

Даниил Вадимович Пырин^{1*}, Егор Анатольевич Бельтюков¹, Виктор Андреевич Андриющенко¹, Владимир Дмитриевич Иванов¹, Дарья Сергеевна Попкова¹, Аркадий Юрьевич Жилияков^{1,2}, Сергей Владимирович Беликов^{1,2}

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация

²Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

**d.v.pyrin@gmail.com*

СВОЙСТВА АДДИТИВНОЙ ЗАГОТОВКИ КОРРОЗИОННОСТОЙКОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В статье показано изменение структуры и свойств аддитивной заготовки из никелевого коррозионностойкого сплава после проведения термической обработки. Показано, что закалка привела к более равномерному распределению химических элементов в материале. Если же в аддитивной заготовке наблюдалось изменение контактного модуля Юнга по мере удаления от подложки, то в закалённом состоянии такой тенденции не обнаружено. Испытания на растяжение не показали существенных отличий в прочностных характеристиках образцов материала в различных состояниях.

Ключевые слова: сплав Ni-Cr-Mo, коррозионностойкий сплав, термическая обработка, структура, свойства, испытания на растяжение, твёрдость, контактный модуль Юнга, поверхности разрушения

Daniil V. Pyrin, Egor A. Beltyukov, Victor A. Andryushchenko, Vladimir D. Ivanov, Daria V. Popkova, Arkadiy Yu. Zhilyakov, Sergey V. Belikov

PROPERTIES OF ADDITIVE BILLET OF CORROSION-RESISTANT NICKEL ALLOY AFTER HEAT TREATMENT

The article shows the change in the structure and properties of an additive billet made of nickel corrosion-resistant alloy after heat treatment. It is shown that quenching led to a uniform distribution of chemical elements in the material. In the additive billet, a change in the Young contact modulus was observed as it moved away from the base plate. In the heat treatment state, such a trend was not observed. Tensile tests did not show significant differences in the strength characteristics of the material samples in various states.

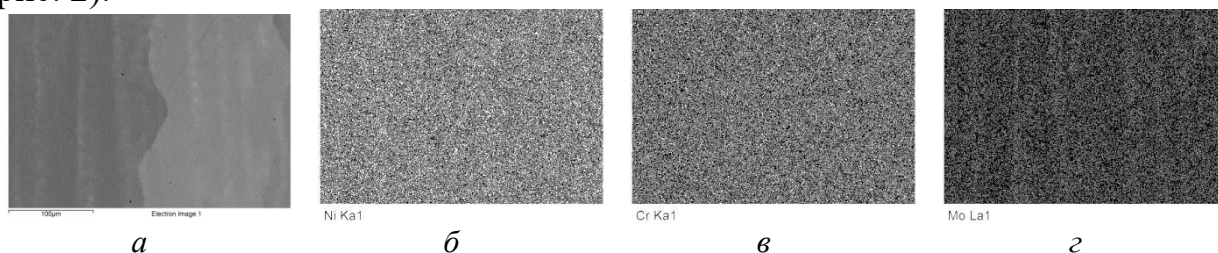
Keywords: Ni-Cr-Mo alloy, corrosion-resistant alloy, heat treatment, structure, properties, tensile tests, hardness, Young's contact modulus, fracture surfaces

Сплавы системы Ni-Cr-Mo перспективны в качестве конструкционных материалов, используемых в условиях контакта с расплавами солей при повышенных температурах. В некоторых случаях необходимо производство изделий сложной формы, где и нашло своё применение аддитивное производство (АП). Известно, что для изготовления изделий методами АП типично формирование преимущественно дендритной микроструктуры материала, при образовании которой в процессе кристаллизации из-за сегрегации ряда элементов появляется неоднородность распределения химического состава по сечению изделия [1-6]. Однако использовать подобные сплавы желательно в однофазном состоянии, когда легирующие элементы равномерно распределены в твёрдом растворе на основе никеля.

Отсюда, цель работы состояла в исследовании влияния термической обработки (закалка на твёрдый раствор) на аддитивную заготовку из никелевого коррозионностойкого сплава ХН63МБ, изготовленную методом электронно-лучевого аддитивного производства.

Исследование проводили на аддитивной заготовке никелевого сплава ХН63МБ (Ni - 23 вес. % Cr - 12 вес. % Mo), как в состоянии напечатанном, так и после термической обработки (ТО), представляющей закалку на твёрдый раствор с 1120 °С. Металлографический анализ проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа Jeol «JSM-6490 LV» с микроанализирующей насадкой Inka Energy TEM 350. Измерение твёрдости и контактного модуля упругости по методу Оливера–Фарра проводили на микротвердомере CSM Instruments. Испытания на растяжение со скоростью 5 мм/мин осуществлялось на машине Instron 3382 при комнатной температуре на плоских образцах с площадью поперечного сечения примерно 7 мм² с длиной рабочей части 10 мм. Испытывали по одному образцу от каждого состояния.

С помощью растровой электронной микроскопии получены изображения образцов сплава в различных вариантах обработки (рис. 1). Видно, что для АП характерна неравномерное распределение Mo, чья доля выше в междендритном пространстве. После проведённой закалки подобная особенность не выражена. Испытания на одноосное растяжение не показали значительных отличий в свойствах материала, чего нельзя сказать при определении твёрдости и контактного модуля Юнга методом индентирования (рис. 2).



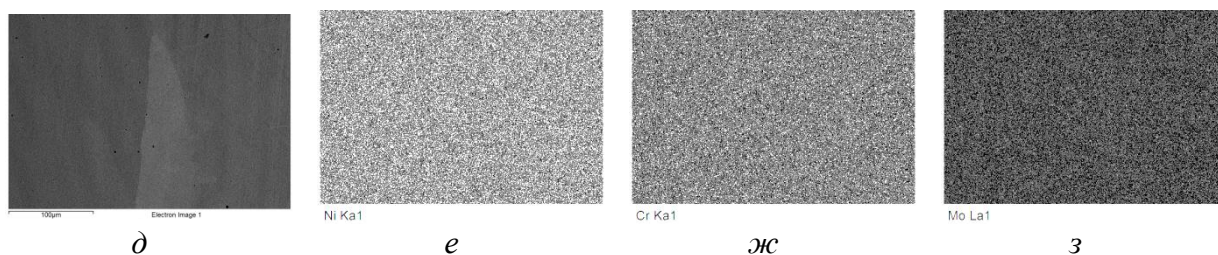
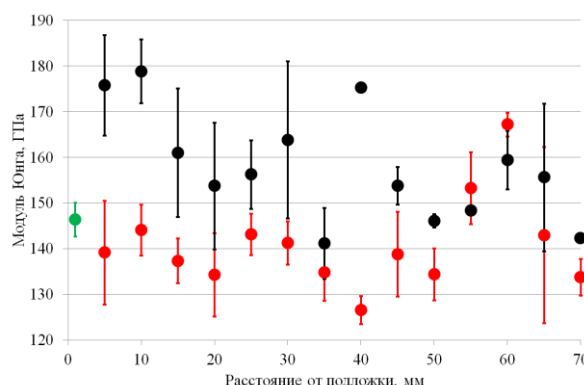
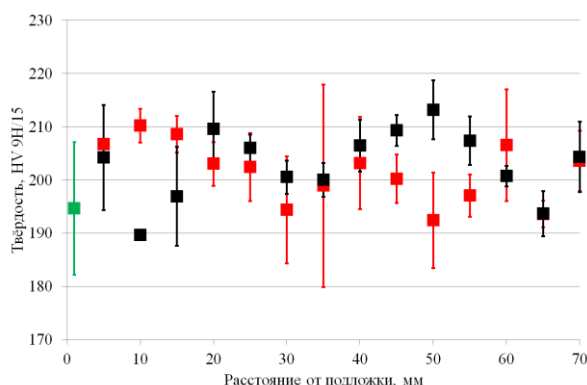


Рис. 1. Распределение элементного состава по сечению образцов: *a, б, в, г* – РЭМ-изображение, распределение Ni, Cr, Mo для АП образца соответственно, *д, е, ж, з* – РЭМ-изображение, распределение Ni, Cr, Mo для АП+ТО образца соответственно

Таблица

Результаты испытания на одноосное растяжение плоских образцов

Образец	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа	Общее удлинение, %	Относительное сужение, %
АП	300	570	70	72
АП+ТО	280	530	86	76



a

б

Рис. 2. Изменение твёрдости (*a*) и контактного модуля Юнга (*б*) по мере удаления от подложки: чёрные точки – АП, красные точки – АП+ТО, зелёные точки – средние значения для материала, изготовленного традиционным способом

Термическая обработка не влияет на значения твёрдости по высоте аддитивной заготовки, которые для обоих состояний находятся на уровне 200 HV. Модуль Юнга же по мере отдаления от подложки АП образца немонотонно понижается, чего не наблюдалось для аддитивной заготовки после ТО. Но вне зависимости от обработки наблюдается незначительный перегиб на высоте 60 мм от подложки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России

Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рябов Д. К. Некоторые особенности формирования структуры и свойств новых алюминиевых сплавов при аддитивном производстве / Д. К. Рябов, И. А. Грушин, А. Г. Сеферян // Станкоинструмент. 2022. №1 (026). С. 44–50. DOI: 10.22184/2499-9407.2022.26.1.44.50.
2. Vrancken B. Microstructure and mechanical properties of α novel β titanium metallic composite by selective laser melting / B. Vrancken [et al.] // Acta Materialia. 2014. V. 68. P. 150–158. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.01.018>
3. Deng D. On the formation of microstructural gradients in a nickel-base superalloy during electron beam melting / D. Deng [et al.] // Materials & Design. 2018. V. 160. P. 251–261. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.006>
4. Goel S. Microstructure evolution and mechanical response-based shortening of thermal post-treatment for electron beam melting (EBM) produced Alloy 718 / S. Goel [et al.] // Materials Science & Engineering A. 2021. V. 820. P. 251–261. 141515. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141515>
5. Рашковец М. Исследование фазового состава никелевого сплава Inconel 718, полученного аддитивной технологией / М. В. Рашковец [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2020. Т. 22. №3. С. 69–81. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-69-81
6. Zhilyakov A. Yu. Specific Features of the Structure and Fracture of the Inconel 718 Alloy Prepared by the Method of Electron-Beam Melting / A. Yu. Zhilyakov [et al.] // Metal Science and Heat Treatment. 2024. V. 66. №5 – 6. P. 303–311. DOI:10.1007/s11041-024-01051-z

REFERENCES

1. Ryabov D. K. Some features of the formation of the structure and properties of new aluminum alloys in additive manufacturing / D. K. Ryabov, I. A. Grushin, A. G. Seferyan // Machine tool. 2022. No.1 (026). pp. 44-50. DOI: 10.22184/2499-9407.2022.26.1.44.50.
2. Vrancken B. Microstructure and mechanical properties of α novel β titanium metallic composite by selective laser melting / B. Vrancken [et al.] // Acta Materialia. 2014. V. 68. P. 150–158. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.01.018>
3. Deng D. On the formation of microstructural gradients in a nickel-base superalloy during electron beam melting / D. Deng [et al.] // Materials & Design. 2018. V. 160. P. 251–261. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.006>
4. Goel S. Microstructure evolution and mechanical response-based shortening of thermal post-treatment for electron beam melting (EBM) produced Alloy 718 / S. Goel [et al.] // Materials Science & Engineering A. 2021. V. 820. P. 251–261. 141515. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141515>

5. Rashkovets M. Investigation of the phase composition of the Inconel 718 nickel alloy obtained by additive technology / M. V. Rashkovets [et al.] // Metal processing (technology, equipment, tools). 2020. Vol. 22. No.3. pp. 69-81. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-69-81
6. Zhilyakov A. Yu. Specific Features of the Structure and Fracture of the Inconel 718 Alloy Prepared by the Method of Electron-Beam Melting / A. Yu. Zhilyakov [et al.] // Metal Science and Heat Treatment. 2024. V. 66. №5 – 6. P. 303–311. DOI:10.1007/s11041-024-01051-z