидно-упрочняемыми сплавами. Основное направление применения данного сплава – производство деталей методами аддитивных технологий для обеспечения равномерной структуры с высоким комплексом физико-механических характеристик и термической стабильности.

В данной работе проведены исследования структуры и механических свойств высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC при испытании в условиях высоких температур.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовали высокоэнтропийный сплав системы NiCoCrWNbAlTiReC. Содержание Ni, Co и Cr реализовано в эквиатомном состоянии, остальные компоненты присутствуют в качестве легирующих элементов. Общее содержание легирующих элементов для данного сплава составляет ~5 % (по массе). Выплавку слитков проводили в вакуумно-индукционной печи при нагреве в интервале температур 1500–1600 °С. Разлив жидкого расплава после выдержки при температуре расплавления производили в стальные трубы, температура которых соответствовала температуре окружающей среды. Масса полученного слитка после выплавки составила 17 кг. Для оценки изменения структуры и свойств, часть полученных заготовок подвергнута горячей деформации для получения квадратных прутков со стороной квадрата 30 мм. Степень обжатия заготовки и температурный интервал горячей деформации подбирали опытным путем.

Металлографический анализ структур высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC после выплавки и горячей деформации проводили методами световой микроскопии на оптическом конфокальном инвертированном микроскопе при увеличении $\times 50$ и электронной микроскопии в режиме вторичных и обратноотраженных электронов с использованием сканирующего электронного микроскопа при увеличениях $\times(500–1000)$. Анализ распределения легирующих элементов проводили с использованием приставки для микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) методом энергодисперсионного картирования при ускоряющем напряжении 15 кВ, расшифровку дифрактограмм – с использованием встроенного программного обеспечения.

Стехиометрический состав частиц оценивали по МРСА с применением формулы

$$\frac{Me_{ar}}{C_{ar}(N_{ar})} = \frac{\% Me_i / A_i}{\% C(\% N) / A_C(A_N)},$$

где $\% Me_i$ – содержание элемента в карбиде (нитриде), % (по массе); A_i – атомная масса i -го элемента; $\% C(\% N)$ – содержание углерода (азота) в карбиде (нитриде), % (по массе); $A_C(A_N)$ – атомная масса углерода (азота).

Идентификацию соединения и стехиометрического состава анализировали в соответствии с открытой базой данных по существованию химических соединений при нормальных условиях [19].

Электронно-микроскопические исследования проведены на просвечивающем электронном микроскопе с термополевым катодом Шоттки при ускоряющем напряжении 200 кВ. Съемку проводили в сканирующем режиме на светлопольном детекторе и высокоугловом кольцевом темнопольном детекторе, анализ химического состава структурных составляющих – методом энергодисперсионной спектроскопии.

Рентгеновскую съемку для определения фазового состава энтропийного сплава выполняли на дифрактометре с вертикально расположенным гониометром высокого разрешения модульной конструкции в $\text{Cu } K_\alpha$ -излучении. Расшифровку дифрактограмм проводили с применением встроенного программного обеспечения по общепринятым методикам.

Твердость полученных заготовок после выплавки и горячей деформации измеряли по методу Виккерса при нагрузке 1 кг (10 Н) в соответствии с ГОСТ 2999–75.

Механические свойства сплавов при комнатной температуре определяли на образцах, полученных из литых и горячедеформированных заготовок, в соответствии с ГОСТ 1497–84. Для определения механических свойств путем статического растяжения при повышенных температурах в интервале от 900 до 1200 °С использовали образцы, вырезанные из заготовок, в соответствии с ГОСТ 9651–84. Определение предела длительной прочности образцов сплавов проводили по ГОСТ 10145–81.

Для оценки степени деформационного упрочнения высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC использовали модель Джонсона-Кука [20, 21]:

$$\sigma = (A + B \cdot \varepsilon^n) \cdot (1 + C \cdot \ln(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0})) \cdot (1 - (\frac{T - T_0}{T_{\text{melt}} - T_0})^m),$$

где σ – напряжение материала, МПа; A – предел текучести материала, МПа; B – коэффициент упругости материала, характеризующий его способность сопротивляться деформации, МПа; C – коэффициент вязкости материала, характеризующий его поведение при высоких скоростях деформации, МПа; m – показатель степени скорости деформации, характеризующий ее влияние на поведение материала; n – показатель степени упругости материала, характеризующий его поведение при больших деформациях; T_{melt} , T_0 , T – температуры плавления материала, окружающей среды и материала соответственно, К; ε – эффективная пластическая деформация; $\varepsilon/\varepsilon_0$ – эффективная скорость пластической деформации.

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

Результаты и обсуждение

Металлографический анализ высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiRe позволил установить, что в нем формируется типичная разнотельная дендритная структура. По телу зерна сформирована гомогенная структура, по границам зерен образовались избыточные фазы (рис. 2). Изображение, полученное методом электронной микроскопии, показало, что в теле зерна образуются единичные избыточные фазы элементов с большой атомной массой, в то время как на границе реализуется сетка из таких фаз (рис. 3).

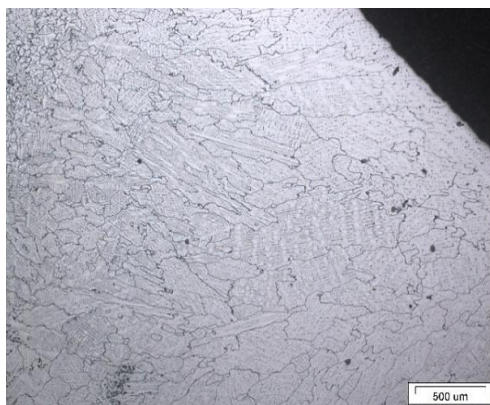


Рис. 2. Микроструктура ($\times 50$) энтропийного сплава системы NiCoCrWNbAlTiRe после выплавки

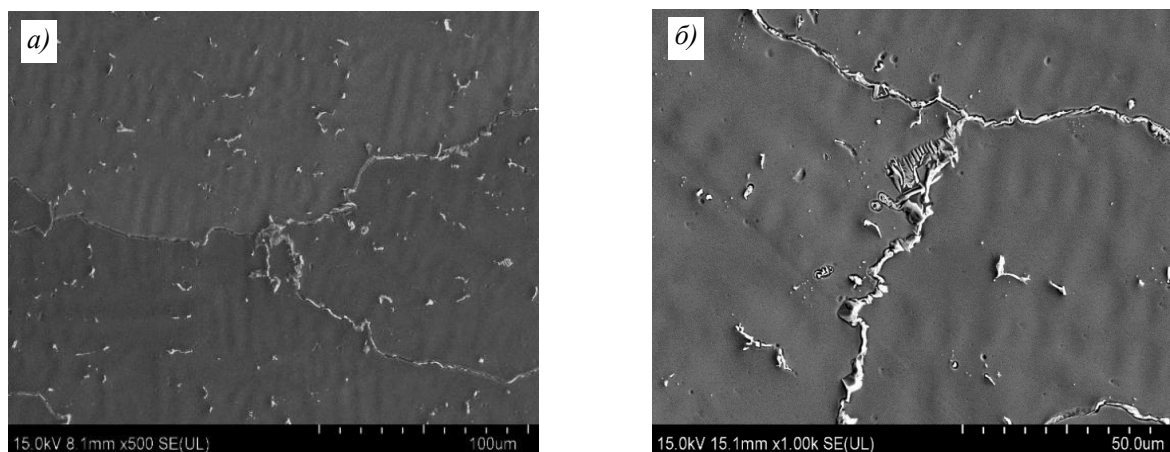


Рис. 3. Изображение структуры (*a* – $\times 500$; *б* – $\times 1000$) во вторичных электронах высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCrRe

По результатам энергодисперсионного картирования участка стыка границ зерен установлено (рис. 4), что распределение основных элементов системы Ni–Co–Cr в структуре произошло равномерно без химического взаимодействия с другими компонентами. Избыточными фазами в теле и по границам зерен в данном случае являются комплексные карбиды (Nb, Ti)C (рис. 5).

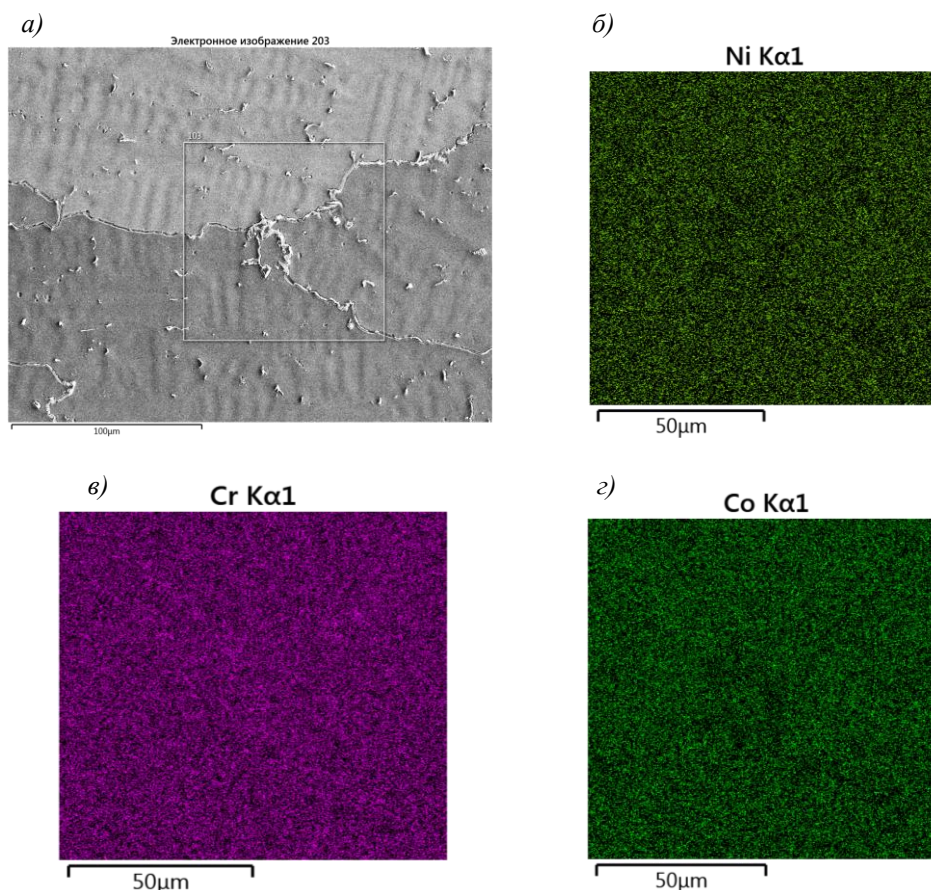


Рис. 4. Электронное изображение микроструктуры энтропийного сплава на базе системы легирования NiCoCrWNbAlTiCrRe (*a* – $\times 500$) и энергодисперсионные карты элементов: *б* – Ni; *в* – Cr; *г* – Co

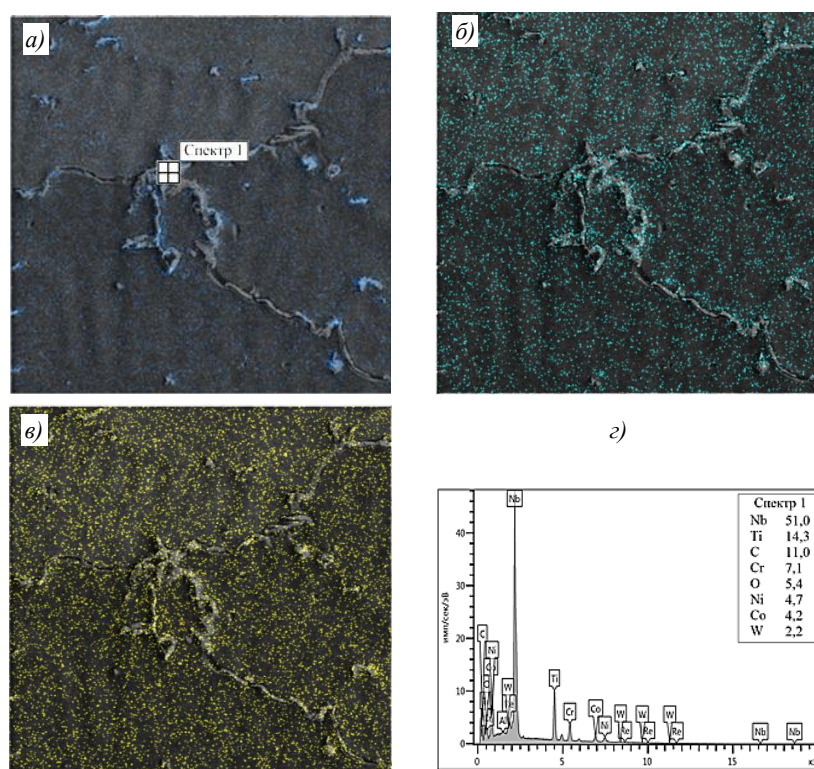


Рис. 5. Элементное энергодисперсионное картирование участка структуры по элементам С (а), Nb (б), Ti (в) и характеристическое рентгеновское излучение спектра комплексного карбида (Nb, Ti)C

Помимо комплексных карбидов ниобия, рентгенофазовым анализом дополнительно зафиксированы карбиды на основе вольфрама WC (рис. 6). Основными рефлексами на дифрактограмме являются рефлексы гранецентрированного кубического (ГЦК) твердого раствора, а также с низкой интенсивностью зафиксированы карбиды (Nb, Ti)C и WC. Для подтверждения наличия данных карбидов в структуре высокоэнтропийного сплава дополнительно проведена просвечивающая электронная микроскопия, которая подтвердила наличие избыточной фазы, содержащей вольфрам, однако наибольшую долю в данном соединении составляет хром (рис. 7). В соответствии с базой существования химических соединений в данном случае это, предположительно, может быть соединение $Cr_{22}WC_6$.

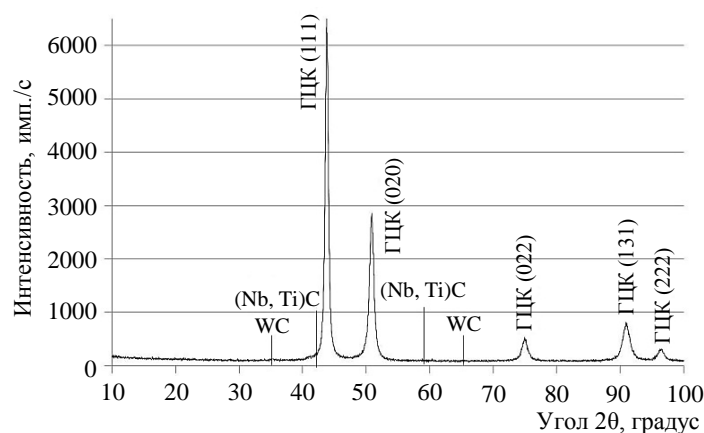


Рис. 6. Дифрактограмма высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCrRe

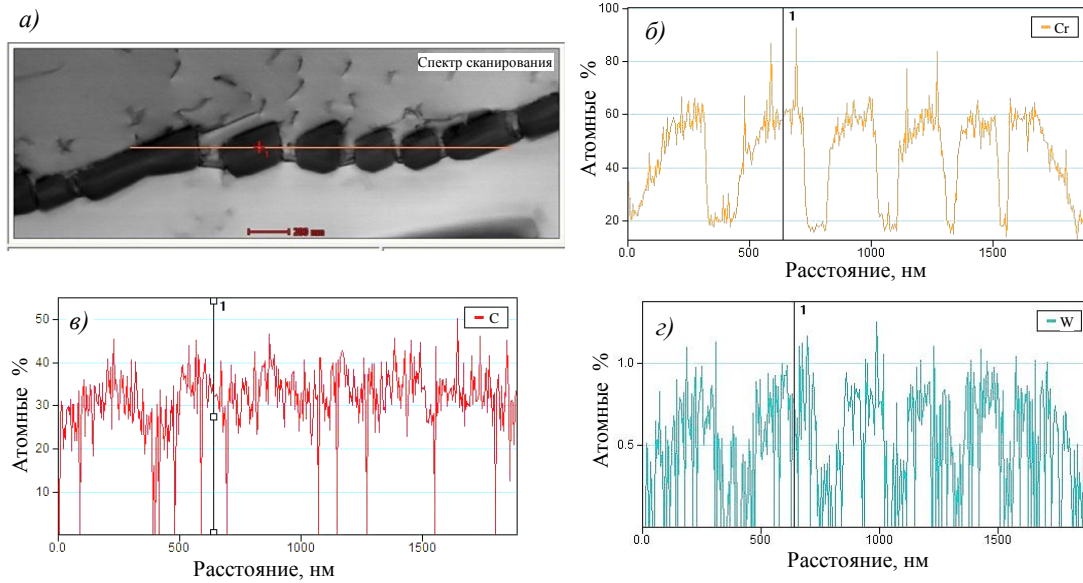


Рис. 7. Исследуемый методом просвечивающей электронной микроскопии участок структуры высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCr (a) и характеристические спектры излучения элементов Cr (б), С (в) и W (г)

Диаграммы после испытаний на статическое растяжение при различных температурах высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCr представлены на рис. 8. Характер формирования кривой растяжения при температуре испытания 20 °С (рис. 8, а) аналогичен кривой растяжения комплексно-легированных сталей, обладающих TRIP-эффектом – в результате деформации происходит упрочнение за счет сдвигового ($\gamma \rightarrow \alpha'$)-превращения, а также за счет механизма двойникования и реализации высокого уровня пластических характеристик [22, 23]. При последующем увеличении температуры до 900–1100 °С данный эффект отсутствует, однако при температурах 1000 и 1100 °С образуется зуб текучести (рис. 8, б), что свидетельствует о перераспределении дислокаций и активном протекании структурно-фазовых превращений.

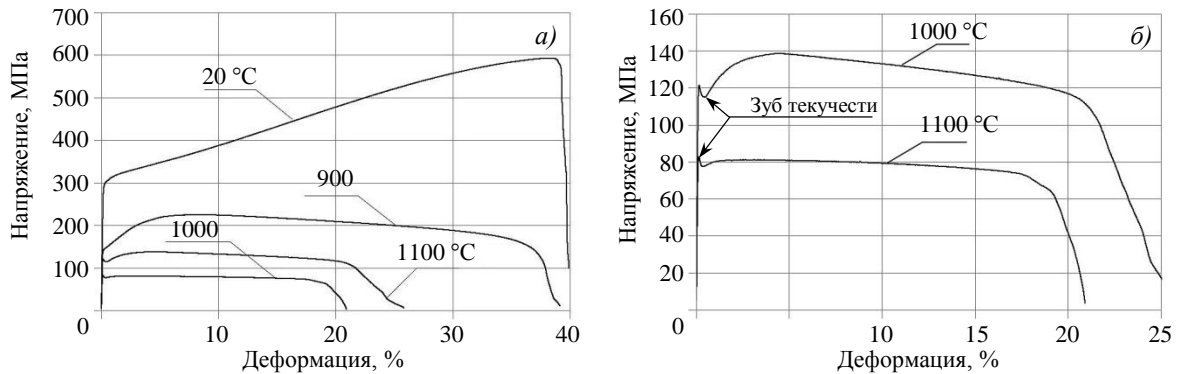


Рис. 8. Диаграммы растяжения образцов из высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCr при температурах 20, 900, 1000 и 1100 °С (a) и 1000 и 1100 °С (б)

Анализ изменения механических свойств при различных температурах испытаний показал типичное снижение механических свойств при увеличении температуры (рис. 9, а, б), однако после температуры 1000 °С происходит практически линейное снижение предела прочности и предела текучести со значительным уменьшением

удлинения – с 48 до 32 % (рис. 9, в), что характерно для процесса ускоренного накопления дислокаций при деформации. Исследования изменения твердости образцов (рис. 9, г) после испытаний косвенно подтвердили, что в температурном диапазоне 900–1000 °С происходят структурно-фазовые изменения с выделением фаз и последующим их растворением при температуре 1100 °С.

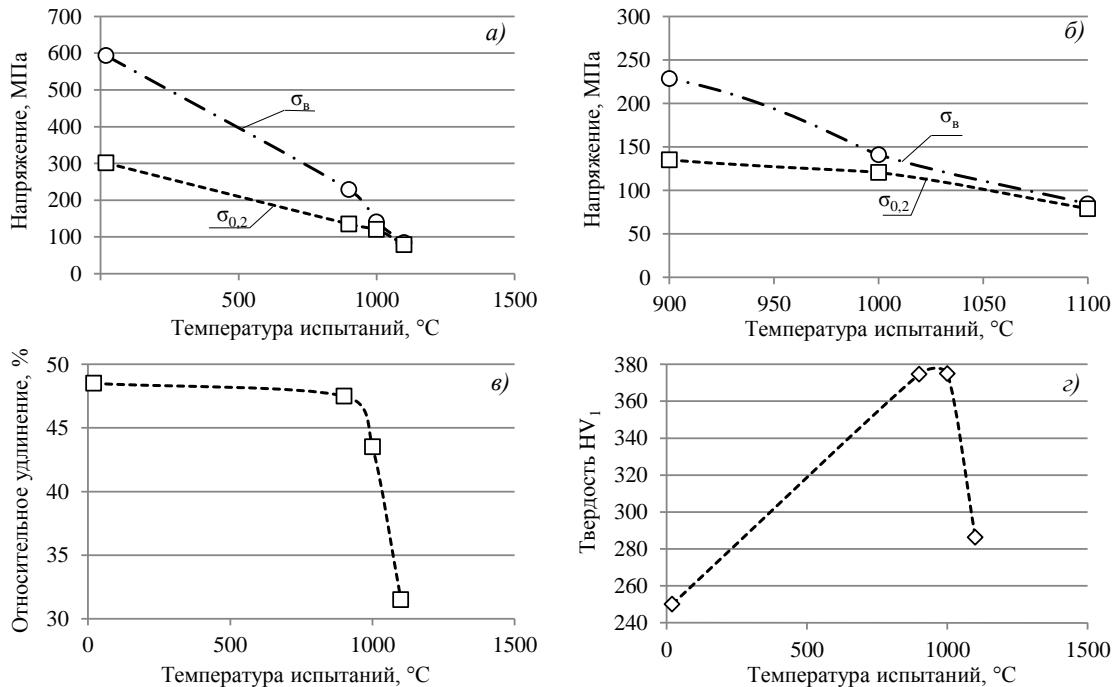


Рис. 9. Изменение механических свойств σ_B и $\sigma_{0,2}$ (а, б), δ (в), HV₁ (г) при различных температурах испытаний образцов из высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCrE

Для обеспечения высокой работоспособности изделия при высоких температурах жаропрочный сплав должен обладать высокой длительной прочностью, в связи с чем проведены испытания высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC при температуре 1100 °С с изменением прикладываемого напряжения (рис. 10). По результатам испытаний установлено, что при напряжениях 40 и 50 МПа разрушение образца наступает через 25 мин испытания. Снижение напряжения до 30 МПа увеличивает время до разрушения до 4 ч, а уменьшение до 20 МПа привело к значительному увеличению времени до разрушения, в результате чего сплав выстоял 48 ч. В конечном итоге базу испытаний 100 ч выдержал сплав при напряжении 10 МПа и был снят без разрушения.

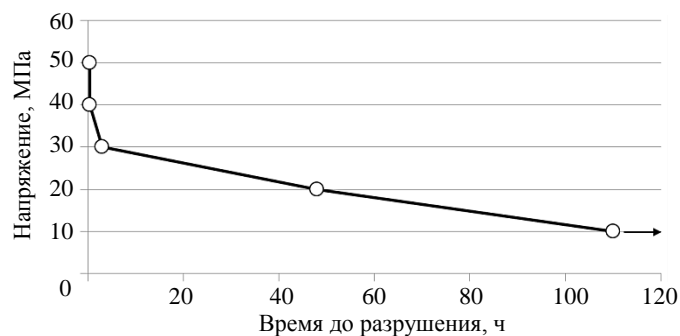


Рис. 10. Зависимость времени до разрушения от прикладываемого напряжения при температуре испытания 1100 °С образцов из высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCrE

В соответствии с моделью Джонсона-Кука (рис. 11), из анализа показателей, зависящих от скорости и степени деформации, установлено следующее:

- скорость упрочнения материала (B) растет с увеличением температуры до $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, а далее снижается, что может свидетельствовать о протекании структурно-фазовых превращений в данном температурном интервале ($900\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$);

- степень упрочнения с ростом температуры снижается, что является типичным механизмом для многих сплавов;

- зависимость и степень зависимости предела текучести от скорости деформации также косвенно подтверждают наличие структурно-фазовых превращений, что требует дальнейших исследований.

Расчет коэффициентов по приведенной модели для температуры $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ невозможен в связи с характерным видом кривой растяжения.

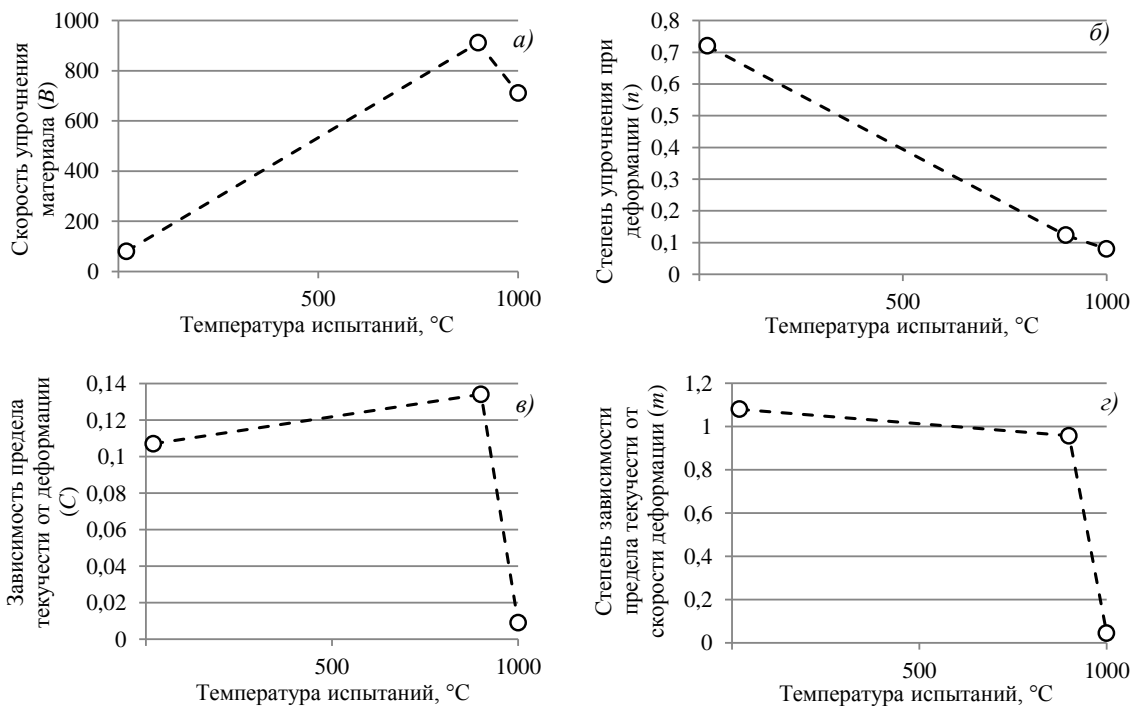


Рис. 11. Рассчитанные коэффициенты по модели Джонсона–Кука для образцов из высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCrRe при различных температурах испытаний: $a - B$; $б - n$; $в - C$; $з - m$

Анализ полученных результатов показывает, что литой высокоэнтропийный сплав NiCoCrWNbAlTiReC обладает достаточно высокими характеристиками и при этом у него отмечен эффект деформационного упрочнения при комнатной температуре, а в температурном интервале $900\text{--}1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ реализуются структурно-фазовые превращения, которые требуют углубленных исследований. Сплав также имеет потенциал для увеличения комплекса свойств путем горячей деформации и термической обработки, что необходимо изучить в дальнейшем.

Заключения

Одна из ключевых стратегий современного материаловедения – это поиск материалов с уникальным комплексом характеристик, которые, в свою очередь, способны обеспечить повышение тактико-технических и снижение массогабаритных характеристик перспективных изделий. Разработка и исследование новых материалов, таких как

высокоэнтропийные сплавы, имеет важное значение при реализации стратегических направлений развития.

В данной работе проведены исследования структуры, фазового состава и механических свойств высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC и установлено, что:

– в структуре высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC формируется равномерная структура на основе элементов Ni, Cr и Co; в теле зерна образуются единичные включения комплексных карбидов (Nb, Ti)C, а по границам зерен – карбиды хрома предположительной стехиометрии Cr₂₂WC₆ в виде сетки с дополнительными включениями;

– при испытании на статическое растяжение при температуре 20 °С зафиксировано деформационное упрочнение, а изменение механических свойств показало наличие структурно-фазовых превращений в температурном интервале 900–1100 °С;

– в литом состоянии пределом длительной прочности на базе 100 ч при температуре 1100 °С является напряжение 10 МПа;

– рассчитанные по модели Джонсона–Кука коэффициенты также подтверждают наличие структурно-фазовых превращений в температурном интервале 900–1100 °С.

Полученные данные позволяют сделать вывод, что высокоэнтропийный сплав NiCoCrWNbAlTiReC имеет потенциал для повышения физико-механических характеристик путем горячей деформации и термической обработки.

Работы (исследования) выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-11-2021-085 от 22.12.2021).

Список источников

1. Севальнев Г.С., Коробова Е.Н., Дворецков Р.М. и др. Влияние степени дисперсности структуры мартенсита и размера карбидной фазы на фрикционное взаимодействие в условиях сухого трения скольжения высокоуглеродистой комплексно-легированной стали // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-15-26.
2. Севальнев Г.С. Бериллийсодержащие стали – перспективный материал с высоким уровнем физико-механических свойств // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.
3. Капланский Ю.Ю., Мазалов П.Б. Мировые тенденции развития тугоплавких высокоэнтропийных сплавов для теплонагруженных узлов аэрокосмической техники (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (108). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-30-42.
4. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Мин П.Г., Вадеев В.Е., Крамер В.В. Исследование и разработка технологических параметров плавки в вакууме коррозионностойких жаропрочных никелевых сплавов // Металлург. 2021. № 2. С. 62–67.
5. Yeh J.-W., Chen Y.-L., Lin S.-J., Chen S.-K. High-entropy alloys – a new era of exploitation // Materials Science Forum. 2007. Vol. 560. P. 1–9. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.560.1.
6. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // Materials Science and Engineering: A. 2004. Vol. 375–377. P. 213–218. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
7. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys // Entropy. 2014. Vol. 16. No. 9. P. 4749–4768.
8. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J. et al. Nanostructured highentropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes // Advanced Engineering Materials. 2004. Vol. 6. P. 299–303. DOI: 10.1002/adem.200300567.

9. Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys // *Annales de Chimie-Science des Materiaux*. 2006. Vol. 31. P. 633–648. DOI: 10.3166/acsm.31.633-648.
10. Yeh J.-W., Chen S.-K., Gan J.-Y. et al. Formation of simple crystal structures in Cu–Co–Ni–Cr–Al–Fe–Ti–V alloys with multiprincipal metallic elements // *Metallurgical and Materials Transactions: A*. 2004. Vol. 35. P. 2533–2536. DOI: 10.1007/s11661-006-0234-4.
11. Singh S., Wanderka N., Glatzel U., Banhart J. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi highentropy alloy // *Acta Materialia*. 2011. Vol. 59. P. 182–190. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.09.023.
12. Трофименко Н.Н., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Проблемы создания и перспективы использования жаропрочных высокоэнтروпийных сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8.
13. Трофименко Н.Н., Ефимочкин И.Ю., Осин И.В., Дворецков Р.М. Исследование возможности получения высокоэнтропийного сплава VNbMoTaW путем смешивания элементарных порошков с дальнейшим компактированием методом гибридного искрового плазменного спекания // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 12–20. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-12-20.
14. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys // *Nature Reviews Materials*. 2019. Vol. 4. P. 515–534. DOI: 10.1038/s41578-019-0121-4.
15. Zhang Y., Zhou Y.J., Lin J.P. et al. Solid-solution phase formation rules for multi-component alloys // *Advanced Engineering Materials*. 2018. Vol. 10 (6). P. 534–538. DOI: 10.1002/adem.200700240.
16. Smith T. GRX-810: NASA High Temperature Alloy Development for Additive Manufacturing // *Lawrence Livermore National Lab Seminar*. 2022. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20220013032> (дата обращения: 25.07.2024).
17. Smith T. High Temperature Alloy Development for AM–GRX-810 // *Bridging the Gap Webinar: Emerging Additive Manufacturing Materials*. 2023. URL: ntrs.nasa.gov/citations/20230010486 (дата обращения: 25.07.2024).
18. NASA’s New Material Built to Withstand Extreme Conditions. URL: <https://www.nasa.gov/aeronautics/nasas-new-material-built-to-withstand-extreme-conditions/> (дата обращения: 25.07.2024).
19. The Materials Project. URL: next-gen.materialsproject.org (дата обращения: 25.07.2024).
20. 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 Intern. symp. on ballistics* (Hague, Netherlands, Apr. 19–21, 1983). Hague: Roy. Inst. of Engrs in the Netherlands, 1983. P. 541–547.
21. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures // *Engineering fracture mechanism*. 1985. Vol. 21. No. 1. P. 31–48.
22. 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.
23. Севальнев Г.С., Громов В.И., Дульнев К.В., Севальнева Т.Г. Контактная выносливость азотистых аустенито-мартенситных сталей с различным механизмом упрочнения // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 2 (75). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.

References

1. Sevalnev G.S., Korobova E.N., Dvoreckov R.M., Doroshenko A.V., Muzafarova S.-V.R., Samoilova I.I. Influence of the degree of martensitic structure dispersion and size of carbide phase on the frictional interaction under conditions of dry sliding friction of high-carbon complex alloy steel. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 25, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-15-26.
2. Sevalnev G.S. Beryllium-containing steels – perspective material with a high level of physical and mechanical properties. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.

3. Kaplanskii Yu.Yu., Mazalov P.B. World trends in the development of refractory high-entropy alloys for heat-loaded units of aerospace technics (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-30-42.
4. Kablov E.N., Sidorov V.V., Min P.G., Vadeev V.E., Kramer V.V. Research and development of technological parameters for vacuum melting of corrosion-resistant heat-resistant nickel alloys. *Metallurg*, 2021, no. 2, pp. 62–67.
5. Yeh J.-W., Chen Y.-L., Lin S.-J., Chen S.-K. High-entropy alloys – a new era of exploitation. *Materials Science Forum*, 2007, vol. 560, pp. 1–9. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.560.1.
6. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 375–377, pp. 213–218. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
7. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys. *Entropy*, 2014, vol. 16, no. 9, pp. 4749–4768.
8. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J. et al. Nanostructured highentropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 2004, vol. 6, pp. 299–303. DOI: 10.1002/adem.200300567.
9. Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys. *Annales de Chimie-Science des Materiaux*, 2006, vol. 31, pp. 633–648. DOI: 10.3166/acsm.31.633-648.
10. Yeh J.-W., Chen S.-K., Gan J.-Y. et al. Formation of simple crystal structures in Cu–Co–Ni–Cr–Al–Fe–Ti–V alloys with multiprincipal metallic elements. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2004, vol. 35, pp. 2533–2536. DOI: 10.1007/s11661-006-0234-4.
11. Singh S., Wanderka N., Glatzel U., Banhart J. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi highentropy alloy. *Acta Materialia*, 2011, vol. 59, pp. 182–190. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.09.023.
12. Trofimenko N.N., Efimochkin I.Yu., Bolshakova A.N. Problems of creation and prospects for the use of heat-resistant high-entropy alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8.
13. Trofimenko N.N., Efimochkin I.Yu., Osin I.V., Dvoretsov R.M. The research of the possibility of high entropy alloy VNbMoTaW production by mixing elementary powders with further hybrid spark plasma sintering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 12–20. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-12-20.
14. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys. *Nature Reviews Materials*, 2019, vol. 4, pp. 515–534. DOI: 10.1038/s41578-019-0121-4.
15. Zhang Y., Zhou Y.J., Lin J.P. et al. Solid-solution phase formation rules for multi-component alloys. *Advanced Engineering Materials*, 2018, vol. 10 (6), pp. 534–538. DOI: 10.1002/adem.200700240.
16. Smith T. GRX-810: NASA High Temperature Alloy Development for Additive Manufacturing. *Lawrence Livermore National Lab Seminar*, 2022. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20220013032> (accessed: July 25, 2024).
17. Smith T. High Temperature Alloy Development for AM–GRX-810. *Bridging the Gap Webinar: Emerging Additive Manufacturing Materials*. 2023. Available at: ntrs.nasa.gov/citations/20230010486 (accessed: July 25, 2024).
18. *NASA's New Material Built to Withstand Extreme Conditions*. Available at: <https://www.nasa.gov/aeronautics/nasas-new-material-built-to-withstand-extreme-conditions/> (accessed: July 25, 2024).
19. *The Materials Project*. Available at: next-gen.materialsproject.org (accessed: July 25, 2024).
20. 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 Intern. symp. on ballistics* (Hague, Netherlands, Apr. 19–21, 1983). Hague: Roy. Inst. of Engrs in the Netherlands, 1983, pp. 541–547.
21. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures. *Engineering fracture mechanism*, 1985, vol. 21, no. 1, pp. 31–48.

22. Lukin E.I., Ashmarin A.A., Bannykh I.O. et al. Study of the influence of the reduction value 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.
23. Sevalnev G.S., Gromov V.I., Dulnev K.V., Sevalneva T.G. Contact endurance of nitrogenous austenitic-martensitic steels with different hardening mechanism. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.

Информация об авторах

Власов Иван Игоревич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Ляхов Антон Алексеевич, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Нефедкин Данила Юрьевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ivan I. Vlasov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Anton A. Lyakhov, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Danila Yu. Nefedkin, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 16.08.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 04.09.2024.
The article was submitted 16.08.2024; approved and accepted for publication after reviewing 04.09.2024.