

Научная статья

УДК 669.017.15

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-3-12

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ СИСТЕМЫ Fe–Cr–Ni–Co–Mo ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ОБРАБОТКИ

Г.С. Севальнев¹, В.С. Климов¹, И.И. Власов¹, Т.А. Мазалова¹

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

Аннотация. Представлены результаты исследований механических свойств образцов из высокопрочной коррозионностойкой мартенситостареющей стали системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo, полученных методом селективного лазерного сплавления. Проведен сравнительный анализ механических свойств при температуре окружающей среды (20 °C) и при повышенных температурах (500 и 550 °C) образцов, синтезированных вдоль оси Z и плоскости XY, а также механически обработанных образцов и образцов без механической обработки рабочей поверхности.

Ключевые слова: мартенситостареющая сталь, аддитивные технологии, селективное лазерное сплавление, механическая обработка поверхности, направление синтезирования, механические свойства

Для цитирования: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-3-12.

Scientific article

STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF Fe–Cr–Ni–Co–Mo STEEL 3D-PRINTED SAMPLES AFTER VARIOUS TYPES OF PROCESSING

G.S. Sevalnev¹, V.S. Klimov¹, I.I. Vlasov¹, T.A. Mazalova¹

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 paper presents the results of mechanical properties studies of samples made from high-strength corrosion-resistant maraging steel of the Fe–Cr–Ni–Co–Mo system, obtained by selective laser melting. A comparative analysis of mechanical properties at ambient temperature (20 °C) and at elevated temperatures (500 and 550 °C) of 3D-printed samples along the Z axis and along the XY plane, as well as mechanically processed samples and samples without mechanical processing of the working surface was carried out.

Keywords: maraging steel, additive technologies, selective laser melting, mechanical surface treatment, direction of 3D-printing, mechanical properties

For citation: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-3-12.

Введение

В настоящее время теплонагруженные детали силовых установок, работающие при температурах до 600 °С в условиях воздействия избыточного давления и агрессивных сред, изготавливают из жаропрочных дисперсионно-твердеющих мартенситных, мартенситоферритных и мартенситостареющих сталей, в том числе марок 08X14H5M2ДЛ, 15X12ВНМФ и 31X19H9МВБТ [1–7].

В большинстве случаев для работоспособности узлов силовых установок используют детали различной нестандартной геометрической формы с небольшой толщиной стенок. Производство тонкостенных сложнопрофильных деталей по традиционным технологиям зачастую невозможно либо чрезвычайно дорого по причине многостадийности – большой длительности и сложности процесса, включающего литье заготовок, многоступенчатую термическую обработку для достижения требуемого уровня механических свойств материала и токарно-фрезерную обработку заготовки до заданных геометрических размеров конечного изделия. При этом неизбежным остается высокий процент выбраковки, вызванный дефектами литья и деформациями тонкостенных изделий при токарно-фрезерной обработке, что дополнительно снижает экономические показатели производства. Все это обуславливает необходимость перехода к передовым цифровым производственным процессам изготовления подобных деталей, в связи с чем наиболее актуальным направлением получения заготовок для данных деталей является синтезирование материала из металлопорошковых композиций.

В свою очередь, применение аддитивных технологий обеспечивает экономическую эффективность производства деталей из различных марок сталей в связи с сокращением операций технологического процесса, повышением коэффициента использования металла, а также получением высокого уровня механических характеристик конечного изделия [8–10].

Для обеспечения работоспособности узлов силовых установок предложена высокопрочная мартенситостареющая коррозионностойкая сталь системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo, обладающая высоким уровнем механических характеристик как при 20 °С, так и при повышенных температурах до 500 °С. Упрочнение стали происходит по механизму твердорастворного упрочнения вследствие образования мартенсита при закалке и последующего дисперсионного твердения за счет избыточных и интерметаллидных фаз [11, 12].

В интервале температур >500 °С для сталей таких систем легирования реализуются механизмы разупрочнения путем образования аустенита и коагуляции упрочняющих частиц. Конечное упрочнение высокопрочной мартенситостареющей коррозионностойкой стали системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo происходит за счет старения в температурном интервале 400–600 °С. В связи с этим исследование процессов изменения структуры и механических свойств при температуре >500 °С является одной из актуальных задач.

Технологические параметры процесса синтезирования материала, такие как направление выращивания, градиент распределения температур подложки и поверхностного слоя при выращивании, плотность энергии при синтезировании и стратегия сканирования, оказывают значительное влияние на формирование конечной структуры и уровня механических свойств деталей [13, 14].

В работах [15, 16] рассмотрено влияние заключительной механической обработки на некоторые характеристики материала, однако на коррозионностойких мартенситостареющих сталях особенности влияния на конечный уровень свойств не рассматривались.

Исходя из вышеперечисленных факторов, целью данной работы являлась оценка влияния ориентации детали на плите построения и механической обработки рабочей поверхности образцов на механические свойства синтезированной по технологии селективного лазерного сплавления высокопрочной мартенситостареющей

коррозионностойкой стали системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo, а также исследование микроструктуры и механических характеристик при повышенных температурах.

Материалы и методы

Изготовление металлопорошковой композиции мартенситостареющей коррозионностойкой стали проводили на промышленном тигельном атомайзере с максимальной температурой нагрева 1700 °С и давлением до $6,67 \cdot 10^{-1}$ Па. В качестве исходного материала использовали литые прутковые заготовки, изготовленные в вакуумной индукционной печи.

Контроль химического состава литых прутковых заготовок проводили методами атомно-эмиссионной спектроскопии (определение Ni, Cr, Co, Mo, Mn, Nb, Si), восстановительного плавления для определения O и N и сжигания образца в токе кислорода для определения S и S в соответствии с ГОСТ 12344–2003, ГОСТ 12345–2001, ГОСТ 17745–90 и ГОСТ Р 55079–2012.

Изготовленные литые прутковые заготовки использовали для получения металлопорошковой композиции из высокопрочной коррозионностойкой стали фракции 10–63 мкм. Схема изготовления металлопорошковой композиции целевой фракции включает подготовку литых шихтовых заготовок и их загрузку в тигель, плавку и распыление расплава инертным газом, выгрузку порошка, рассев на фракции и аэродинамическую сепарацию, контроль качества.

Гранулометрический состав изготовленных партий металлопорошковых композиций определяли на лазерном анализаторе частиц по ГОСТ 8.777–2011 методом дифракции лазерного излучения в жидкости.

Синтез образцов из высокопрочной коррозионностойкой стали проводили в среде азота на аддитивной установке, оснащенной двумя YLR-волоконными лазерами мощностью по 400 Вт каждый.

Термодинамические расчеты для оценки фазового состава проводили в программном обеспечении на базе метода Calculation Phase Diagrams (CalPhaD). В качестве входных данных использовали химический состав, а также базу данных по термодинамическому анализу сплавов на основе железа.

Определение шероховатости поверхности образцов проводили с применением профилометра.

Для оценки влияния механической обработки рабочей поверхности образцов, синтезированных вдоль оси Z и плоскости XY, на механические свойства высокопрочной мартенситостареющей коррозионностойкой стали системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo проводили испытания на статическое растяжение при температурах 20, 500 и 550 °С на сервогидравлической разрывной машине в соответствии с ГОСТ 1497–2023 и ГОСТ 9651–84. Скорость перемещения траверсы при испытании составила 5 мм/мин. Объемную долю мартенсита после испытаний оценивали по количеству магнитной фазы, определяемой методом Штеблейна по намагниченности насыщения $4\pi J_s$ в установке баллистического типа. Расчет объемного содержания мартенсита проводили по методике, разработанной в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Испытания на длительную прочность цилиндрических образцов проводили при напряжении 480 МПа и температуре 550 ± 5 °С на базе 100 ч, испытания на ползучесть с базой 100 ч – при температуре 500 ± 5 °С и напряжении 140 МПа с допуском на деформацию 0,2 %. Ударную вязкость определяли на образцах с U-образным концентратором напряжений в соответствии с ГОСТ 9454–78.

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

Результаты и обсуждение

После распыления литой прутковой заготовки проведен анализ гранулометрического состава для контроля возможности применения металлопорошковой композиции в аддитивном производстве. На рис. 1 представлено распределение частиц по размерам полученной металлопорошковой композиции высокопрочной коррозионностойкой стали системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo, из данных которого видно, что при содержании целевой фракции на уровне ~90 % и нормальном распределении фракции в интервале 10–63 мкм параметр D_{50} составляет 31,5 мкм (см. таблицу).

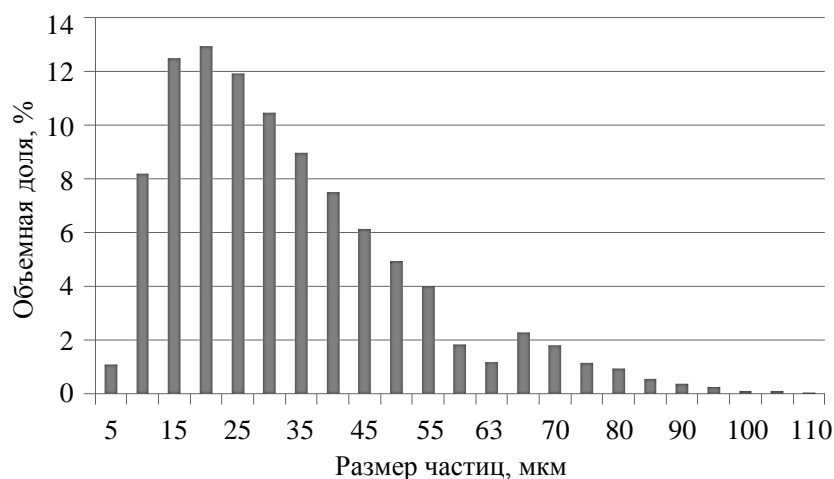


Рис. 1. Гистограмма распределения частиц металлопорошковой композиции из стали по размерам

Гранулометрический состав металлопорошковой композиции из стали фракции 10–63 мкм

Средний размер частиц, мкм	D_{10}	D_{50}	D_{90}	Содержание частиц, %, размером, мкм		
	мкм			<10	10–63	>63
37,9	15,3	31,5	62	1,1	91,79	7,11

Термодинамический анализ химического состава на базе метода CalPhaD, проведенный в интервале температур 400–1200 °С, позволил оценить распределение фазовых составляющих в структуре стали в процессе термической обработки (рис. 2). Высокопрочная коррозионностойкая сталь системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo относится к мартенситостареющему классу и после закалки обладает преимущественно мартенситной структурой. Последующее старение при температурах >400 °С приводит к образованию σ -фазы (Fe–Cr–Mo), которая оказывает положительное влияние на прочностные характеристики, но при этом отрицательно влияет на относительное удлинение и ударную вязкость. Помимо этого, в структуре образуются интерметаллидные μ -фаза (Fe_7Mo_6) и Ni_3Nb (за счет микролегирования ниобием), мелкодисперсные карбиды хрома $Cr_{23}C_6$, которые также оказывают положительное влияние на уровень механических свойств.

В соответствии с проведенными термодинамическими расчетами, анализом научно-технической литературы [17] и опытом НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в области разработки мартенситостареющих сталей [6, 11] выбрана термическая обработка для высокопрочной коррозионностойкой стали системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo, состоящая из закалки из области температур с достаточным растворением избыточных и интерметаллидных фаз и последующего старения с реализацией определенного соотношения карбидной, σ - и μ -фаз. Такая термическая обработка обеспечивает достаточно

высокий уровень механических свойств стали. После полного цикла термической обработки микроструктура образцов состояла из мартенсита, остаточного аустенита и интерметаллидов.

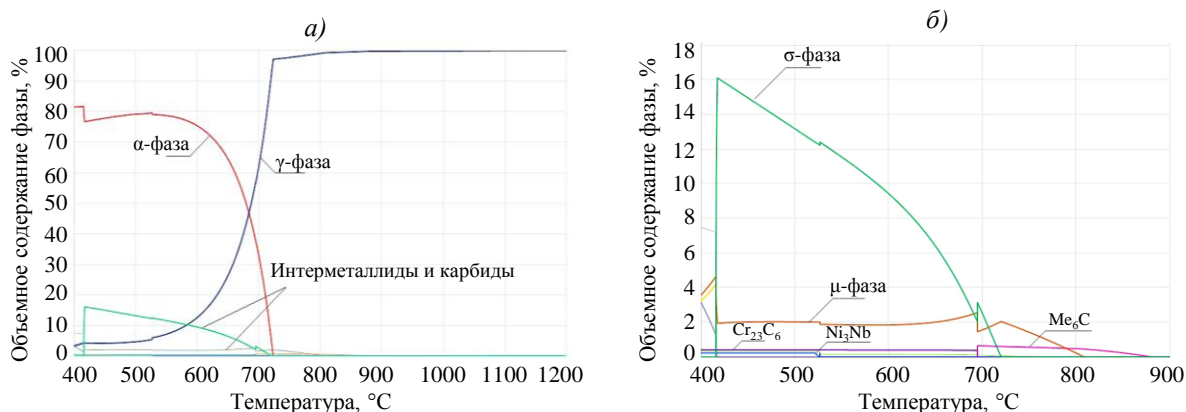


Рис. 2. Термодинамические расчеты с помощью программного обеспечения высокопрочной коррозионностойкой стали системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo: *a* – общий расчет в диапазоне температур 400–1200 °C; *б* – уточненная область в диапазоне температур 400–900 °C

Для исследования влияния направления синтеза и механической обработки на уровень механических характеристик проведены испытания на растяжение при температурах 20_{-10}^{+15} , 500 ± 5 и 550 ± 5 °C. Шероховатость образца до механической обработки составила $R_a = 14,1$, после механической обработки – $R_a = 0,8$. Результаты испытаний образцов представлены на рис. 3.

При анализе результатов испытаний установлено, что ориентация образцов на плите построения не оказывает существенного влияния на механические свойства, а шероховатость поверхности образцов без механической обработки снижает значения $\sigma_{0,2}$ материала при температуре 20_{-10}^{+15} °C вследствие наличия поверхностных дефектов (концентраторов напряжений) в виде припеченных порошковых частиц, характерных для синтезированного материала. Напротив, при высокотемпературных испытаниях дефекты поверхности не приводят к снижению показателей σ_b и $\sigma_{0,2}$ синтезированного материала высокопрочной мартенситостареющей коррозионностойкой стали системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo.

По сравнению с показателями σ_b и $\sigma_{0,2}$ шероховатость поверхности оказывает значительное влияние на относительное удлинение δ синтезированных образцов, причем в большей степени при высокотемпературных испытаниях. Отсутствие механической обработки с учетом синтеза образцов при различных ориентациях при температуре 20_{-10}^{+15} °C приводит к снижению пластичности образца на 21–30 %, при температурах 500 и 550 °C – на 64–85 и 56–67 % соответственно. Это может быть связано с более интенсивным окислением шероховатой поверхности и модификацией поверхностного слоя кислородом с дальнейшим охрупчиванием образцов.

Исследование фазового состава методом Штеблея после испытаний образцов на статическое растяжение показало, что с увеличением температуры испытания объемное содержание мартенсита снижается, а аустенита – растет (рис. 4). Нагрев до температуры испытания происходит со скоростью 15 °C/мин, т. е. выдержка образцов в интервале температур 400–500 и 400–550 °C составляет 6 и 10 мин соответственно. В соответствии с ранее проведенными исследованиями [11] установлено, что выдержка при температурах >525 °C приводит к реализации $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения, при этом для

обеспечения объемного содержания аустенита в структуре при температуре 500 °С в количестве от 6 до 10 % требуется ~3 ч времени, а от 10 до 15 % при температуре 550 °С: ~2 ч. В структуре образцов при испытании на растяжение с учетом выдержки в температурном интервале от 6 до 10 мин сформировалось среднее объемное содержание аустенита 7,5 % (при 500 °С) и 12,5 % (при 550 °С), что свидетельствует об интенсификации диффузионного процесса $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения при механическом и температурном воздействии.

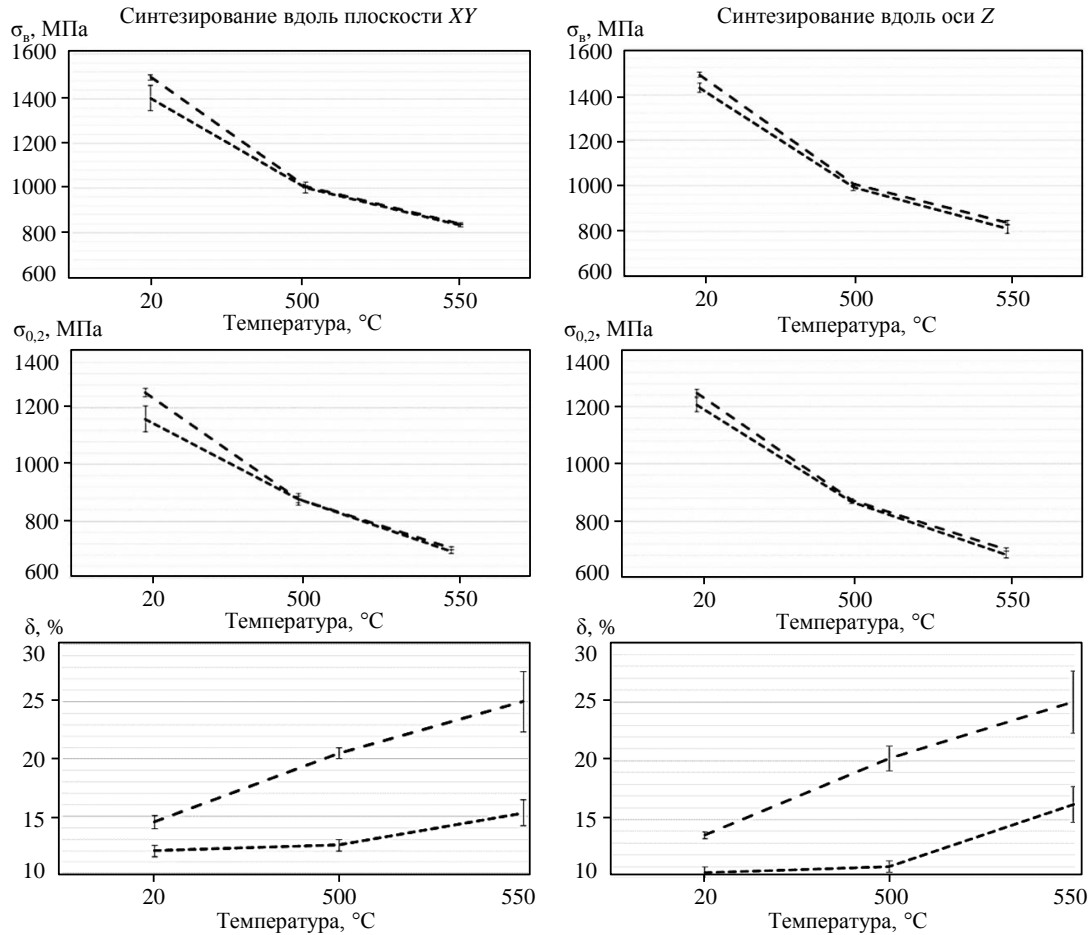


Рис. 3. Влияние направления синтезирования и механической обработки образцов на предел прочности (σ_b), условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$) и относительное удлинение (δ) в зависимости от температуры испытания (---, - - - без и с механической обработкой соответственно)

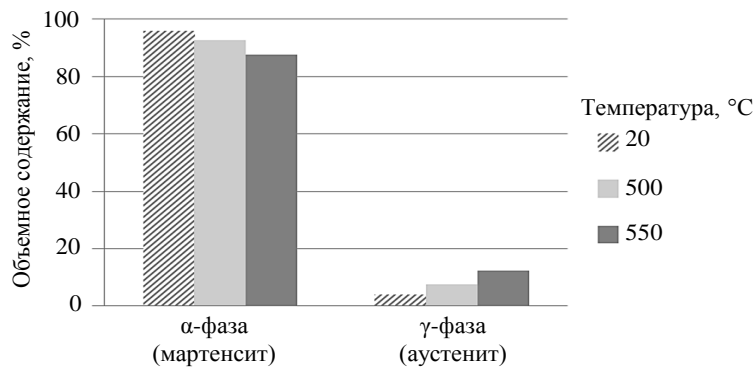


Рис. 4. Распределение фаз в образцах при различных температурах испытаний

Испытание на длительную прочность (база 100 ч) проводили при температуре 550 ± 5 °С и напряжении 480 МПа. Образцы сняты с испытательной машины до разрушения, спустя 110 ч после начала испытания.

Испытание на ползучесть (база 100 ч) проводили при температуре 500 ± 5 °С и напряжении 140 МПа с допуском на деформацию 0,2 % в соответствии с ГОСТ 3248–81.

Все испытываемые образцы сняты после 100 ч испытания без разрушения. При этом среднее значение относительного удлинения δ_0 образцов, синтезированных вдоль оси Z и плоскости XY, без механической обработки поверхности составило 0,065 %, в то время как аналогичный показатель для образцов, подвергнутых механической обработке поверхности, равен 0,055 %. Таким образом, можно сделать вывод, что шероховатость поверхности и ориентация построения образцов не оказывают значимого влияния на остаточную деформацию ползучести и свойства синтезированного материала при длительных температурных испытаниях.

Аналогичные исследования при температурах 20_{-10}^{+15} , 500 ± 5 и 550 ± 5 °С проводили путем испытаний на ударную вязкость с U-образным концентратором напряжений.

Сравнительные результаты проведенных испытаний приведены на рис. 5.

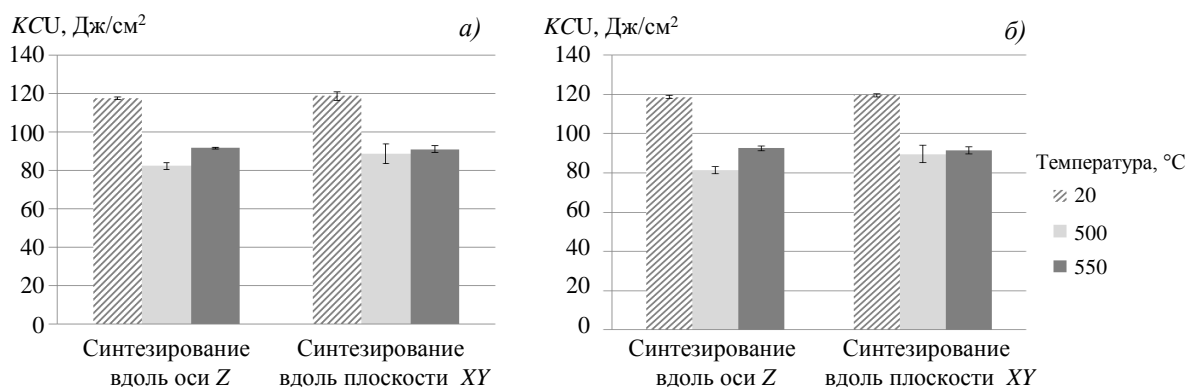


Рис. 5. Сравнение значений ударной вязкости образцов, синтезированных в различных направлениях, при различных температурах испытания: без механической обработки (а) и с применением механической обработки (б)

Исследование показало снижение ударной вязкости материала при высокотемпературных испытаниях, что предположительно связано с интенсивным образованием при данных температурах в сталях системы легирования Fe–Cr–Ni–Mo–Co σ -фазы, приводящей к повышению хрупкости и снижению ударной вязкости стали [17–21]. При этом ударная вязкость материала не зависит от исходной ориентации построения образцов при селективном лазерном сплавлении, а также от шероховатости поверхности.

Заключения

Механическая обработка незначительно влияет на пределы прочности (σ_b) и текучести ($\sigma_{0,2}$) при температуре испытания 20_{-10}^{+15} °С. Установлено, что проведение механической обработки приводит к увеличению значений параметров σ_b и $\sigma_{0,2}$ на 3–8 %. Наличие неровностей и порошковых частиц на поверхности образца после синтеза при высокотемпературных испытаниях при 500 ± 5 и 550 ± 5 °С не приводит к снижению механических характеристик.

Отсутствие механической обработки приводит к снижению значений относительного удлинения (δ) у образцов после синтеза на 21–30 % при температуре испытания 20_{-10}^{+15} °С при температурах 500 ± 5 и 550 ± 5 °С – на 64–85 и 56–67 % соответственно. Более интенсивное снижение относительного удлинения при повышенных температурах,

по-видимому, связано с активным окислением и модификацией поверхностного слоя, что приводит к охрупчиванию.

Высокотемпературные испытания на длительную прочность и ползучесть не зависят от качества поверхности образцов и ориентации построения.

Ориентация построения и наличие поверхностных дефектов не оказывают значительного влияния на ударную вязкость вследствие высокой скорости зарождения и распространения трещины при испытании. Снижение уровня механических свойств с повышением температуры, вероятно, связано с образованием σ -фазы в сталях такой системы легирования.

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. 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.
2. Специальные стали: в 2 т.; пер. с нем. / Э. Гудремон; ред. пер. А.С. Займовский, М.Л. Бернштейн, В.С. Меськин. 2-е изд., сокр. и перераб. М.: Металлургия, 1966. Т. 1. 741 с.
3. Lukin E.I., Ashmarin A.A., Bannykh I.O. et al. Effect of the Reduction during Cold Rolling on the Phase Composition, Texture, and Residual Stresses in 20Kh15AN3MD2 Steel // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2023. Vol. 2023. No. 11. P. 1598–1605.
4. 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: 24.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.
5. Специальные стали: в 2 т.; пер. с нем. / Э. Гудремон; ред. пер. А.С. Займовский, М.Л. Бернштейн, В.С. Меськин. 2-е изд., сокр. и перераб. М.: Металлургия, 1966. Т. 2. 532 с.
6. Севальнев Г.С., Нефедкин Д.Ю., Дульнев К.В., Обливанцев К.Д. Особенности изменения зеренной структуры в Fe–Ni–Co–Mo–Ti мартенситостареющей стали при различных схемах термической обработки // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 3 (76). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-3-13.
7. 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: 25.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.
8. Shin W.-S., Son B., Song W. et al. Heat treatment effect on the microstructure, mechanical properties, and wear behaviors of stainless steel 316L prepared via selective laser melting // *Materials Science and Engineering: A*. 2021. Vol. 806. P. 140805.
9. Liverani E., Toschi S., Ceschini L., Fortunato A. Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel // *Journal of Materials Processing Technology*. 2017. Vol. 249. P. 255–263.
10. Pei Y.T., de Hosson J.T.M. Functionally graded materials produced by laser cladding // *Acta materialia*. 2000. Vol. 48. P. 2617–2624.
11. Богачев И.А., Сульянова Е.А., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование микроструктуры и свойств коррозионностойкой стали системы Fe–Cr–Ni, полученной методом селективного лазерного сплавления // *Труды ВИАМ*. 2019. № 3 (75). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.11.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-3-13.
12. Вознесенская Н.М., Тоньшева О.А., Елисеев Э.А. Современные конструкционные стали криогенного назначения и влияние некоторых легирующих элементов на их свойства (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 1 (85). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.11.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-3-14.

13. Yap C.Y., Chua C.K., Dong Z.L. et al. Review of selective laser melting: Materials and applications // *Applied physics reviews*. 2015. Vol. 2. No. 4. P. 041101.
14. Uçak N., Çiçek A., Aslantas K. Machinability of 3D printed metallic materials fabricated by selective laser melting and electron beam melting: A review // *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. Vol. 80. P. 414–457.
15. Tascioglu E., Khan H.M., Kaynak Y. et al. Effect of aging and finish machining on the surface integrity of selective laser melted maraging steel // *Rapid Prototyping Journal*. 2021. Vol. 27. No. 10. P. 1900–1909.
16. Kaynak Y., Kitay O. Porosity, surface quality, microhardness and microstructure of selective laser melted 316L stainless steel resulting from finish machining // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2018. Vol. 2. No. 2. P. 36.
17. Перкас М.Д., Струг М.Д., Русаненко В.В. Эливарные мартенситостареющие стали с высоким пределом упругости // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1991. № 8. С. 40–41.
18. Wang R. Precipitation of sigma phase in duplex stainless steel and recent development on its detection by electrochemical potentiokinetic reactivation: A review // *Corrosion Communications*. 2021. Vol. 2. P. 41–54.
19. Villanueva D.M.E., Junior F.C.P., Plaut R.L., Padilha A.F. Comparative study on sigma phase precipitation of three types of stainless steels: austenitic, superferritic and duplex // *Materials Science and Technology*. 2006. Vol. 22. No. 9. P. 1098–1104.
20. Knyazeva M., Pohl M. Duplex steels. Part I: genesis, formation, structure // *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 2013. Vol. 2. P. 113–121.
21. Knyazeva M., Pohl M. Duplex steels. Part II: carbides and nitrides // *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 2013. Vol. 2. P. 343–351.

References

1. 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.
2. *Special steels*: in 2 vols. Trans. from German. 2nd ed., add. and rev. Moscow: Metallurgiya, 1966, vol. 1, 741 p.
3. Lukin E.I., Ashmarin A.A., Bannykh I.O. et al. Effect of the Reduction during Cold Rolling on the Phase Composition, Texture, and Residual Stresses in 20Kh15AN3MD2 Steel. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2023, vol. 2023, no. 11, pp. 1598–1605.
4. 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: October 24, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.
5. *Special steels*: in 2 vols. Trans. from German. 2nd ed., add. and rev. Moscow: Metallurgiya, 1966, vol. 2, 532 p.
6. Sevalnev G.S., Nefedkin D.Yu., Dulnev K.V., Oblivancev K.D. Features of changing the grain structure in Fe–Ni–Co–Mo–Ti maraging steel under different heat treatment modes. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-3-13.
7. 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: October 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.
8. Shin W.-S., Son B., Song W. et al. Heat treatment effect on the microstructure, mechanical properties, and wear behaviors of stainless steel 316L prepared via selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, vol. 806, p. 140805.
9. Liverani E., Toschi S., Ceschini L., Fortunato A. Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, vol. 249, pp. 255–263.
10. Pei Y.T., de Hosson J.T.M. Functionally graded materials produced by laser cladding. *Acta materialia*, 2000, vol. 48, pp. 2617–2624.

11. Bogachev I.A., Sulyanova E.A., Sukhov D.I., Mazalov P.B. Microstructure and properties investigations of Fe–Cr–Ni stainless steel obtained by selective laser melting. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-3-13.
12. Voznesenskaya N.M., Tonysheva O.A., Eliseev E.A. Modern structural steels of cryogenic purpose and influence of some alloying elements on their properties (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-3-14.
13. Yap C.Y., Chua C.K., Dong Z.L. et al. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied physics reviews*, 2015, vol. 2, no. 4, pp. 041101.
14. Uçak N., Çiçek A., Aslantas K. Machinability of 3D printed metallic materials fabricated by selective laser melting and electron beam melting: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, vol. 80, pp. 414–457.
15. Tascioglu E., Khan H.M., Kaynak Y. et al. Effect of aging and finish machining on the surface integrity of selective laser melted maraging steel. *Rapid Prototyping Journal*, 2021, vol. 27, no. 10, pp. 1900–1909.
16. Kaynak Y., Kitay O. Porosity, surface quality, microhardness and microstructure of selective laser melted 316L stainless steel resulting from finish machining. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2018, vol. 2, no. 2, p. 36.
17. Perkas M.D., Strug M.D., Rusanenko V.V. Elinvar martensitic aging steels with a high elastic limit. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1991, no. 8, pp. 40–41.
18. Wang R. Precipitation of sigma phase in duplex stainless steel and recent development on its detection by electrochemical potentiokinetic reactivation: A review. *Corrosion Communications*, 2021, vol. 2, pp. 41–54.
19. Villanueva D.M.E., Junior F.C.P., Plaut R.L., Padilha A.F. Comparative study on sigma phase precipitation of three types of stainless steels: austenitic, superferritic and duplex. *Materials Science and Technology*, 2006, vol. 22, no. 9, pp. 1098–1104.
20. Knyazeva M., Pohl M. Duplex steels. Part I: genesis, formation, structure. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2013, vol. 2, pp. 113–121.
21. Knyazeva M., Pohl M. Duplex steels. Part II: carbides and nitrides. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2013, vol. 2, pp. 343–351.

Информация об авторах

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

Климов Владимир Сергеевич, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Мазалова Татьяна Анатольевна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

Vladimir S. Klimov, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Tatiana A. Mazalova, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 28.11.2024; получена после доработки 05.02.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.02.2025.
The article was submitted 28.11.2024; received in revised form 05.02.2025; approved and accepted for publication after reviewing 10.02.2025