Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2024 Том 26 № 4 с. 206–217
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-206-217

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Структура заготовок из сплава инконель 625, полученных электродуговой наплавкой и наплавкой с помощью электронного луча

Александр Болтрушевич [1, a], *Никита Мартюшев* [1, b, *], *Виктор Козлов* [1, c], *Юлия Кузнецова* [2, d]

[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Российская Федерация
[2] Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, пр. Ленина, 93, г. Новороссийск, 353924, Российская Федерация

[a] https://orcid.org/0000-0001-9971-7850, aeb20@tpu.ru; [b] https://orcid.org/0000-0003-0620-9561, martjushev@tpu.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0001-9351-5713, kozlov-viktor@bk.ru; [d] https://orcid.org/0000-0002-1388-6125, julx@bk.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669

История статьи:
Поступила: 13 сентября 2024
Рецензирование: 05 октября 2024
Принята к печати: 10 октября 2024
Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:
Аддитивные технологии
Инконель 625
Электродуговая наплавка
Электронно-лучевая наплавка
Микроструктура

Финансирование
Данное исследование было поддержано программой развития ТПУ.

Благодарности
Исследования выполнены на оборудовании ИЦ «Проектирование и производство высокотехнологичного оборудования» и ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие обрабатывающей промышленности привело к появлению новых методов изготовления заготовок и деталей. Одним из таких новых перспективных методов является аддитивное производство, в частности технологии электродуговой и электронно-лучевой наплавки проволокой. Применение этих технологий при производстве заготовок из жаропрочных материалов дает ряд существенных преимуществ. В работе представлены результаты исследования микроструктуры образцов из инконеля марки 625. Образцы были изготовлены путем 3D-наплавки электронным лучом в вакууме и электродуговой наплавки в среде защитных газов. **Цель работы:** сравнительный анализ микроструктуры заготовок из никелевого сплава инконель 625, полученных с помощью технологий EBAM и WAAM. **Методы и материалы.** Используемые в работе образцы изготавливались на оборудовании, разработанном в Томском политехническом университете. Проводились металлографические исследования и растровая электронная микроскопия, была определена микротвердость полученных образцов. **Результаты и обсуждение.** Сравнение образцов, полученных по двум различным технологиям аддитивной печати – EBAM и WAAM, показало общие закономерности формирования структуры, появляющиеся при использовании аддитивных технологий. У образцов наблюдалась дендритная микроструктура, в образцах присутствовали зоны, богатые Ti, Mo и Nb, что характерно для неравновесного охлаждения. В образцах также наблюдались поры. Зерна в образцах имели преимущественно вытянутую форму и ориентировались в направлении теплоотвода. Длина зерен достигала значений 1 мм. Различия в образцах наблюдались в количестве образующихся включений интерметаллидов, в количестве образовавшихся пор и в размере зерен. Технология EBAM дает более однородную структуру. Различие в твердости между EBAM и WAAM составляет около 3,5 %. При этом скорость изготовления образцов по технологии WAAM существенно выше.

Для цитирования: Структура заготовок из сплава инконель 625, полученных электродуговой наплавкой и наплавкой с помощью электронного луча / А.Е. Болтрушевич, Н.В. Мартюшев, В.Н. Козлов, Ю.С. Кузнецова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 206–217. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-206-217.

Введение

В последние годы аддитивное производство стремительно расширяет сферу применения благодаря своим уникальным преимуществам. Этот метод производства позволяет создавать детали сложной формы с высокой точностью, используя различные материалы, от пластика до металла, и при этом значительно сокращая время и затраты по сравнению с традиционными техно-

***Адрес для переписки**
Мартюшев Никита Владимирович, к.т.н., доцент
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
пр. Ленина, 30,
634050, г. Томск, Россия
Тел.: 8 (3822) 60-62-85, **e-mail:** martjushev@tpu.ru

логиями [1–4]. В зависимости от требований к конечному продукту специалисты применяют разные технологии аддитивного производства. Активное развитие аддитивных технологий (АТ) приводит к удешевлению продукции, производимой с их помощью. Это позволяет быстро изготавливать детали и заготовки не только сложной, но более простой формы из дорогостоящих материалов [5, 6]. Примером таких деталей могут быть фланцы из жаростойких материалов. При использовании АТ нет необходимости изготавливать отверстие и также сокращается объем материала, снимаемого за счет субтрактивной обработки. Это делает применение АТ в данном случае экономически обоснованным. АТ также позволяет изготавливать фланцы под конкретный типоразмер, что дает еще большую экономию времени и затрат в сравнении с изготовлением аналогичной детали из проката [7–9].

Для быстрого производства деталей простой формы типа фланцев из жаропрочных материалов, в частности инконелей, наиболее подходят технологии электронно-лучевой (EBAM) и электродуговой печати (WAAM) [10].

EBAM использует мощный электронный луч для расплавления металлического проволочного материала, который наплавляется слой за слоем, образуя требуемую деталь. Этот метод позволяет создавать детали больших размеров с высокой плотностью и прочностью [11–14]. Одно из ключевых преимуществ аддитивного производства заключается в его способности создавать сложные 3D-компоненты с большей скоростью и гибкостью по сравнению с традиционными методами, такими как фрезерование или литье [15, 16]. 3D-печать позволяет сократить количество этапов производства, минимизировать отходы материала и создавать детали, которые невозможно изготовить другими способами. Это открывает новые возможности для инженеров, позволяя им воплощать в жизнь самые смелые идеи [17–20].

Наплавка заготовок в вакууме по технологии EBAM дает возможность существенно ускорить процесс изготовления заготовки в сравнении с технологией SLS (селективное лазерное спекание). Однако это достаточно дорогостоящий и трудоемкий метод изготовления деталей [21, 22]. Большего удешевления и упрощения технологии изготовления заготовки можно добиться, используя WAAM-технологию. Эта технология использует дуговую сварку для наплавления металлической проволоки слой за слоем, образуя трехмерные объекты. WAAM позволяет создавать крупногабаритные детали значительно быстрее, чем другие аддитивные технологии, такие как электронно-лучевая наплавка. WAAM подходит для производства деталей из различных металлов, включая сталь, титан и никелевые сплавы [23–25]. Недостатками данной технологии являются возможность образования пористости из-за печати в газовой среде и худшее качество печатаемой поверхности.

Особенности работы EBAM и WAAM будут отражаться на структуре и свойствах получаемых заготовок. Технология EBAM и в настоящее время применяется довольно редко для печати жаропрочных сплавов [26, 27]. Это обусловлено достаточно низкой распространенностью и новизной данной технологии. Печать жаропрочных сплавов с помощью WAAM-технологии тоже применяется нечасто, так как имеет ряд технологических сложностей. По этим причинам работ, посвященных печати технологиями EBAM и WAAM жаропрочных никелевых сплавов, крайне мало [28–31].

***Цель данной работы*:** сравнительный анализ микроструктуры заготовок из никелевого сплава инконель 625, полученных с помощью технологий EBAM и WAAM.

Методы и материалы

В качестве материала для изготовления образцов был выбран распространенный никелевый сплав марки инконель 625. Образцы печатались проволокой диаметром 1,2 мм. Печать осуществлялась на подложке размерами 110×110×20 мм, изготовленной из нержавеющей стали. Подложка помещалась над опорной пластиной и плотно прижималась зажимами. Основная подложка используется для нанесения расплавленного сырья на деталь. Она выполняет функцию защиты от проникновения расплава в подложку и повреждения стола.

В используемой для печати установке имеется возможность регулировки положения механизма подачи проволоки. Регулировка положения осуществляется относительно электронного луча и печатаемой заготовки. Это позволяет обеспечить стабильность передачи материала.

В процессе сварки между плавким предохранителем и расплавленной ванной создается перемычка из расплавленного металла [32, 33].

Химический состав материала проволоки, используемой для электронно-лучевой печати, приведен в табл. 1.

Печать первой группы образцов осуществлялась на электронно-лучевой установке наплавки проволокой, изготовленной в Томском политехническом университете. Печать второй группы образцов – на установке электродуговой наплавки проволокой, также изготовленной в Томском политехническом университете.

В ходе экспериментальных работ были напечатаны образцы четырех типов. Изготовлены вертикально и горизонтально ориентированные образцы по каждой из исследуемых технологий – EBAM и WAAM.

Для исследования микроструктуры были сделаны поперечные сечения образцов. Травление микроструктуры осуществляли с помощью смеси концентрированных азотной кислоты HNO_3 (67 масс. %) и соляной кислоты HCl (33 масс. %), взятых в соотношении 1:3 по объему. Микроструктурные исследования проводили с помощью металлографического микроскопа ММР-1 производства БИОМЕД. Фотографии микроструктуры получены с применением видеоокуляра DCM-510 SCOPE. Микротвердость измеряли посредством автоматического комплекса на базе микротвердомера EMCO-TEST DuraScan-10. Измерения выполняли на тех же образцах, на которых проводили металлографические исследования. Измерения проводили индентором Виккерса при нагрузке 1 кгс с выдержкой 10 с.

Таблица 1
Table 1

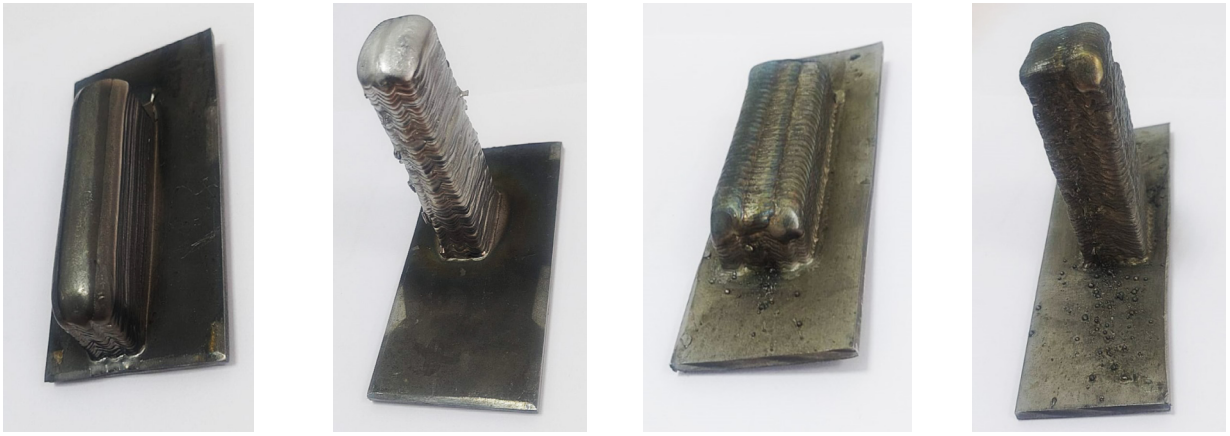
Химический состав проволоки из никелевого сплава марки инконель 625
Chemical composition of Inconel 625 nickel alloy wire

Химический элемент	Ta	Al	Nb	Mo	Cr	Si	Fe	Co	Ti	Mn	Ni
%	0,3	0,38	2,8	7,5	22,5	0,8	1,3	0,2	0,35	0,1	63,68

Результаты и их обсуждение

В первую очередь были получены четыре образца для проведения исследований – по два образца с помощью каждой из технологий, EBAM и WAAM. Были изготовлены образцы вертикальной ориентации (рис. 1, *а*, *в*) и горизонтальной ориентации (рис. 1, *б*, *г*). Из приведенных фотографий видно, что точность и качество поверхности образцов, полученных с помощью электронно-лучевой наплавки, выше. В этом случае меньше разбрызгивания металла, чем при изготовлении с помощью электродуговой наплавки. Скорость остывания образцов, полученных с помощью EBAM, ниже, чем при WAAM-печати. При EBAM теплоотвод затруднен из-за отсутствия атмосферы. При WAAM-наплавке инконеля используется гелий. Кроме того, видно, что в EBAM-образце большее количество слоев. При WAAM-наплавке толщина печатаемого слоя больше и скорость печати выше, но это сопровождается существенными колебаниями температуры. Обусловленные температурными колебаниями напряжения вызывают деформацию подложки даже при ее толщине около 5 мм. Вертикальная ориентация образцов дает большую скорость, но при этом возникают большие напряжения. При горизонтальной ориентации образец остывает более равномерно. Это выражается в меньшей деформации подложки.

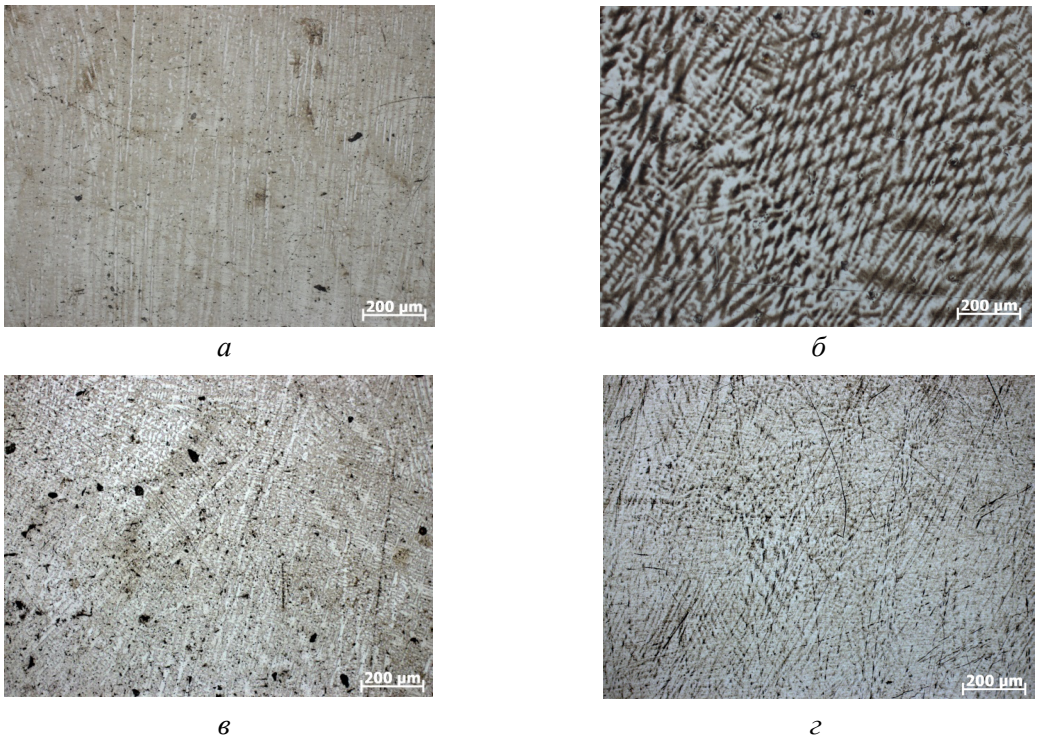
Микроструктура образцов из инконеля 625, полученных с помощью технологий EBAM и WAAM, представлена на рис. 2, *а–г*. На этом рисунке показаны микрофотографии, сделанные с помощью оптического микроскопа в центре образца. Наблюдается удлиненная ячеистая структура с яркими частицами в междендритных областях, а также четко видно наличие дендритной структуры во всех образцах. Для горизонтальных образцов при обеих технологиях дендриты имеют длинные оси первого порядка, при этом оси второго порядка практически отсутствуют.



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Фотографии образцов, полученных с помощью различных аддитивных технологий:
а – горизонтальный образец, полученный EBAM-технологией; *б* – вертикальный образец, полученный EBAM-технологией; *в* – горизонтальный образец, полученный WAAM-технологией; *г* – вертикальный образец, полученный WAAM-технологией

Fig. 1. Photos of specimens obtained using various additive technologies:
а – horizontal specimen obtained using *EBAM* technology; *б* – vertical specimen obtained using *EBAM* technology; *в* – horizontal specimen obtained using *WAAM* technology; *г* – vertical specimen obtained using *WAAM* technology



а *б*

в *г*

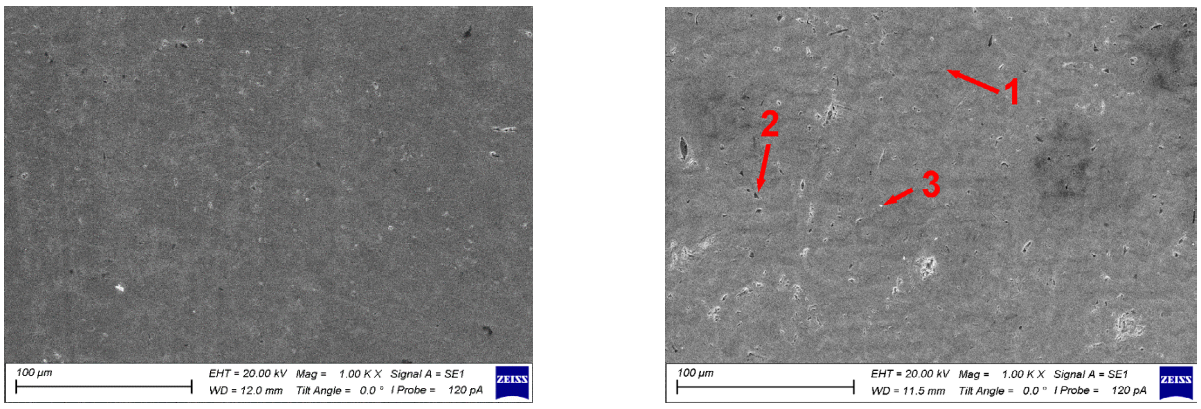
Рис. 2. Микроструктура образцов, полученных с помощью различных аддитивных технологий:
а – горизонтальный образец, полученный EBAM-технологией; *б* – вертикальный образец, полученный EBAM-технологией; *в* – горизонтальный образец, полученный WAAM-технологией; *г* – вертикальный образец, полученный WAAM-технологией

Fig. 2. Microstructure of specimens obtained using various additive technologies:
а – horizontal specimen obtained using *EBAM* technology; *б* – vertical specimen obtained using *EBAM* technology; *в* – horizontal specimen obtained using *WAAM* technology; *г* – vertical specimen obtained using *WAAM* technology

Для вертикальных образцов скорость охлаждения меньше, и успевают сформироваться оси второго порядка, а в некоторых местах можно увидеть зародыши осей третьего порядка. Отличие в развитии дендритов хорошо заметно для EBAM-технологии (рис. 2, *а* и *б*). Кроме того, из показанной микроструктуры видно, что зерна имеют текстуру. Текстура более развита для вертикальных образцов из-за большей скорости охлаждения.

Безусловно, разная скорость охлаждения приводит к образованию различных размеров зерен в образцах. Однако в целом для всех исследуемых технологий наблюдается одна и так же тенденция: зерна имеют дендритное строение, зерна вытянуты в направлении теплоотвода. Причем длина зерен увеличивается при удалении от подложки. Для вертикальных образцов скорость охлаждения ниже и длина зерен в полученных образцах может достигать 0,8…0,9 мм (вертикальные EBAM-образцы). Для горизонтальных образцов длина зерен достигает 0,3…0,5 мм. Эти данные согласуются с результатами других исследователей. В работе [6] образец из инконеля 625, изготовленный с использованием техники SLM, имел длину зерна около 1 мм. Образцы из инконеля 718, полученные с использованием процесса прямого лазерного аддитивного сплавления в работе [32], имели длину 3 мм. Авторы работ [11, 16] показали, что равноосные зерна в основном располагаются в нижней части, рядом с подложкой инконеля 625. При удалении от подложки зерна вытягиваются, появляется текстура и длина зерен значительно увеличивается. Наши результаты хорошо согласуются с данными этих авторов. Закономерности формирования структуры образцов при печати с помощью технологий EBAM и WAAM аналогичны технологии SLM. Отличие наблюдается в основном в размерах фазовых составляющих.

Фотографии поверхности напечатанных образцов из инконеля 625, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), представлены на рис. 3. Как и в других исследованиях [2, 4, 5, 7], в осажденном материале часто наблюдались мелкие микронные частицы. Учитывая размер частиц фазовых составляющих, их количественный химический анализ может быть затруднен из-за сигнала XRD, исходящего от матричного материала. Химический состав изготовленного материала (табл. 2) во многом подобен составу проволоки, используемой для наплавки, за исключением таких элементов, как железо и алюминий, содержание которых было ниже. Частицы, отмеченные на рис. 3 как *3*, показали больше Nb, Mo, Ti и C (табл. 2). Это указывает на присутствие карбидов MC. Аналогичная ситуация также наблюдалось в сплаве инконель 625, изготовленном методом аддитивного производства, у авторов работ [2, 4, 7]. Фаза, отме-



а *б*

Рис. 3. Результаты СЭМ образцов, полученных с помощью различных аддитивных технологий:
а – горизонтальный образец, полученный EBAM-технологией; *б* – горизонтальный образец, полученный WAAM-технологией

Fig. 3. SEM of specimens obtained using various additive technologies:
а – horizontal specimen obtained using *EBAM* technology; *б* – horizontal specimen obtained using *WAAM* technology

Таблица 2
Table 2

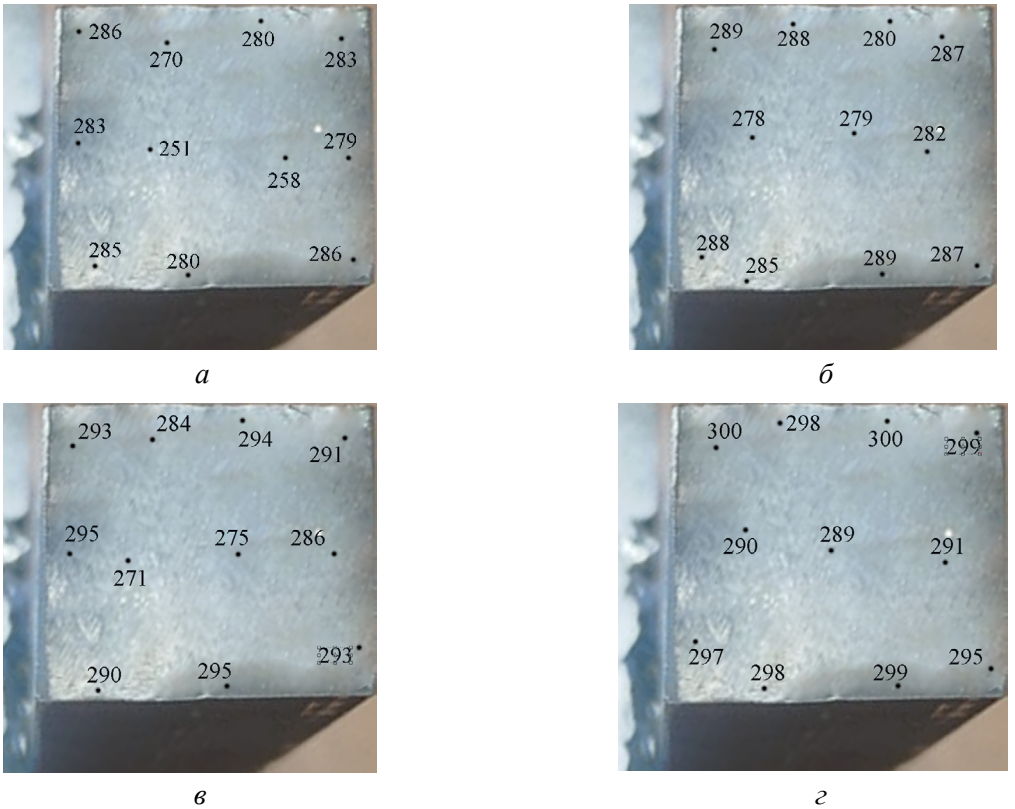
Химический состав изготовленного материала
Chemical composition of the manufactured material

Исследуемая область с рис. 3, %	Ni	Cr	Nb	Mo	Si	Fe	Al	Ti	C
1	64,0	22,3	1,1	4,2	0,7	1,3	0,1	0,1	6,2
2	2,7	3,5	7,2	0,5	–	0,7	–	48,1	37,3
3	38,5	21,6	16,7	8,9	4,1	0,7	0,2	0,2	9,1

ченная как точка *2*, имела повышенное количество Ni, Nb, Cr и Mo без присутствия углерода (табл. 2). Это показывает присутствие интерметаллических фаз.

Микротвердость заготовок определяли методом Виккерса (при нагрузке 1 кгс с выдержкой 10 с) как среднее значение двадцати отпечатков в разных местах (рис. 4).

Анализ показателей микротвердости (табл. 3) показывает, что твердость вертикальных образцов ниже, чем горизонтальных. Для образцов, изготовленных по технологиям EBAM и WAAM, это расхождение составляет около 3,5 %. Из полученных данных также видно, что дисперсия значений твердости для вертикально ориентированных образцов значительно выше, чем для



а *б*

в *г*

Рис. 4. Микротвердость образцов, полученных с помощью различных аддитивных технологий:
а – горизонтальный образец, полученный EBAM-технологией; *б* – вертикальный образец, полученный EBAM-технологией; *в* – горизонтальный образец, полученный WAAM-технологией; *г* – вертикальный образец, полученный WAAM-технологией

Fig. 4. Microhardness of specimens obtained using various additive technologies:
а – horizontal specimen obtained using *EBAM* technology; *б* – vertical specimen obtained using *EBAM* echnology; *в* – horizontal specimen obtained using *WAAM* technology; *г* – vertical specimen obtained using *WAAM* technology

Таблица 3
Table 3

Микротвердость образцов
Microhardness of specimens

Технология изготовления образца	Ориентация образца	Максимальная твердость, HV	Минимальная твердость, HV	Средняя твердость, HV
WAAM	Горизонтально	251	286	273,0
WAAM	Вертикально	278	289	284,2
EBAM	Горизонтально	271	295	283,4
EBAM	Вертикально	289	300	294,4

горизонтально ориентированных. Это можно объяснить меньшим градиентом температур в процессе печати. Для горизонтальных образцов теплоотвод идет более интенсивно, что приводит к образованию более значительных температурных градиентов и формированию менее однородной структуры. Это согласуется с данными анализа микроструктуры образцов. В вертикально ориентированных образцах формируется более однородная структура, в них меньше пор, а также меньше включений интерметаллидов в сравнении с горизонтально ориентированными образцами.

Полученные данные также показывают, что твердость образцов, изготовленных по технологии EBAM, выше, чем у образцов, изготовленных по технологии WAAM. Это тоже хорошо согласуется с результатами анализа микроструктуры. Технология EBAM из-за печати в вакууме дает более плавный процесс охлаждения образцов, что приводит к образованию более однородной структуры, обладающей большей твердостью.

Выводы

Сравнение образцов, изготовленных двумя различными технологиями аддитивной печати – EBAM и WAAM, было проведено с учетом различий в получаемой микроструктуре и их твердости. Печать с использованием обеих технологий привела к образованию дендритной микроструктуры образцов. Во всех образцах присутствовали зоны, богатые Ti, Mo и Nb. В образцах также наблюдались поры. Зерна в образцах имели преимущественно вытянутую форму и ориентировались в направлении теплоотвода. Длина зерен достигала значений в 1 мм. Перечисленные особенности наблюдались для всех полученных образцов независимо от технологии изготовления или ориентации образца при печати.

Различия в образцах наблюдались в количестве образующихся включений интерметаллидов и в размере зерен. Так, технология EBAM дает более однородную структуру. В результате этого твердость образцов, полученных по технологии EBAM, выше, чем твердость образцов, полученных по технологии WAAM, при аналогичной их ориентации при печати. Различие в твердости между EBAM и WAAM составляет около 3,5 %. При этом скорость изготовления образцов по WAAM-технологии существенно выше.

Список литературы

1. *Alvarez L.F., Garcia C., Lopez V.* Continuous cooling transformations in martensitic stainless steels // ISIJ International. – 1994. – Vol. 34 (6). – P. 516–521. – DOI: 10.2355/isijinternational.34.516.

2. Microstructure evolution characteristics of Inconel 625 alloy from selective laser melting to heat treatment / C. Li, R. White, X. Fang, M. Weaver, Y. Guo // Materials Science and Engineering: A. – 2017. – Vol. 705. – P. 20–31.

3. *Liverani E., Fortunato A.* Additive manufacturing of AISI 420 stainless steel: process validation, defect analysis and mechanical characterization in different process and post-process conditions // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 117 (3–4). – P. 809–821. – DOI: 10.1007/s00170-021-07639-6.

4. Microstructure characteristics of Inconel 625 superalloy manufactured by selective laser melting / S. Li, Q. Wei, Y. Shi, Z. Zhu, D. Zhang // Journal of Materials Science & Technology. – 2015. – Vol. 31. – P. 946–952.

5. Formation of the Ni_3Nb δ-phase in stress-relieved Inconel 625 produced via laser powder-bed fusion additive manufacturing / E.A. Lass, M.R. Stoudt, M.E. Wil-

liams, M.B. Katz, L.E. Levine, T.Q. Phan, T.H. Gnaeupel-Herold, D.S. Ng // Metallurgical and Materials Transactions: A. – 2017. – Vol. 48. – P. 5547–5558. – DOI: 10.1007/s11661-017-4304-6.

6. Characterization and comparison of Inconel 625 processed by selective laser melting and laser metal deposition / G. Marchese, X.G. Colera, F. Calignano, M. Lorusso, S. Biamino, P. Minetola, D. Manfredi // Advanced Engineering Materials. – 2016. – Vol. 19. – P. 1–9. – DOI: 10.1002/adem.201600635.

7. Effect of deposition strategy on the microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by pulsed plasma arc deposition / F. Xu, Y. Lv, B. Xu, Y. Liu, F. Shu, P. He // Materials & Design. – 2013. – Vol. 45. – P. 446–455.

8. *Grzesik W.* Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: a review // Journal of Machine Engineering. – 2018. – Vol. 18 (4). – P. 5–24. – DOI: 10.5604/01.3001.0012.7629.

9. Integrated quality ensuring technique of plasma wear resistant coatings / E. Zverev, V. Skeeba, N.V. Martyushev, P. Skeeba // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 736. – P. 132–137. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.132.

10. *Dang J., Zhang H., Ming W.* New observations on wear characteristics of solid Al_2O_3/Si_3N_4 ceramic tool in high speed milling of additive manufactured Ti6Al4V // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46 (5). – P. 5876–5886. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.11.039.

11. Influence of shielding gas composition on structure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Inconel 625 / I. Jurić, I. Garašić, M. Bušić, Z. Kožuh // JOM. – 2018. – Vol. 71. – P. 703–708. – DOI: 10.1007/s11837-018-3151-2.

12. The features of steel surface hardening with high energy heating by high frequency currents and shower cooling / V. Ivancivsky, V. Skeeba, I. Bataev, D.V. Lobanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 156. – P. 012025. – DOI: 10.1088/1757-899X/156/1/012025.

13. *Keist J.S., Palmer T.A.* Development of strength-hardness relationships in additively manufactured titanium alloys // Materials Science and Engineering: A. – 2017. – Vol. 693. – P. 214–224. – DOI: 10.1016/j.msea.2017.03.102.

14. *Balovtsev S.V., Merkulova A.M.* Comprehensive assessment of buildings, structures and technical devices reliability of mining enterprises // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 3. – С. 170–181. – DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_170.

15. Cutting forces analysis in additive manufactured AISI H13 alloy / F. Montevecchi, N. Grossi, H. Takagi, A. Scippa, H. Sasahara, G. Campatelli // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 46. – P. 476–479. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.034.

16. Microstructure and fracture behavior of TiC particles reinforced Inconel 625 composites prepared by laser additive manufacturing / M.Y. Shen, X.J. Tian, N. Liu, H.B. Tang, X. Cheng // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 734. – P. 188–195. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.10.280.

17. *Gong Y., Li P.* Analysis of tool wear performance and surface quality in post milling of additive manufactured 316L stainless steel // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2019. – Vol. 33. – P. 2387–2395. – DOI: 10.1007/s12206-019-0237-x.

18. *Ni Ch., Zhu L., Yang Zh.* Comparative investigation of tool wear mechanism and corresponding machined surface characterization in feed-direction ultrasonic vibration assisted milling of Ti–6Al–4V from dynamic view // Wear. – 2019. – Vol. 436. – P. 203006. – DOI: 10.1016/j.wear.2019.203006.

19. *Xiong X., Haiou Z., Guilan W.* A new method of direct metal prototyping: hybrid plasma deposition and milling // Rapid Prototyping Journal. – 2008. – Vol. 14 (1). – P. 53–56. – DOI: 10.1108/13552540810841562.

20. *Nekrasova T.V., Melnikov A.G.* Creation of ceramic nanocomposite material on the basis of ZrO_2-Y_2O_3-Al_2O_3 with improved operational properties of the working surface // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 77–81. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.77.

21. *Martyushev N., Petrenko Yu.* Effects of crystallization conditions on lead tin bronze properties // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 880. – P. 174–178. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.174.

22. Повышение ресурса рабочих колес центробежных насосов шахтного водоотлива / В.В. Зотов, В.У. Мнацаканян, М.М. Базлин, В.С. Лакшинский, Е.В. Дятлова // Горная промышленность. – 2024. – № 2. – С. 143–146. – DOI: 10.30686/1609-9192-2024-2-143-146.

23. *Усанова О.Ю., Столяров В.В., Рязанцева А.В.* Исследование свойств ионно-имплантированного титанового сплава с памятью формы, используемого в конструкциях горнодобывающего оборудования // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14, № 4. – С. 695–701. – DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-695-701.

24. *Cahoon J.R., Broughton W.H., Kutzak A.R.* The determination of yield strength from hardness measurements // Metallurgical Transactions. – 1971. – Vol. 2 (7). – P. 1979–1983. – DOI: 10.1007/bf02913433.

25. Change in the properties of rail steels during operation and reutilization of rails / K. Yelemessov, D. Baskanbayeva, N.V. Martyushev, V.Y. Skeeba, V.E. Gozbenko, A.I. Karlina // Metals. – 2023. – Vol. 13. – P. 1043. – DOI: 10.3390/met13061043.

26. *Lou X., Andresen P.L., Rebak R.B.* Oxide inclusions in laser additive manufactured stainless steel and their effects on impact toughness and stress corrosion cracking behavior // Journal of Nuclear Materials. – 2018. – Vol. 499. – P. 182–190. – DOI: 10.1016/j.jnucmat.2017.11.036.

27. Effect of heat treatment on microstructure, mechanical and corrosion properties of austenitic stainless steel 316L using arc additive manufacturing / X. Chen, J. Li, X. Cheng, H. Wang, Z. Huang // Materials Science and Engineering: A. – 2018. – Vol. 715. – P. 307–314. – DOI: 10.1016/j.msea.2017.10.002.

28. *Яценко В.А., Крюков Я.В.* Фрагментация и консолидация производственных цепочек в мировой редкоземельной промышленности // Горная промышленность. – 2022. – № 1. – С. 66–74. – DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-66-74.

29. *Pashkov E.N., Martyushev N.V., Ponomarev A.V.* An investigation into autobalancing devices with multireservoir system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – Vol. 66 (1). – P. 012014. – DOI: 10.1088/1757-899X/66/1/012014.

30. *Хайдоров А.Д., Юнусов Ф.А.* Вакуумная термическая обработка высоколегированных коррозионностойких сталей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 226–235.

31. Rationalization of microstructure heterogeneity in INCONEL 718 builds made by the direct laser additive manufacturing process / Y. Tian, D. McAllister, H. Colijn, M. Mills, D.F. Farson, M. Nordin, S.S. Babu // Metallurgical and Materials Transactions: A. – 2014. – Vol. 45. – P. 4470–4483. – DOI: 10.1007/s11661-014-2370-6.

32. *Кречетов А.А.* Обеспечение качества сварных соединений армокаркаса анкерной крепи путем роботизации производства // Горная промышленность. – 2021. – № 3. – С. 130–134. – DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-130-134.

33. The resource efficiency assessment technique for the foundry production / I.G. Vidayev, N.V. Martyushev, A.S. Ivashutenko, A.M. Bogdan // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 880. – P. 141–145. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.141.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2024 vol. 26 no. 4 pp. 206–217
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-206-217

NSTU NETI

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Structure of Inconel 625 alloy blanks obtained by electric arc surfacing and electron beam surfacing

Aleksandr Boltrushevich [1, a], ***Nikita Martyushev*** [1, b, *], ***Victor Kozlov*** [1, c], ***Yulia Kuznetsova*** [2, d]

[1] National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation
[2] Admiral Ushakov State Maritime University, 93, Lenin Ave., Novorossiysk, 353924, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0001-9971-7850, aeb20@tpu.ru; [b] https://orcid.org/0000-0003-0620-9561, martjushev@tpu.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0001-9351-5713, kozlov-viktor@bk.ru; [d] https://orcid.org/0000-0002-1388-6125, julx@bk.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 13 September 2024
Revised: 05 October 2024
Accepted: 10 October 2024
Available online: 15 December 2024

Keywords:
Additive manufacturing
Inconel 625
Electric arc surfacing
Electron beam surfacing
Microstructure

Funding
This research was supported by TPU development program.

Acknowledgements
The research was carried out at the equipment of the Engineering Center "Design and Production of High-Tech Equipment" and the shared research facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. Development of the manufacturing industry has led to the emergence of new methods for manufacturing blanks and parts. One of these new promising methods is additive manufacturing and, in particular, electric arc and electron beam surfacing technologies. The use of these technologies in the production of blanks from heat-resistant materials provides a number of significant advantages. The paper presents the results of a study of the microstructure of *Inconel 625* specimens obtained using *EBAM* and *WAAM* technologies. **The purpose of the work** is a comparative analysis of the microstructure of *Inconel 625* nickel alloy blanks obtained using *EBAM* and *WAAM* technologies. **Methods and materials.** The paper examined specimens obtained using *EBAM* and *WAAM* technologies. The specimens were manufactured using equipment developed at Tomsk Polytechnic University. Metallographic studies, scanning electron microscopy were carried out, and the microhardness of the obtained specimens was determined. **Results and discussion.** Comparison of specimens obtained by two different additive printing technologies *EBAM* and *WAAM* showed general patterns of structure formation that appear when using additive technologies. The specimens have a dendritic microstructure and contain zones rich in *Ti*, *Mo* and *Nb*, which is typical for nonequilibrium cooling. Pores are also observed in the specimens. The grains in the specimens have a predominantly elongated shape and are oriented in the direction of heat removal. The length of the grains reaches 1 mm. Differences in the specimens are observed in the number of formed inclusions of intermetallic compounds, in the number of formed pores, in the size of the grains. The *EBAM* technology provides more uniform structure. The difference in hardness between *EBAM* and *WAAM* is about 3.5 %. At the same time, the speed of specimen production using the *WAAM* technology is significantly higher.

For citation: Boltrushevich A.E., Martyushev N.V., Kozlov V.N., Kuznetsova Yu.S. Structure of Inconel 625 alloy blanks obtained by electric arc surfacing and electron beam surfacing. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 206–217. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-206-217. (In Russian).

References

1. Alvarez L.F., Garcia C., Lopez V. Continuous cooling transformations in martensitic stainless steels. *ISIJ International*, 1994, vol. 34 (6), pp. 516–521. DOI: 10.2355/isijinternational.34.516.

2. Li C., White R., Fang X., Weaver M., Guo Y. Microstructure evolution characteristics of Inconel 625 alloy from selective laser melting to heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, vol. 705, pp. 20–31.

*** Corresponding author**
Martyushev Nikita V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Avenue,
634050, Tomsk, Russian Federation
Tel.: +7 3822 60-62-85, **e-mail:** martjushev@tpu.ru

3. Liverani E., Fortunato A. Additive manufacturing of AISI 420 stainless steel: process validation, defect analysis and mechanical characterization in different process and post-process conditions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 117 (3–4), pp. 809–821. – DOI: 10.1007/s00170-021-07639-6.

4. Li S.,Wei Q., Shi Y., Zhu Z., Zhang D. Microstructure characteristics of Inconel 625 superalloy manufactured by selective laser melting. *Journal of Materials Science & Technology*, 2015, vol. 31, pp. 946–952.

5. Lass E.A., Stoudt M.R., Williams M.E., Katz M.B., Levine L.E., Phan T.Q., Gnaeupel-Herold T.H., Ng D.S. Formation of the Ni_3Nb δ-phase in stress-relieved Inconel 625 produced via laser powder-bed fusion additive manufacturing. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2017, vol. 48, pp. 5547–5558. DOI: 10.1007/s11661-017-4304-6.

6. Marchese G., Colera X.G., Calignano F., Lorusso M., Biamino S., Minetola P., Manfredi D. Characterization and comparison of Inconel 625 processed by selective laser melting and laser metal deposition. *Advanced Engineering Materials*, 2016, vol. 19, pp. 1–9. DOI: 10.1002/adem.201600635.

7. Xu F., Lv Y., Xu B., Liu Y., Shu F., He P. Effect of deposition strategy on the microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by pulsed plasma arc deposition. *Materials & Design*, 2013, vol. 45, pp. 446–455.

8. Grzesik W. Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: a review. *Journal of Machine Engineering*, 2018, vol. 18 (4), pp. 5–24. DOI: 10.5604/01.3001.0012.7629.

9. Zverev E., Skeeba V., Martyushev N.V., Skeeba P. Integrated quality ensuring technique of plasma wear resistant coatings. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 736, pp. 132–137. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.132.

10. Dang J., Zhang H., Ming W. New observations on wear characteristics of solid Al_2O_3/Si_3N_4 ceramic tool in high speed milling of additive manufactured Ti6Al4V. *Ceramics International*, 2020, vol. 46 (5), pp. 5876–5886. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.11.039.

11. Jurić I., Garašić I., Bušić M., Kožuh Z. Influence of shielding gas composition on structure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Inconel 625. *JOM*, 2018, vol. 71, pp. 703–708. DOI: 10.1007/s11837-018-3151-2.

12. Ivancivsky V., Skeeba V., Bataev I., Lobanov D.V. The features of steel surface hardening with high energy heating by high frequency currents and shower cooling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 156, p. 012025. DOI: 10.1088/1757-899X/156/1/012025.

13. Keist J.S., Palmer T.A. Development of strength-hardness relationships in additively manufactured titanium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, vol. 693, pp. 214–224. DOI: 10.1016/j.msea.2017.03.102.

14. Balovtsev S.V., Merkulova A.M. Comprehensive assessment of buildings, structures and technical devices reliability of mining enterprises. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2024, no. 3, pp. 170–181. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_170.

15. Montevecchi F., Grossi N., Takagi H., Scippa A., Sasahara H., Campatelli G. Cutting forces analysis in additive manufactured AISI H13 alloy. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 46, pp. 476–479. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.034.

16. Shen M.Y., Tian X.J., Liu N., Tang H.B., Cheng X. Microstructure and fracture behavior of TiC particles reinforced Inconel 625 composites prepared by laser additive manufacturing. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 734, pp. 188–195. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.10.280.

17. Gong Y., Li P. Analysis of tool wear performance and surface quality in post milling of additive manufactured 316L stainless steel. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, vol. 33, pp. 2387–2395. DOI: 10.1007/s12206-019-0237-x.

18. Ni Ch., Zhu L., Yang Zh. Comparative investigation of tool wear mechanism and corresponding machined surface characterization in feed-direction ultrasonic vibration assisted milling of Ti–6Al–4V from dynamic view. *Wear*, 2019, vol. 436, p. 203006. DOI: 10.1016/j.wear.2019.203006.

19. Xiong X., Haiou Z., Guilan W. A new method of direct metal prototyping: hybrid plasma deposition and milling. *Rapid Prototyping Journal*, 2008, vol. 14 (1), pp. 53–56. DOI: 10.1108/13552540810841562.

20. Nekrasova T.V., Melnikov A.G. Creation of ceramic nanocomposite material on the basis of ZrO_2-Y_2O_3-Al_2O_3 with improved operational properties of the working surface. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 379, pp. 77–81. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.77.

21. Martyushev N., Petrenko Yu. Effects of crystallization conditions on lead tin bronze properties. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 880, pp. 174–178. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.174.

22. Zotov V.V., Mnatsakanyan V.U., Bazlin M.M., Lakshinsky V.S., Dyatlova E.V. Povyshenie resursa rabochikh koles tsentrobezhnykh nasosov shakhtnogo vodootliva [Extending the service life of centrifugal dewatering pump impellers in mines]. *Gornaya promyshlennost' = Russian Mining Industry*, 2024, no. 2, pp. 143–146. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-2-143-146.

23. Usanova O.Yu., Stolyarov V.V., Ryazantseva A.V. Issledovanie svoistv ionno-implantirovannogo titanovogo splava s pamyat'yu formy, ispol'zuemogo v konstruktsiyakh gornodobyvayushchego oborudovaniya [Investigation of the properties of ion-implanted shape memory titanium alloy used in the construction of mining equipment]. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*, 2022, vol. 14, no. 4, pp. 695–701. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-695-701.

24. Cahoon J.R., Broughton W.H., Kutzak A.R. The determination of yield strength from hardness measurements. *Metallurgical Transactions*, 1971, vol. 2 (7), pp. 1979–1983. DOI: 10.1007/bf02913433.

25. Yelemessov K., Baskanbayeva D., Martyushev N.V., Skeeba V.Y., Gozbenko V.E., Karlina A.I. Change in the properties of rail steels during operation and reutilization of rails. *Metals*, 2023, vol. 13, p. 1043. DOI: 10.3390/met13061043.

26. Lou X., Andresen P.L., Rebak R.B. Oxide inclusions in laser additive manufactured stainless steel and their effects on impact toughness and stress corrosion cracking behavior. *Journal of Nuclear Materials.*, 2018, vol. 499, pp. 182–190. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2017.11.036.

27. Chen X., Li J., Cheng X., Wang H., Huang Z. Effect of heat treatment on microstructure, mechanical and corrosion properties of austenitic stainless steel 316L using arc additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, vol. 715, pp. 307–314. DOI: 10.1016/j.msea.2017.10.002.

28. Yatsenko V.A., Kryukov Ya.V. Fragmentatsiya i konsolidatsiya proizvodstvennykh tsepochek v mirovoi redkozemel'noi promyshlennosti [Fragmentation and consolidation of production chain in the global rare earth industry]. *Gornaya promyshlennost' = Russian Mining Industry*, 2022, no. 1, pp. 66–74. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-66-74.

29. Pashkov E.N., Martyushev N.V., Ponomarev A.V. An investigation into autobalancing devices with multireservoir system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66 (1), p. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/66/1/012014.

30. Haidorov A.D., Yunusov F.A. Vakuumnaya termicheskaya obrabotka vysokolegirovannykh korrozionnostoikikh stalei [Vacuum heat treatment of high alloy corrosion-resistant steels]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU = St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology*, 2017, vol. 23 (1), pp. 226–235. DOI: 10.18721/ JEST.230123.

31. Tian Y., McAllister D., Colijn H., Mills M., Farson D.F., Nordin M., Babu S.S. Rationalization of microstructure heterogeneity in INCONEL 718 builds made by the direct laser additive manufacturing process. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2014, vol. 45, pp. 4470–4483. DOI: 10.1007/s11661-014-2370-6.

32. Krechetov A.A. Obespechenie kachestva svarnykh soedinenii armokarkasa ankernoi krepi putem robotizatsii proizvodstva [Securing the quality of mesh weld joints in bolt support through robotized operation]. *Gornaya promyshlennost' = Russian Mining Industry*, 2021, no. 3, pp. 130–134. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-130-134.

33. Vidayev I.G., Martyushev N.V., Ivashutenko A.S., Bogdan A.M. The resource efficiency assessment technique for the foundry production. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 880, pp. 141–145. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.141.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).