

Научная статья

УДК 539.41, 620.178.1

doi: 10.17223/19988621/76/9

Исследование структуры и свойств изделий из жаростойких сплавов на основе Ni–Cr–CrN с высоким содержанием азота, полученных с применением аддитивной технологии прямого лазерного сплавления порошковых материалов

Мансур Хузиахметович Зиатдинов¹, Александр Степанович Жуков²,
Николай Сергеевич Евсеев³, Михаил Александрович Марков⁴,
Виталий Валерьевич Бобырь⁵, Дмитрий Александрович Ткачев⁶,
Павел Юрьевич Никитин⁷

^{1, 2, 3, 6, 7} Томский государственный университет, Томск, Россия

³ Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск, Россия

^{4, 5} НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, Россия

¹ ziatdinovm@mail.ru

² zhuk_77@mail.ru

³ evseevns@gmail.com

⁴ barca0688@mail.ru

⁵ npk3@mail.ru

⁶ d.tkachev11@gmail.com

⁷ upavelru@yandex.ru

Аннотация. Проведено исследование механизмов формирования структуры и свойств в ходе консолидации аддитивным методом прямого лазерного сплавления никель-хромового сплава системы Ni–Cr–CrN с повышенным содержанием азота. Сплав был получен путем добавления нитрида хрома, синтезированного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, в качестве лигатуры в никель-хромовый сплав. Произведена атомизация полученного сплава с целью получения сферических порошков, пригодных для использования в технологии прямого лазерного сплавления. Исследован химический состав полученных порошков, свидетельствующий о высоком итоговом содержании азота в сплаве (0.5%). Методом прямого лазерного сплавления порошков получены компактные образцы на основе Ni–Cr–CrN. Проведено исследование структуры полученных образцов, предела прочности при трехточечном изгибе и микротвердости по Виккерсу. Максимальное значение предела прочности при трехточечном изгибе составило 1 500 МПа, микротвердости 450 НВ.

Ключевые слова: аддитивные технологии, прямое лазерное сплавление металлов, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, азотированный никель-хромовый сплав, микротвердость, прочность на изгиб

Благодарности: СВС и исследование полученных материалов выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-60036. Данная работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения от 26.07.2021 № 075-15-2021-693 (№ 13.ЦКП.21.0012). Аддитивное выращивание материалов выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 0721-2020-0028.

Для цитирования: Зиятдинов М.Х., Жуков А.С., Евсеев Н.С., Марков М.А., Бобырь В. В., Ткачев Д.А., Никитин П.Ю. Исследование структуры и свойств изделий из жаростойких сплавов на основе Ni–Cr–CrN с высоким содержанием азота, полученных с применением аддитивной технологии прямого лазерного сплавления порошковых материалов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 76. С. 118–130. doi: 10.17223/19988621/76/9

Original article

Study of the structure and properties of products made of heat-resistant alloys based on Ni–Cr–CrN with a high nitrogen content by direct metal laser sintering

Manzur Kh. Ziatdinov¹, Alexander S. Zhukov², Nikolay S. Evseev³,
Mikhail A. Markov⁴, Vitaly V. Bobyr¹⁵, Dmitry A. Tkachev⁶,
Pavel Yu. Nikitin⁷

^{1, 2, 3, 6, 7} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

³ Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Biysk, Russian Federation

^{4, 5} National Research Center “Kurchatov Institute” – Central Research Institute of Structural Materials “Prometey”, Saint-Petersburg, Russia

¹ ziatdinovm@mail.ru

² zhuk_77@mail.ru

³ evseevns@gmail.com

⁴ barca0688@mail.ru

⁵ npk3@mail.ru

⁶ d.tkachev11@gmail.com

⁷ upavelru@yandex.ru

Abstract. This work presents a study of the preparation of additive materials based on a nickel–chromium alloy of the Ni–Cr–CrN system by direct metal laser sintering (DMLS). The additive materials were produced on the EOS M270 setup (with the option of open editing modes). The research range: laser radiation from 100 to 200 W, the speed of the laser beam from 600 to 1100 mm/s. The chemical composition of the obtained materials is investigated. The composition indicates a high final content of nitrogen in the alloy (0.5%). The structure of the obtained samples and their mechanical characteristics, namely, the bending strength (1500 MPa) and Vickers microhardness (450 HV), have been investigated. The morphology, microstructure, and elemental analysis of the initial powder and the resulting additive materials were studied by scanning electron microscopy and X-ray spectral microanalysis on the TESCAN Vega research complex. Analysis of the structure shows that the elements Ni, Cr and Fe are distributed evenly over the entire area of the samples, which indicates a uniform Ni–Cr–CrN melt.

Keywords: additive technologies, direct metal laser sintering, self-propagating high-temperature synthesis, nitrided nickel-chromium alloy, microhardness, bending strength

Acknowledgments: The SHS and the study of the obtained materials were funded by RFBR, project number 19-38-60036. Additive growing materials was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State assignment No. 0721-2020-0028).

For citation: Ziatdinov, M.Kh., Zhukov, A.S., Evseev, N.S., Markov, M.A., Bobyr', V.V., Tkachev, D.A., Nikitin, P.Yu. (2022) Study of the structure and properties of products made of heat-resistant alloys based on Ni–Cr–CrN with a high nitrogen content by direct metal laser sintering. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 76. pp. 118–130. doi: 10.17223/19988621/76/9

На сегодняшний день при стремительном развитии технологий возрастают требования к эксплуатационным характеристикам узлов и агрегатов, в частности для таких областей, как авиастроение, атомная энергетика, в которых широко применяются газотурбинные двигатели. Такие агрегаты должны отвечать ряду требований: обладать высокими показателями жаропрочности, жаростойкости, износостойкости. Это формирует ряд научных проблем, связанных с разработкой новых конструкционных материалов, обладающих повышенными механическими характеристиками, сохраняющимися при высокотемпературных воздействиях. При этом ресурс материалов, применяемых в настоящий момент, исчерпан, их дальнейшее усовершенствование дает незначительные результаты при существенных затратах, в связи с чем актуальностью обладает разработка принципиально новых материалов и подходов к их изготовлению, способных существенно повысить механические характеристики деталей газотурбинных установок при высокотемпературных воздействиях.

В настоящее время в машиностроении широко применяются жаропрочные никелевые сплавы, рабочие температуры которых находятся в области 1 100°C. Одним из таких жаростойких сплавов является Ni–Cr [1–4]. Он обладает высокой стойкостью к окислению до 1 200°C [5]. Однако прочность и износостойкость никель-хромовых сплавов невысока, особенно при высоких температурах. Так, по данным работы [6] прочность на изгиб Ni–Cr достигает 660 МПа при содержании пор около 15%, что вдвое превосходит прочность на изгиб чистого Ni (330 МПа) [7].

Для улучшения механических характеристик в систему Ni–Cr вводятся различные добавки. Одним из перспективных путей повышения механических свойств никель-хромовых сплавов является легирование их азотом [8]. Азот наряду с никелем является стабилизатором γ -фазы системы Cr–Ni–N. Это позволяет повысить концентрацию хрома в нихроме с сохранением γ -структуры и значительно улучшить эксплуатационные характеристики: высокую прочность при высокой вязкости и высокую прочность при высоких температурах.

Для выплавки азотированного нихрома используется нитрид хрома, добавляемый в расплав в качестве лигатуры. Для синтеза нитридов хрома возможно использование свободного спекания и метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [9]. Метод СВС более эффективен: во-первых, он более экономичен (отсутствие затрат электроэнергии), во-вторых, позволяет получать более чистые нитриды хрома, в особенности данный метод способствует снижению содержания кислорода. Низкое содержание кислорода обеспечивает высокое и стабильное усвоение азота никель-хромовым расплавом.

Новый уровень развития газотурбинных установок в будущем могут обеспечить только принципиально новые материалы и технологии, так как традиционные уже исчерпали себя, и дальнейшее их использование дает незначительные результаты при существенных затратах. Наряду с разработкой материалов не менее важной задачей является разработка способов формирования изделий из них, так как

с развитием техники возрастает сложность геометрии отдельных функциональных узлов; при этом подходы к изготовлению изделий должны обладать высокой экономической эффективностью. В области развития методов изготовления сложнопрофильных изделий аддитивные технологии, активно развивающиеся в настоящий момент, представляют собой инновационный инструмент для решения задач различных отраслей промышленности. Одно из важнейших направлений аддитивных технологий – лазерное выращивание металлических изделий. Особенно актуальным является производство деталей сложных узлов аэрокосмической техники, в частности жаростойких элементов турбореактивных двигателей. На сегодняшний день одним из наиболее развитых и перспективных методов для изготовления сложнопрофильных металлических изделий является технология послойного лазерного спекания порошков (технология SLS) [6]. При помощи SLS разрабатываются точные сложнопрофильные детали для работы в составе узлов и агрегатов. Данный процесс способен успешно заменить традиционные методы производства, так как физико-механические свойства изделий, построенных по технологии SLS, зачастую превосходят свойства изделий, изготовленных по традиционным технологиям. Кроме того, в некоторых случаях сложнопрофильные детали невозможно получить традиционными методами [10].

Важнейшими проблемами при изготовлении изделий аддитивными методами являются определение технологических параметров выращивания и соответствие характеристик исходного порошкового материала определенным требованиям, одно из которых – форма частиц, которая должна быть близка к сферической. Имеется ряд работ, в которых исследуется получение изделий из хром-никелевых сплавов аддитивными методами. Так, в работе [11] экспериментальные образцы системы Ni–Cr с микротвердостью 320 HV получены методом селективного лазерного сплавления. В работе [12] проводилась лазерная наплавка (метод LMD) лабораторных образцов из Ni–Cr–N при различных технологических параметрах; микротвердость по Виккерсу полученных образцов достигала 310 HV. В работе [13] приведены исследования микроструктуры и механических свойств одного из вариантов никель-хромовых сплавов – сплава марки Inconel 625, полученного методом аддитивной дуги (WAAM): средняя микротвердость сплава Inconel 625 составила 264 HV.

В результате развития SLS-технологии появляются новые модификации, основанные на данной методике, позволяющие достичь большей точности и повысить технологические характеристики формируемых изделий. Одной из таких модификаций является методика прямого лазерного сплавления металлов (DMLS), разработанная и запатентованная компанией EOS и позволяющая увеличить точность выращивания изделия и повысить сложность геометрии за счет нанесения нового материала для каждого слоя [10]. Несмотря на существующие исследования по получению изделий из сплавов Ni–Cr аддитивными методами (SLM, SLS, WAAM), а также большой интерес различных групп авторов к системам Ni–Cr и Ni–Cr–N, отсутствуют работы в области получения изделий Ni–Cr–N методом DMLS. Однако такой метод достаточно эффективен, а определение режимных параметров при получении аддитивных изделий данным методом является актуальной задачей.

Таким образом, целью настоящей работы является аддитивное выращивание материалов Ni–Cr–CrN методом DMLS и исследование их структуры и физико-механических характеристик.

Материалы и методика эксперимента

Процесс получения исходного композиционного порошка системы Ni–Cr–CrN и аддитивных образцов на его основе включал в себя четыре основных технологических этапа (рис. 1).

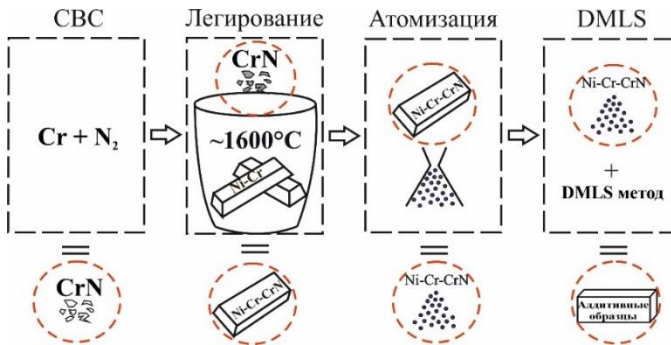


Рис. 1. Схема получения Ni–Cr–CrN материалов
Fig. 1. Main stages of obtaining Ni–Cr–CrN materials

Первый этап – получение нитрида хрома. Синтез нитрида хрома осуществлен при помощи метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (CBC) в реакторе высокого давления. Для синтеза CrN использовали порошок алюмотермического хрома с чистотой 99.0%. Подробно процесс получения CrN методом CBC описан в работе [14].

Второй этап – получение азотированного никель-хромового сплава Ni–Cr–CrN. Для этого CrN, полученный на первом этапе, вводился в расплав Ni–Cr в качестве лигатуры. Температура расплава никель-хромового сплава марки X20H80 составляет ~ 1 500°C. При получении порошков азотированного нихрома (0.3–0.5% N) температура расплава повышалась до 1 550–1 600°C, затем в расплав добавлялся порошок нитрида хрома, полученный методом CBC. В результате был получен никель-хромовый азотистый сплав Ni 55%; N 0.5–0.7%; Cr – ост.

На третьем этапе производилась атомизация полученного легированного сплава для получения порошков сферической формы, обладающих высокой текучестью и пригодных для формирования изделий аддитивными методами послойного лазерного выращивания. Процесс сфероидизации Ni–Cr–CrN осуществлялся в колонне распыления с вакуумной камерой с дальнейшей классификацией и сфероидизацией композиционного порошка в индукционно связанной плазме. В результате был получен порошок Ni–Cr–CrN сферической формы с диаметром частиц 20–80 мкм. Химический состав полученного порошка, который являлся исходным компонентом при создании аддитивных изделий, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав порошка Ni–Cr–CrN после сфероидизации

Химический состав, мас. %									
Ni	Cr	N	C	Fe	Al	Si	P	S	O
основа	45.0	0.5	0.014	0.17	0.05	0.12	0.01	0.0012	0.15

Содержание азота и кислорода определялось методом инфракрасной спектроскопии на установке TCH600 фирмы LECO. Полученный легированный сплав в порошковой форме содержал 45% хрома, 0.5% азота и 0.5% примесей, находившихся в исходном никель-хромовом сплаве и внесенных на этапе легирования.

Четвертым технологическим этапом являлось аддитивное лазерное выращивание образцов из сферического композиционного порошка системы Ni–Cr–CrN методом прямого лазерного сплавления металлов DMLS. Для выращивания аддитивных образцов в настоящей работе использовалась установка EOS M270 (Германия) с опцией открытого редактирования режимов, расположенная в НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей». Выращивание образцов производилось в атмосфере воздуха. Мощность лазерного излучения варьировала в диапазоне 100–200 Вт, скорость движения лазерного луча – в диапазоне 600–1 100 мм/с. В результате были изготовлены экспериментальные образцы в форме балок размером $5 \times 5 \times 25$ мм.

Гранулометрический состав порошков определялся при помощи анализатора Analysette 22 MicroTec plus фирмы FRITSCH методом лазерной дифракции. Рентгенофазовый анализ проводился с использованием многофункционального рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima IV с $\text{CuK}\alpha$ -излучением на основе базы данных PDF-2. Исследование морфологии, микроструктуры и элементный анализ исходного порошка и полученных аддитивных материалов проводили методами сканирующей электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа на исследовательском комплексе TESCAN Vega. Определение микротвердости по Виккерсу проводилось на микротвердомере PMT-3М при нагрузке 300 г и времени выдержки 10 с. Определение прочности полученных образцов производилось путем испытания на трехточечный изгиб в соответствии с ГОСТ 24409–80 с помощью универсальной испытательной машины Zwick Roell.

Результаты и обсуждение

В настоящей работе выращены экспериментальные образцы из полученного композиционного порошка системы Ni–Cr–CrN.

Дифрактограммы поверхности исследуемых образцов № 1 и № 2 приведены на рис. 2. Согласно результатам рентгенофазового анализа, фазовый состав образцов № 1 и № 2 представлен фазой Cr_2Ni_3 с гранецентрированной (ГЦК) кристаллической решеткой с параметром решетки $a = 3.579$ Å. При этом фазовый состав исходного порошка и полученных образцов идентичен.

В результате проведенных механических испытаний определены предел прочности на изгиб и микротвердость по Виккерсу аддитивных материалов. Результаты испытаний образцов в зависимости от использования стандартных режимов селективного лазерного сплавления порошков Ni–Cr–CrN (применяемых при сплавлении стальных материалов) на установке EOS представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что наибольшее значение микротвердости и предела прочности на изгиб достигается при мощности лазера 200 Вт и скорости движения луча 800 мм/с. Очевидно, это связано с большим временем теплового воздействия, в результате чего частицы порошка проплавляются более однородно, что приводит к более плотной структуре материала и увеличению его механических характеристик. На рис. 3 показан внешний вид образцов после испытаний на изгиб. Исходя из характера деформирования образцов и разрушения с сохранением

целостности образца при образовании трещины, возможно сделать вывод, что полученные материалы обладают высокой пластичностью.

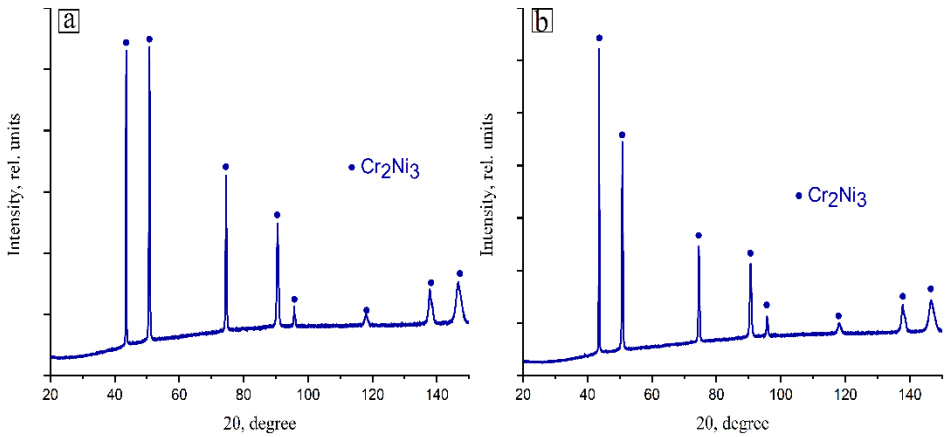


Рис. 2. Дифрактограммы поверхности полученных образцов: *a* – № 1, *b* – № 2
Fig. 2. Diffraction patterns of the surface of samples nos. (a) 1 and (b) 2

Таблица 2

**Механические свойства исследуемых образцов, полученных из порошка
 Ni–Cr–CrN при сплавлении в стандартных режимах DMLS**

№ образца	Скорость движения лазерного луча, мм/с	Мощность лазерного излучения, Вт	Предел прочности на изгиб, МПа	Микротвердость, HV
1	800	200	1 500	450
2	1 000	200	1 400	380
3	800	150	1 380	370
4	900	170	1 350	370



Рис. 3. Внешний вид образцов после испытаний на изгиб
Fig. 3. Appearance of specimens after bending tests

В табл. 3 приведено сравнение микротвердости образцов, полученных в настоящей работе, и микротвердости образцов, полученных в работах [12, 13, 15] аддитивными методами, а также сравнение предела прочности на изгиб с данными работ [6, 7] для образцов из чистого никеля и сплава Ni–Cr.

Из таблицы видно, что полученные образцы имеют высокую микротвердость, в то время как предел прочности на изгиб более чем в 2 раза превосходит предел прочности сравниваемых образцов, полученных другими авторами.

Таблица 3

**Сравнение механических характеристик полученных
аддитивных материалов с аналогами**

Образец	Метод получения	Микротвердость, HV	Предел прочности на изгиб, МПа	Источники данных
Ni–Cr–CrN	DMLS	450	1 500	Настоящая работа
Ni–Cr–CrN	DMLS	380	1 400	
Ni–Cr–CrN	DMLS	370	1 380	
Ni–Cr–CrN	DMLS	370	1 350	
Ni–Cr	SLM	280–320	–	[12]
Ni–Cr–CrN	LMD	310	–	[13]
Inconel 625	WAAM	264	–	[15]
Ni–Cr	традиционный	–	660	[6]
Ni	традиционный	–	330	[7]

На рис. 4 показан внешний вид аддитивных образцов № 1 и № 2 в поперечном сечении.

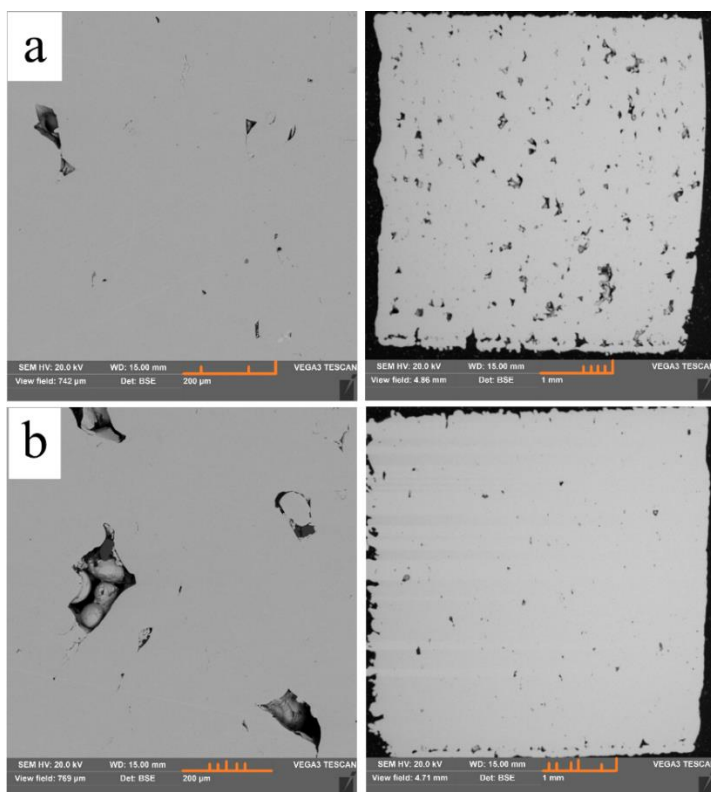


Рис. 4. Внешний вид аддитивного образца № 1 (а) и № 2 (б) в поперечном сечении
Fig. 4. Cross-sectional view of samples nos. (a) 1 and (b) 2

Наличие порообразования вызвано в первую очередь наличием крупных частиц порошка (диаметр частиц более 60 мкм). В процессе DMLS при нанесении порошка лезвием оно цепляло и смещало порошок в сторону, что могло привести к несплошности в слое и повышенному порообразованию. Таким образом, для уменьшения порообразования в процессе DMLS необходимо использовать частицы меньшего диаметра, предположительно 20–60 мкм [16], и осуществить более тщательный подбор режима сплавления.

На рис. 5 для примера приведено ЭДС-изображение (поперечное сечение) образца № 1.

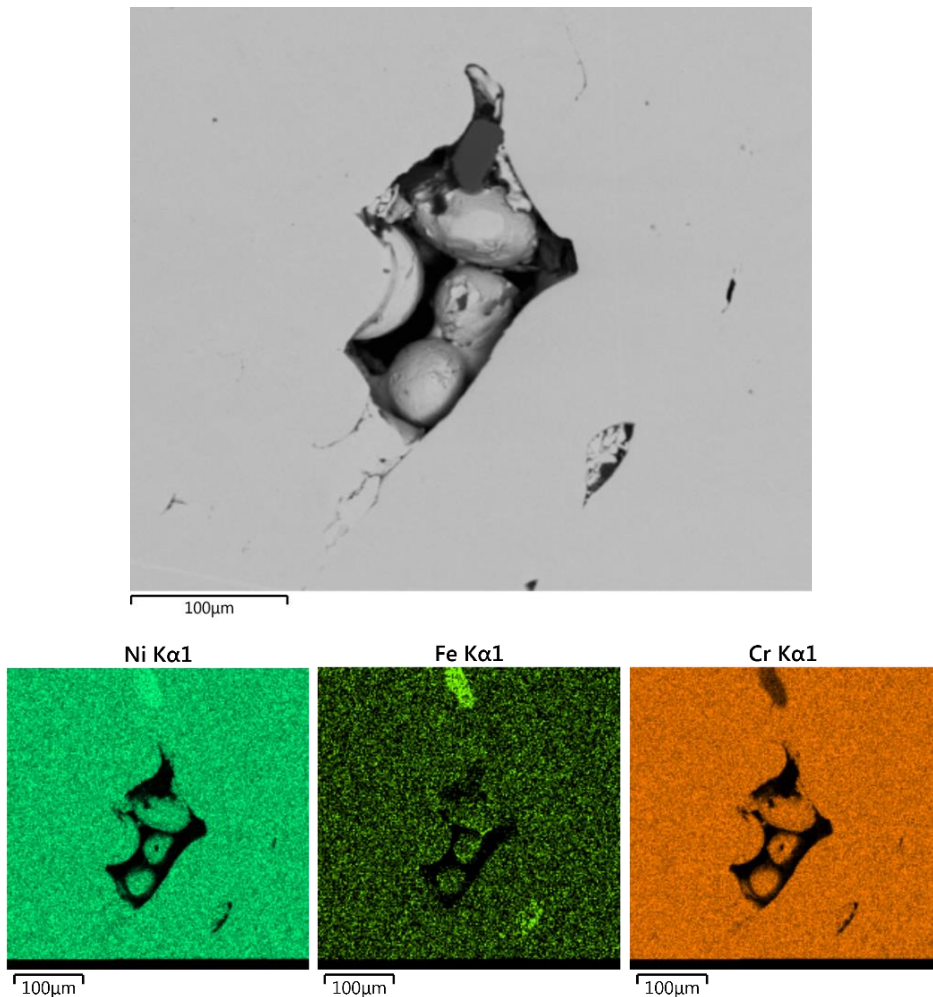


Рис. 5. ЭДС-изображение, поперечное сечение, образец № 1

Fig. 5. EDS, cross section, sample no. 1

Из рис. 5 видно, что элементы Ni, Cr и Fe распределены равномерно по всей площади образца, что свидетельствует о равномерном расплаве Ni–Cr–CrN.

Заключение

В работе проведено исследование механизмов формирования структуры и свойств в ходе консолидации аддитивным методом прямого лазерного сплавления никель-хромового сплава системы Ni–Cr–CrN с повышенным содержанием азота. Сплав был получен путем добавления нитрида хрома, синтезированного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, в качестве лигатуры в никель-хромовый сплав. Произведена атонизация полученного сплава с целью получения сферических порошков, пригодных для использования в технологии прямого лазерного сплавления. Исследован химический состав полученных порошков, свидетельствующий о высоком итоговом содержании азота в сплаве (0.5%). Методом прямого лазерного сплавления порошков получены компактные образцы на основе Ni–Cr–CrN. Проведено исследование структуры полученных образцов, предела прочности при трехточечном изгибе и микротвердости по Виккерсу. Максимальное значение предела прочности при трехточечном изгибе составило 1 500 МПа, микротвердости 450 HV. Анализ структуры показал, что элементы Ni, Cr и Fe распределены равномерно по всей площади образцов, что говорит о равномерном расплаве Ni–Cr–CrN. Анализ структуры также показал наличие пор, что связано с наличием крупных частиц порошка (более 60 мкм). Для уменьшения порообразования предполагаются использование частиц меньшего диаметра (~ 20–60 мкм) и более тщательный подбор режима сплавления. Ожидается, что при использовании сферического порошка Ni–Cr–CrN диаметром 20–60 мкм возможно получить более плотные аддитивные изделия с большим пределом прочности на изгиб и более высоким значением микротвердости. Таким образом, азотированные порошки нихрома пригодны для получения изделий как традиционными методами порошковой металлургии, так и сложно-профильных изделий методами 3D-печати.

Список источников

1. Sustaita-Torres I.A. *et al.* Aging of a cast 35Cr–45Ni heat resistant alloy // *Mater. Chem. Phys.* 2012. V. 133, No. 2. P. 1018–1023.
2. Zhang Y. *et al.* High-temperature deformation and fracture mechanisms of an advanced heat resistant Fe–Cr–Ni alloy // *Materials Science and Engineering: A*. 2017. V. 686. P. 102–112.
3. Xie Y. *et al.* Corrosion behaviour of Ni–Cr alloys in wet CO₂ atmosphere at 700 and 800°C // *Corros. Sci.* 2019. V. 146. P. 28–43.
4. Zhu J. *et al.* Fabrication of ZrO–NiCr functionally graded material by powder metallurgy // *Mater. Chem. Phys.* 2001. V. 68. P. 130–135.
5. Kazakov A.A. Phase formation control in liquid and solidifying steels and nickel-chromium alloys // *Advanced materials: St-Petersburg State Technical University Transactions*. 1996. No. 463. P. 8–21 (in Russian).
6. Zhu J., Lai Z., Yin Z. *et al.* Fabrication of ZrO₂–NiCr Functionally Graded Material by Powder Metallurgy // *Materials Chemistry and Physics*. 2001. V. 68. P. 130–135. doi: 10.1016/S0254-0584(00)00355-2
7. Zhu J.C., Lee S.Y., Yin Z.D., Lai Z.H. Fabrication of ZrO₂–Ni functionally graded material by powder // *Functionally Graded Materials* / ed. by I. Shiota, M.Y. Miyamoto. Amsterdam *et al.* : Elsevier, 1996. P. 203–208.
8. Козлова О.Ю., Овсепян С.В., Помельникова А.С., Ахмедзянов М.В. Влияние высокотемпературного азотирования на структуру и свойства свариваемых жаропрочных нике-

- левых сплавов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. Т. 6. С. 33–42. doi: 10.18698/0236-3941-2016-6-33-42
9. Evseev N., Ziatdinov M., Romandin V., Zhukov A., Tolynbekov A., Ryzhikh Yu. Process of Obtaining Chromium Nitride in the Combustion Mode under Conditions of Co-Flow Filtration // *Processes*. 2020. V. 8 (9). Art. 1056. doi: 10.3390/pr8091056
 10. Khaing M.W., Fuh J.Y.H., Lu L. Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterisation of EOS parts // *Journal of Materials Processing Technology*. 2001. V. 113. P. 269–272. doi: 10.1016/S0924-0136(01)00584-2
 11. Paula A., Peres G., Avançado C. Direct metal laser sintering (DMLS): technology for design and construction of microreactors // 6th Brazilian Conference on Manufacturing Engineering. April 11th to 15th, 2011 – Caxias do Sul – RS – Brazil.
 12. Song B., Dong S., Coddet P., Liao H., Coddet C. Fabrication of NiCr alloy parts by selective laser melting: Columnar microstructure and anisotropic mechanical behavior // *Materials & Design*. 2014. V. 53. P. 1–7. doi: 10.1016/j.matdes.2013.07.010
 13. Климова-Корсмик О.Г., Дроконов Д.А., Промахов В.В., Корсмик Р.С., Жуков А.С., Шульц Н.А., Клименко В.А. Влияние технологических параметров лазерной наплавки азотированного никель-хромового сплава марки ПР-Н55Х45Ана формирование структуры получаемых слоев // *Технологии аддитивного производства*. 2019. Т. 1, № 2. С. 5–19.
 14. Браверман Б.Ш., Зиятдинов М.Х., Максимов Ю.М. Горение хрома в азоте // *Физика горения и взрыва*. 1999. Т. 35, № 5. С. 50–52.
 15. Wang Y., Chen X., Su C. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 fabricated by wire-arc additive manufacturing // *Surface and Coatings Technology*. 2019. V. 374. P. 116–123. doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.05.079
 16. Kuznetsov P.A., Shakirov I.V., Zukov A.S. et al. Effect of particle size distribution on the structure and mechanical properties in the process of laser powder bed fusion // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1758: VIII International Conference “Functional Nanomaterials and High-Purity Substances FNM”, 5–9 October 2020, Suzdal, Russian Federation. doi: 10.1088/1742-6596/1758/1/012021

References

1. Sustaita-Torres I.A., et al. (2012) Aging of a cast 35Cr–45Ni heat resistant alloy. *Materials Chemistry and Physics*. 133(2). pp. 1018–1023.
2. Zhang Y., et al. (2017) High-temperature deformation and fracture mechanisms of an advanced heat resistant Fe–Cr–Ni alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 686. pp. 102–112.
3. Xie Y., et al. (2019) Corrosion behaviour of Ni–Cr alloys in wet CO₂ atmosphere at 700 and 800 °C *Corrosion Science*. 146. pp. 28–43.
4. Zhu J., et al. (2001) Fabrication of ZrO–NiCr functionally graded material by powder metallurgy. *Materials Chemistry and Physics*. 68. pp. 130–135.
5. Kazakov A.A. (1996) Upravleniye protsessami fazoobrazovaniya v zhidkikh i zatverdevayushchikh stalyakh i nikel’-khromovykh splavakh [Phase formation control in liquid and solidifying steels and nickel-chromium alloys]. *Advanced materials: St. Petersburg State Technical University Transactions*. 463. pp. 8–21.
6. Zhu J., Lai Z., Yin Z., et al (2001) Fabrication of ZrO₂–NiCr functionally graded material by powder metallurgy. *Materials Chemistry and Physics*. 68. pp. 130–135. doi: 10.1016/S0254-0584(00)00355-2
7. Zhu J. C., Lee S. Y., Yin Z. D., and Lai Z. H. (1996) in *Functionally Graded Materials*, edited by I. Shiota and M.Y. Miyamoto (Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands, 1997). pp. 203–208.

8. Kozlova O. Yu., Ovsepyan S. V., Pomelnikova A. S., Akhmedzyanov M. V. (2016) Influence of high-temperature nitriding on the structure and properties of heat-resistant nickel alloys being welded. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Series "Mechanical Engineering"*. 6. pp. 33–42. doi: 10.18698/0236-3941-2016-6-33-42
9. Evseev N., Ziatdinov M., Romandin V., Zhukov A., Tolynbekov A., Ryzhikh Yu. (2020) Process of obtaining chromium nitride in the combustion mode under conditions of co-flow filtration. *Processes*. 8(9). 1056. doi: 10.3390/pr8091056
10. Khaing M.W., Fuh J.Y.H., Lu L. (2001) Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterisation of EOS parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 113. pp. 269–272. doi: 10.1016/S0924-0136(01)00584-2
11. Paula A., Peres G., Avançado C. (2011). Direct metal laser sintering (DMLS): technology for design and construction of microreactors. *6th Brazilian conference on manufacturing engineering April 11th to 15th, 2011 – Caxias do Sul – RS – Brazil*.
12. Song B., Dong S., Coddet P., Liao H., Coddet C. (2014) Fabrication of NiCr alloy parts by selective laser melting: Columnar microstructure and anisotropic mechanical behavior. *Materials & Design*. 53. pp. 1–7. doi: 10.1016/j.matdes.2013.07.010
13. Klimova-Korsmik O.G., Dronov D.A., Promahov V.V., et al. (2019) Effect of technological parameters when laser fusion of nitride NI–CR alloy on structure formation of obtained layers. *Additive Fabrication Technology*. 1(2). pp. 5–19.
14. Braverman B., Ziatdinov M., Maksimov Y. (1999) Chromium combustion in nitrogen. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 35. pp. 501–505. doi: 10.1007/BF02674493
15. Wang Y., Chen X., Su C. (2019) Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 fabricated by wire-arc additive manufacturing. *Surface and Coatings Technology*. 374. pp. 116–123. doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.05.079
16. Kuznetsov P. A., Shakirov I. V., Zukov A. S., et al. (2020) Effect of particle size distribution on the structure and mechanical properties in the process of laser powder bed fusion. *Journal of Physics: Conference Series*, V. 1758, VIII International Conference "Functional Nanomaterials and High-Purity Substances FNM 5-9 October 2020, Suzdal, Russian Federation. doi: 10.1088/1742-6596/1758/1/012021

Сведения об авторах:

Зиятдинов Мансур Хузиахметович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории высокоэнергетических систем и новых технологий Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: ziatdinovm@mail.ru

Жуков Александр Степанович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией высокоэнергетических систем и новых технологий Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: zhuk_77@mail.ru

Евсеев Николай Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной аэромеханики физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия); научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН (Бийск, Россия). E-mail: evseevns@gmail.com

Марков Михаил Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» (Санкт-Петербург, Россия). E-mail: barca0688@mail.ru

Бобырь Виталий Валерьевич – сотрудник НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» (Санкт-Петербург, Россия). E-mail: npk3@mail.ru

Ткачев Дмитрий Александрович – аспирант физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: d.tkachev11@gmail.com

Никитин Павел Юрьевич – аспирант физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: upavelru@yandex.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Ziatdinov Manzur Kh. (Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ziatdinovm@mail.ru

Zhukov Alexander S. (Doctor of Physics and Mathematics; Head of laboratory, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: zhuk_77@mail.ru

Evseev Nikolay S. (Candidate of Physics and Mathematics; Associate professor, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation; Researcher, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Biysk, Russian Federation). E-mail: evseevns@gmail.com

Markov Mikhail A. (Candidate of technical sciences; Senior Researcher National Research Center “Kurchatov Institute” – Central research institute of structural materials “Prometey”, Saint-Petersburg, Russia). E-mail: barca0688@mail.ru

Bobyry Vitaly V. (Engineer, National Research Center “Kurchatov Institute” – Central research institute of structural materials “Prometey”, Saint-Petersburg, Russia). E-mail: npk3@mail.ru

Tkachev Dmitry A. (Researcher, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: d.tkachev11@gmail.com

Nikitin Pavel Yu. (Researcher, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: upavelru@yandex.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.08.2021; принята к публикации 22.03.2022

The article was submitted 17.08.2021; accepted for publication 22.03.2022