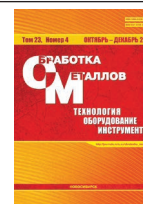




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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





















Структурные и механические свойства нержавеющей стали, сформированной в условиях послойного сплавления проволоки электронным лучом

Василий Фёдоров^{1, a, *}, Александр Рыгин^{2, b}, Василий Клименов^{1, c}, Никита Мартюшев^{1, d},
 Анатолий Клопотов^{2, 3, e}, Ирина Стрелкова^{1, f}, Сергей Матрёнин^{1, g}, Андрей Батранин^{1, h},
 Валентина Дерюшева^{1, i}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

² Томский государственный архитектурно-строительный университет, пл. Соляная, 2, 634003, Томск, Россия

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, 634050, Томск, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-5164-5875>,  fedorov@tpu.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0001-5664-8234>,  alexandr.rygin@gmail.com,
^c  <https://orcid.org/0000-0001-7583-0170>,  klimenov@tpu.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0003-0620-9561>,  martjusev@tpu.ru,
^e  <https://orcid.org/0000-0002-3690-0436>,  klopotovaa@tsuab.ru, ^f  <https://orcid.org/0000-0002-2222-2865>,  strelkova@tpu.ru,
^g  <https://orcid.org/0000-0002-2188-8120>,  mshv@tpu.ru, ^h  <https://orcid.org/0000-0001-9678-2905>,  batranin@tpu.ru,
ⁱ  <https://orcid.org/0000-0002-2116-3891>,  vderusheva@tpu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 62-4

История статьи:

Поступила: 02 сентября 2021
 Рецензирование: 16 сентября 2021
 Принята к печати: 23 сентября 2021
 Доступно онлайн: 15 декабря 2021

Ключевые слова:

Аддитивные технологии
 Электронно-лучевая наплавка
 Нержавеющая сталь
 Крупнозернистая аустенитная сталь

Финансирование:

Работа выполнена в рамках программы развития ТПУ.

Благодарности:

Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из перспективных современных способов формирования деталей машин являются аддитивные технологии. Изготовление этим методом дает возможность получать сложную форму деталей и качественную структуру. При этом качество формируемой структуры зависит от большого количества параметров – оборудования, режимов его работы, материала, среды и т.п. Крупные зарубежные компании, производящие 3D-принтеры, при поставке оборудования дают технологические рекомендации по работе на нем. Эти рекомендации включают информацию о производителях сырья (порошка для печати) и их выпускаемых продуктах, с которыми может работать их оборудование, а также о том, какие режимы необходимо использовать для работы с этими порошками. Для разрабатываемых в рамках исследовательских программ и программ импортозамещения отечественных установок эти параметры необходимо подбирать. Очень часто перед исследователями и разработчиками оборудования для трехмерной печати стоит задача получения на имеющемся сырье образцов деталей с минимальной пористостью, однородностью структуры и механическими свойствами хотя бы на уровне литых заготовок. Одним из распространенных материалов для трехмерной печати является нержавеющая сталь. Данный материал обладает высокой коррозионной стойкостью, что снижает требования к среде, в которой ведется 3D-печать. Изготовленные изделия из нержавеющей стали обладают хорошим сочетанием прочностных и пластических характеристик. **Целью работы** является получение образцов с минимальным количеством макро- и микродефектов и однородной структурой из нержавеющей стали методом наплавки проволокой на электронно-лучевой оригинальной установке, разработанной в Томском политехническом университете. **Методы исследования** образцов из нержавеющей стали марки AISI 308LSi, полученных трехмерной печатью: рентгеноструктурный анализ, томография, химический анализ, металлографический анализ, исследование микротвердости. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что напечатанные на разработанной установке электронно-лучевой трехмерной печати образцы из нержавеющей стали марки AISI 308LSi не содержат макродефектов во всем объеме образца. Присутствующие небольшие микродефекты остаточных газовых пор имеют размер не более 5,2 мкм. Микроструктура образцов формируется близкой к микроструктуре крупнозернистых литых аустенитных сталей и состоит из столбчатых зерен аустенитной матрицы γ-Fe и высокотемпературного феррита. Границы раздела между слоями укладки проволоки не выражены, но есть небольшие отличия по фазовому составу. На основе анализа полученных результатов установлено, что использование электронно-лучевой трехмерной печати для изготовления деталей из стали марки AISI 308LSi дает структуру, аналогичную литым аустенитным сталям. Появления макродефектов не происходит, а количество газовых пор мало.

Для цитирования: Структурные и механические свойства нержавеющей стали, сформированной в условиях послойного сплавления проволоки электронным лучом / В.В. Фёдоров, А.В. Рыгин, В.А. Клименов, Н.В. Мартюшев, А.А. Клопотов, И.Л. Стрелкова, С.В. Матрёнин, А.В. Батранин, В.Н. Дерюшева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 111–124. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-111-124.

*Адрес для переписки

Федоров Василий Викторович, заведующий лабораторией
 Национальный исследовательский
 Томский политехнический университет,
 пр. Ленина, 30, 634050, г. Томск, Россия
 Тел.: 8 (3822) 606006, e-mail: fedorov@tpu.ru

Ведение

Аддитивные технологии (АТ), или 3D-печать металлами, являются наиболее быстрорастущим сектором аддитивного производства (АП). АТ дают возможность производить детали, которые не могут быть выполнены другими методами, обеспечивают более низкую материалоемкость в сравнении с другими методами и снижают трудозатраты на изготовление деталей [1–4]. Важным в 3D-печати металлами является то, что твердотельная цифровая модель детали сочетается с программным обеспечением собственно печатающего устройства. Изготовление деталей осуществляется послойным наплавлением с использованием как различных источников тепла, так и разных исходных материалов. Потребность в таких изделиях существует в аэрокосмической промышленности, здравоохранении, энергетике и на транспорте. Примерами таких изделий могут служить индивидуальные имплантаты в медицине, лопатки турбин, специальные охладители с внутренними каналами, крепёжные элементы, сетчатые структуры и фермы с оптимальным соотношением веса и прочности для космической техники и т. п. Очень важно, что с помощью АП возможно изготовление деталей со специфическим составом и свойствами. Методы послойного сплавления металлического порошка на подложке при непосредственном оплавлении материала в зоне высокоэнергетического пучка получили наибольшее распространение в аддитивных технологиях изготовления металлических изделий. При этом в качестве высокоэнергетических источников чаще всего применяются лазеры и электронно-лучевые пушки [1–6], в отдельных случаях дуговые разряды и газоразрядная плазма [7, 8]. Следует отметить, что в последнее время наряду с селективными методами сплавления материалов в аддитивных технологиях всё чаще используют методы послойного сплавления при прямом осаждении материала в зоне высокоэнергетического лазерного или электронного луча. Нередко используется подача наплаваемого материала в виде проволоки или стержня [7–13]. В качестве высокоэнергетических источников тепла используются в таком случае электронно-лучевые или дуговые источники [7, 10–13]. Эти источники позволяют осуществлять процесс 3D-печати с высокой производительно-

стью и дают низкую пористость напечатанных изделий. В АТ в качестве исходных материалов для печати применяются различные металлы, сплавы и соединения [4, 14]. Однако наиболее часто используют нержавеющие стали и титановые сплавы. Потенциал применения изделий из них очень велик. Работа с титановыми сплавами сопряжена с рядом трудностей – их сплавление необходимо производить в вакууме. Сплавление в вакууме более эффективно при использовании электронного луча [1, 5, 10–13]. Нержавеющие стали аустенитного класса хорошо поддаются сплавлению как методом селективного лазерного спекания, так и методом электронно-лучевого сплавления [1, 4, 12, 14–17].

Структура изделий из нержавеющих сталей и титановых сплавов напрямую зависит от способа их получения. Параметры работы оборудования при печати напрямую оказывают влияние на прочность, твердость, жаропрочность, жаростойкость и другие свойства [18]. При печати стальных деталей методом послойного сплавления формируется направленная кристаллическая структура. В сравнении с традиционными методами изготовления деталей (литье, обработка металлов давлением) могут появляться новые фазы, изменяться химический состав, структура и дефекты на различных масштабных уровнях [4]. Изменения структуры стальных деталей, изготовленных методами АТ, дают им изменения в таких свойствах, как модуль упругости, прочность, вязкость, усталостная прочность, ползучесть. В конечном итоге эти изменения влияют на коррозионную стойкость сталей и изделий в целом [15–17]. Несмотря на значительное количество работ, посвященных 3D-печати сталями, работ, показывающих результаты исследований стальных образцов на различных масштабных уровнях и с использованием методов неразрушающего контроля, не так много. Несплошности и поры являются типичными дефектами для деталей, изготавливаемых методом послойной 3D-печати. Для устранения такого рода дефектов применяют различные виды последующей обработки. Дополнительная постобработка увеличивает сложность технологического процесса и повышает стоимость готового изделия. В то же время исследование порообразования при различных режимах работы 3D-принтера показывает, что возможно без дополнительной последующей обработки снизить пористость за счет

подбора режимов [19]. В последнее время для исследования пористости в деталях, напечатанных с помощью АТ, применяют различные методы неразрушающего контроля [13, 20]. Для неразрушающего контроля свойств напечатанных изделий из титановых сплавов нередко используют наноиндентирование. Этот метод применяется для изучения свойств титановых сплавов, формируемых в условиях плазменного воздействия [21], электронно-лучевого сплавления порошков [22] и электронно-лучевого аддитивного процесса [23]. С помощью наноиндентирования также исследуют материалы, полученные точечной контактной сваркой сплавов титана и золота [24].

Таким образом, разработка новых методов и методик производства материалов из нержавеющей стали является одним из ключевых направлений развития современного производства. Высокое значение имеет самостоятельная разработка установок и комплексов производства изделий аддитивными методами на их основе [12].

Целью работы является получение образцов из нержавеющей стали с однородной структурой и минимальным количеством макро- и микродефектов методом наплавки проволокой на электронно-лучевой установке, разработанной в Томском политехническом университете.

Материалы и методики

Печать образцов выполнялась на электронно-лучевой установке, разработанной Томским политехническим университетом [15], проволокой из нержавеющей стали. Печать осуществлялась при ускоряющем напряжении 30 кВ и токе луча

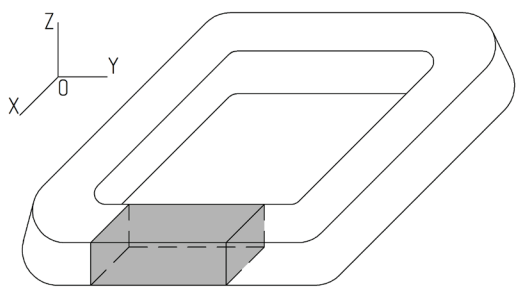
от 15 до 20 мА (в зависимости от удаленности от подложки). Таким образом, подводимая мощность изменялась от 450 до 600 Вт. При изготовлении образца первых три слоя были сделаны на ускоряющем напряжении 30 кВ и токе луча 20 мА. Высокое значение тока использовалось для разогрева подложки. Следующих 3 слоя формировались на ускоряющем напряжении 30 кВ и токе луча 17 мА для снижения скорости разогрева формируемого образца. Остальные слои формировались на ускоряющем напряжении 30 кВ и токе луча 15 мА, для того чтобы поступающее тепло успевало отводиться от заготовки. Сфокусированный луч (диаметр 150 мкм) перемещался по круговой развертке диаметром 4 мм. Частота движения луча по развертке 1000 Гц. В область развертки осуществлялась подача проволоки, а формирование геометрии образца достигалось за счет перемещения стола по трем осям. При этом расстояние между треками (hatching distance) составляло 4 мм, а высота слоя – порядка 0,8 мм, движение в горизонтальной плоскости зигзагообразное. Внешний вид образца и схема построения изображены на рис. 1.

Исходным материалом для получения заготовки методом электронно-лучевой наплавки являлась стальная проволока марки стали AISI 308LSi (аналог отечественной марки 04X19H9). Химический состав проволоки представлен в таблице.

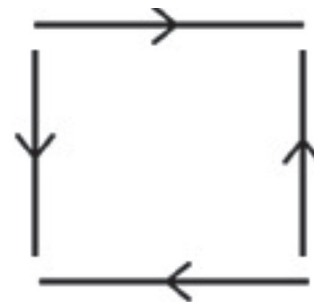
Образцы для последующих исследований были вырезаны электроискровым методом из заготовки с целью формирования геометрически правильных образцов в виде параллелепипедов с габаритными размерами 5×5×10 мм.



a



б



в

Рис. 1. Внешний вид полученной заготовки (*a*) и область вырезания образца (*б*), схема построения заготовки (*в*)

Fig. 1. Appearance of the obtained blank (*a*) and sample cutting area (*б*), blank construction scheme (*в*)

Химический состав исходного материала

Chemical composition of the raw material

Fe, % (balance)	C, %	Mn, %	Si, %	Cr, %	Ni, %	P, %	S, %
64,82...69,37	0,03	1,4...2,1	0,65...1,0	19,5...21,0	9,0...11,0	0,03	0,02

Томографические исследования за контролем микро- и макродефектности полученных образцов проведен на компьютерном рентгеновском микротомографе «Орел-МТ». Данный аппарат оборудован рентгеновской трубкой XWT 160-ТС и детекторной панелью PaxScan-2520V с системой контроля позиционирования. Сканирование образцов осуществлялось при следующих параметрах: ускоряющее напряжения – 130 кВ, сила тока – 27 мкА, разрешение – 11,3 мкм, количество проекций – 1200 ед., шаг съемки – 0,3, медный фильтр – 2 мм. Томографическая реконструкция осуществлялась с помощью программного продукта Nrecon software, разработанного Брюкermикро-КТ. После реконструкции томограммы сегментировались с целью получения двух моделей: самого материала образца и внутренней пористости. Кроме этого исследовались морфологические свойства отдельных пор: объем, характерный диаметр и степень сферичности. Сегментирование и анализ производились в программе CTAnalysier (Брюкermикро-КТ).

Микроструктурные исследования осуществляли с помощью металлографического микроскопа Axio Observer производства Carl Zeiss с увеличениями до 1000 крат. Микроскоп оснащен программным обеспечением для количественного анализа фазового и структурного состава сплавов. Металлографические шлифы в поперечном и продольном сечении готовились путем шлифования на шлифовальных шкурках с различной величиной зерна абразива. Финишную полировку проводили на сукне с применением водной суспензии окиси хрома. Контроль микроструктуры проводили после травления микрошлифа раствором концентрированных азотной HNO_3 и соляной HCl кислот, взятых в соотношении 1:3 по объему.

Рентгеноструктурные исследования образцов с целью определения параметров элементарных ячеек соединений и фазового состава проведены на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000S, расположенном в Научно-образовательном инновационном центре «Наноматериалы и нанотехнологии» Томского

политехнического университета (Инженерная школа новых производственных технологий) при ускоряющем напряжении и силе тока, равных 40,0 кВ и 30,0 мА соответственно. Источником рентгеновского излучения $\text{Cu}_{K\alpha}$ (длина волны 1.5406 Å) выступил Cu-анод. Диапазон измерения составил от 10 до 80 градусов, скорость сканирования – 2,0 градус/мин с шагом – 0,02 градуса. Идентификация структурного состояния осуществлялась методом Ритвельда. В качестве эталонных решеток использовались кристаллографические данные базы COD.

Распределение твердости по высоте образцов получены с использованием автоматического комплекса на базе микротвердомера «Duramin-5» при величине нагрузки индентирования 25 г (245,17 мН) и шагом 250 мкм от нижнего края образца и между отпечатками.

Проведение измерений твердости по высоте заготовки осуществлялось на установке NanoIndenter G200 (отделение материаловедения, ИШНПТ, НИ ТПУ). Индентирование на данной установке проводится пирамидой Берковича с постоянной заданной величиной нагрузки, схемой и шагом между точками индентирования. Величина наибольшего усилия при наноиндентировании составила 250 мН с шагом между участками 100 мкм при отступе от подложки 50 мкм с целью исключения краевых эффектов измерения твердости.

Проведены механические испытания по сжатию на испытательной установке Instron согласно ГОСТ 25.503–97. Нагружение осуществлялось вдоль наиболее протяженной стороны образцов со скоростью 5 мм/мин.

В процессе испытаний на сжатие образцов AISI 308LSi их разрушения не произошло, деформация проходила преимущественно по пластическому механизму.

Результаты и обсуждение

В данной работе на спроектированной и изготовленной на базе Томского политехнического университета электронно-лучевой установке

трехмерной печати [16] проволокой была изготовлена партия образцов. Для полученных образцов был проведен ряд исследований (металлографических, томография, рентгеноструктурных и т. д.).

Исследования образцов методом компьютерной томографии с учетом значения разрешающей способности, равной 11,3 мкм, показали отсутствие микро- и макродефектов на поверхности и в объеме полученного образца (рис. 2).

Полученный результат свидетельствует о том, что в результате применения электронно-лучевого метода аддитивной наплавки удалось избежать возникновения протяженных дефектов.

Микроструктура образцов имеет форму, характерную для крупнозернистых литых аустенитных сталей. Она состоит из столбчатых зерен, растущих вдоль укладки слоев проволоки по высоте (рис. 3а). Средний размер аустенитного зерна составляет $d = 150...200$ мкм (рис. 3б).

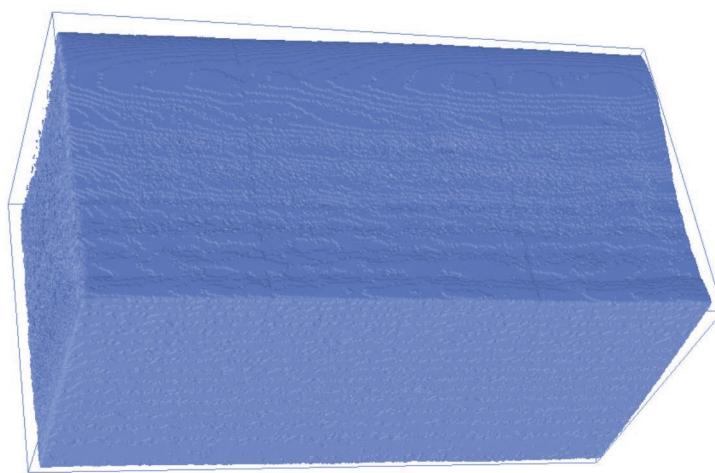
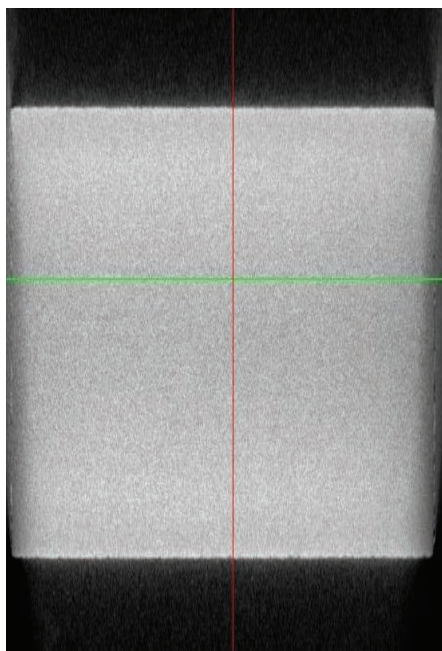


Рис. 2. Результаты томографических исследований полученных аддитивным методом образцов AISI 308LSi

Fig. 2. Tomography of AISI 308LSi specimens manufactured by WAAM

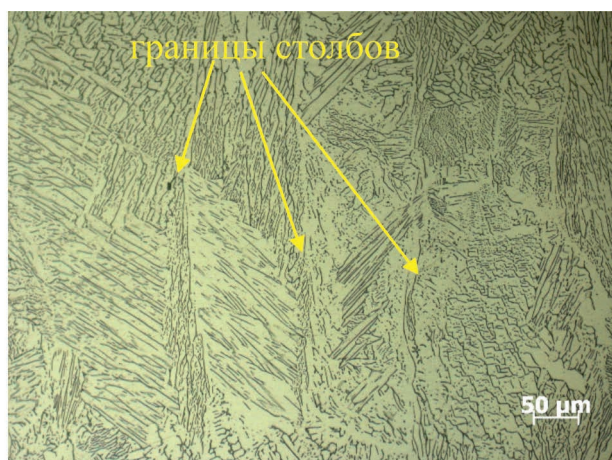


Рис. 3а. Вид столбчатых зерен в продольном сечении образца

Fig. 3a. Columnar grains in the longitudinal section of the specimen

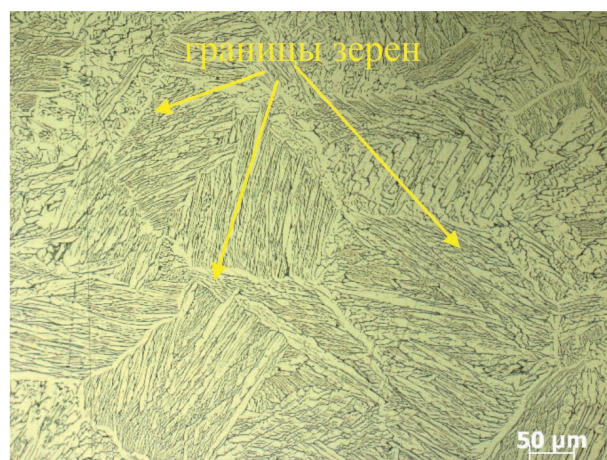


Рис. 3б. Зеренная структура в поперечном сечении образца

Fig. 3b. Grain structure in the cross-section of the specimen

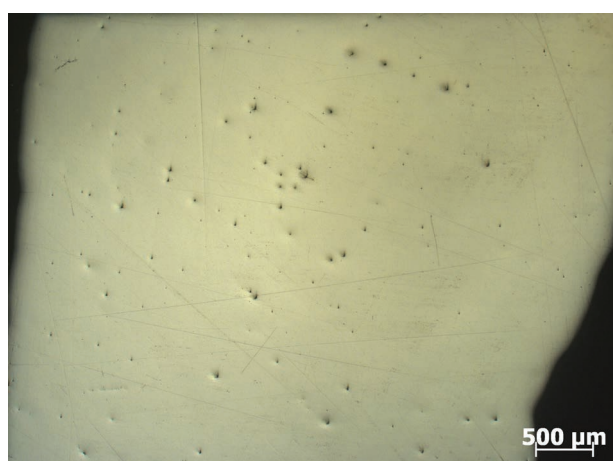
В процессе последовательного послойного электронно-лучевого сплавления проволоки каждый последующий слой формируется путем сплавления металла с предыдущим слоем при нагревании части металла до температуры плавления. При таком режиме сплавления не было выявлено явных границ раздела между слоями. При этом было установлено, что разные части заготовки характеризуются неоднородностью фазового состава и разными механическими свойствами.

Внутри столбчатых зерен как в продольном, так и в поперечном направлении обнаружено формирование двухфазной структуры. Двухфазность характеризуется аустенитной матрицей на основе γ -Fe с ГЦК-решеткой (светлый цвет) и включениями из высокотемпературного феррита на основе δ -Fe с ОЦК-решеткой разной формы (темный цвет). Анализ микроструктуры позволил выделить три характерных морфологических типа включений из феррита: игольчатый, вермикулярный и зернистый (рис. 5).

Макроструктура полученных образцов имеет ориентированную в направлении выращивания столбчатую крупнозернистую форму. Эпитаксиальный рост приводит к формированию зерен шириной от 70 до 230 мкм и протяженностью от 180 до 630 мкм. Микроструктура образовавшихся зерен создает аустенитную матрицу, включающую в себя игольчатую, зернистую и вермикулярную форму δ -феррита. Макроскопические неоднородности в виде границ между наплавля-

емыми слоями металла отсутствуют. Исследования на другом масштабном уровне поверхности образцов методами сканирующей электронной микроскопии позволили выявить дефекты в виде остаточных газовых пор, возникших в процессе выращивания заготовки. Размер газовых пор в структуре металла колеблется в диапазоне 0,5...5,2 мкм (рис. 4).

В разных зернах форма и размер включений из δ -Fe различна (рис. 5, а). Наблюдаются зерна аустенита с игольчатым по форме ферритом и незначительным количеством зернистого феррита (рис. 5, б). Выявлены также зерна аустенита с вермикулярным ферритом и большим количеством зернистого феррита (рис. 5, в). Невысокое содержание углерода в исследуемой аустенитной стали при данном методе получения образцов не привел к образованию карбидов металлов, но способствовал формированию зернистого феррита с размером менее $d = 1$ мкм. Согласно литературным данным [15, 16] при данном химическом составе аустенитной стали (см. таблицу) следует, что кристаллизация начинается с образования δ -Fe феррита из жидкого расплава по механизму перетектического превращения. Количество и форма включений феррита определяется разной скоростью охлаждения слоев наплавляемой проволоки. При высокой скорости охлаждения нового слоя проволоки практически отсутствует диффузия основных легирующих элементов (Ni, Cr), приводящих к фазовому превращению δ -Fe в аустенит, размер и количество



а



б

Рис. 4. Снимки поверхности поперечного шлифа полученных аддитивным методом образцов AISI 308LSi: продольное сечение (а), поперечное сечение (б)

Fig. 4. Surface of the sections of WAAM-obtained AISI 308LSi steel specimens: longitudinal section (а), cross section (б)

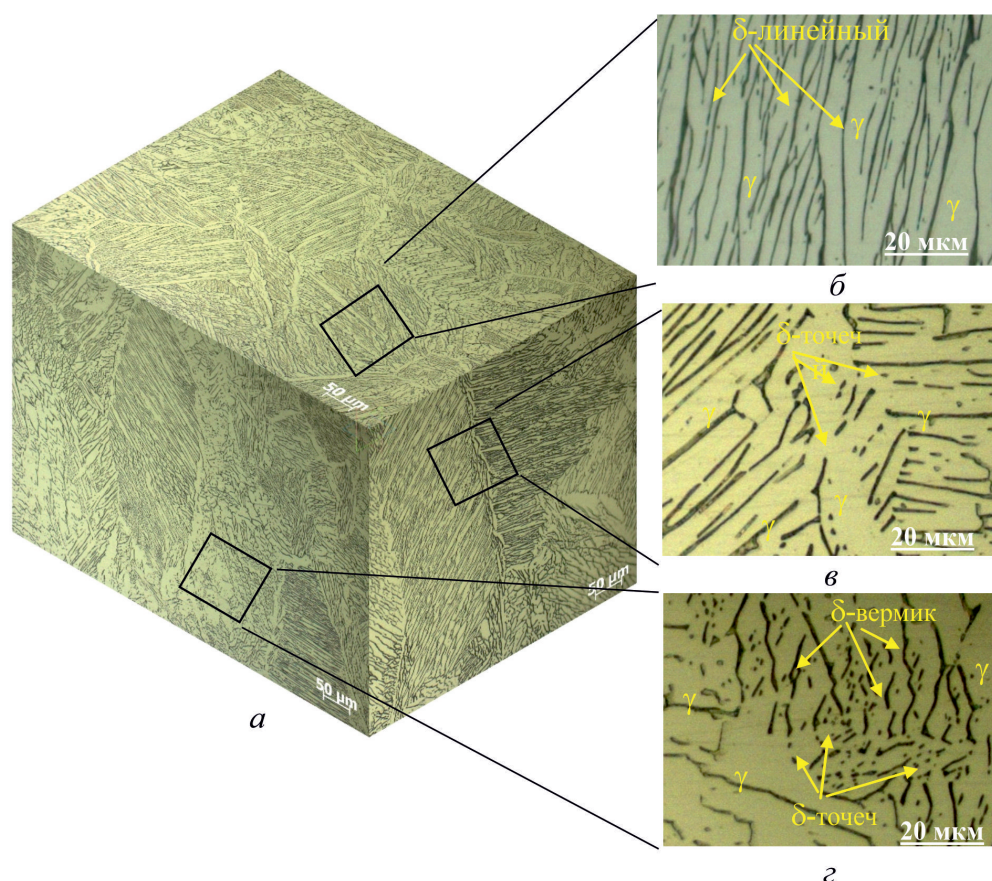


Рис. 5. Фотография микроструктуры трех поверхностей образца

Fig. 5. Microstructure of three surfaces of the sample

феррита увеличивается и большая его часть имеет вермикулярный или игольчатый вид. Уменьшение скорости охлаждения предыдущего слоя и высокая температура дают возможность возникновения процесса диффузии легирующих элементов (Ni, Cr). Процесс диффузии приводит к растворению δ -Fe. Поэтому границы сформировавшихся столбчатых зерен имеют вид аустенита с небольшим количеством зернистого δ -Fe (рис. 5, в).

Проведенный рентгеноструктурный анализ (рис. 6) показал следующий фазовый состав образцов: основная фаза представлена в виде аустенита (γ -железа, ГЦК) с величиной параметра элементарной ячейки $3,5807 \text{ \AA}$, вторую фазу образует стабилизированная при низких температурах фаза на основе δ -Fe с ОЦК-структурой с параметром элементарной ячейки, равным $2,8613 \text{ \AA}$. Массовые доли по результатам рентгено-флуоресцентного анализа составили для аустенитной и ферритной фаз 79 и $21 \pm 3 \%$ мас. соответственно.

Дифрактограммы от различных плоскостей образцов, полученных электронно-лучевым

сплавлением из нержавеющей проволоки изображены на рис. 7 и 8. В результате рентгеноструктурного анализа выявлено, что матричной фазой является твердый раствор на основе γ -Fe с ГЦК-решеткой. Второй фазой является твердый раствор с ОЦК-решеткой на основе α -Fe. Полученные данные согласуются со строением тройной фазовой диаграммы системы Cr-Ni-Fe (рис. 9) [25].

На этой диаграмме состояний звездочкой показано расположение трехкомпонентного сплава с химическим составом исследуемой стали. При кристаллизации сплава с таким составом при неравновесных процессах, как это имеет место при послойном образовании слитка методом электронно-лучевой наплавки, возможно образование двухфазной смеси из двух твердых растворов на основе ОЦК- и ГЦК-решеток: γ -(Fe,Ni,Cr) и α -(Cr,Ni,Fe).

Был проведен анализ профиля структурных линий фазы γ -(Fe,Ni,Cr) на дифрактограммах из области больших углов 2θ на дифрактограмме. В результате анализа было установлено, что

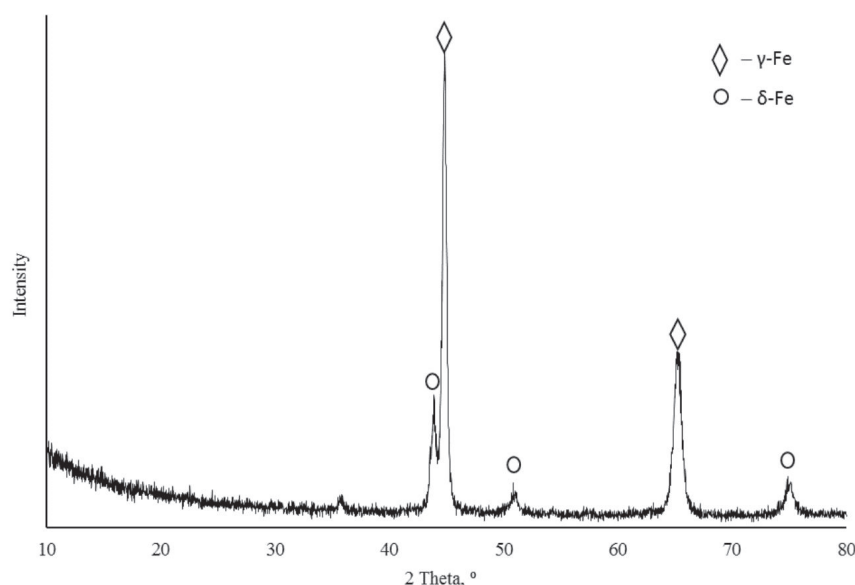


Рис. 6. Дифрактограммы от образца аустенитной стали, полученной аддитивным методом

Fig. 6. XRD analysis of WAAM-obtained AISI 308LSi steel specimens

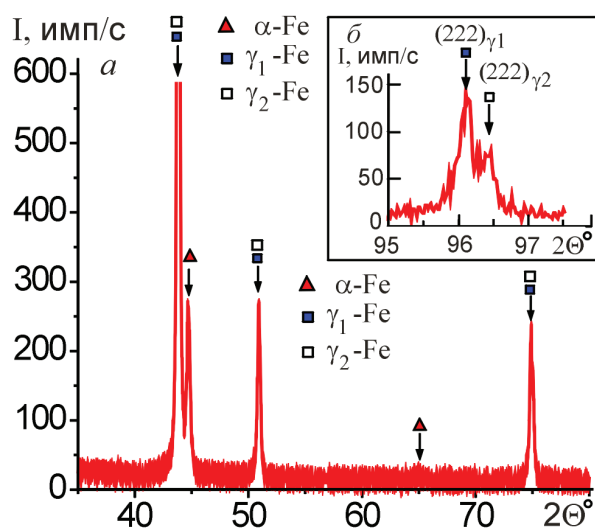


Рис. 7. Дифрактограмма от образца с плоскости параллельно спекаемым слоям (а) и фрагмент участка дифрактограммы со структурной линией (222) фазы γ -(Fe,Cr,Ni) (б)

Fig. 7. Diffraction patterns of the specimen with the plane parallel to the sintered layers (a) and a fragment of the diffraction pattern with structural line (222) of the γ -(Fe,Cr,Ni) phase (b)

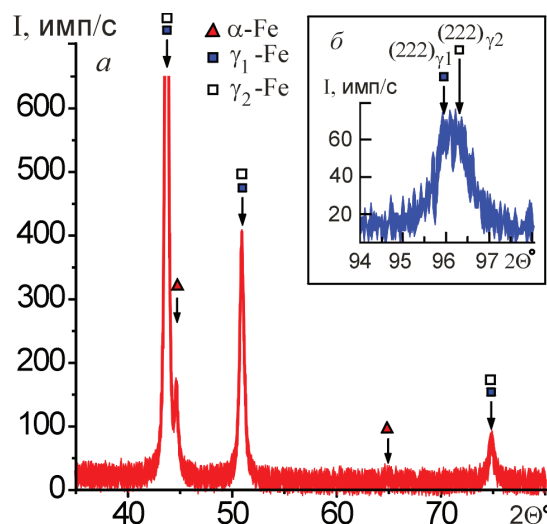


Рис. 8. Дифрактограмма от образца с плоскости перпендикулярно спекаемым слоям (а) и фрагмент участка дифрактограммы со структурной линией (222) фазы γ -(Fe,Cr,Ni) (б)

Fig. 8. Diffraction patterns of the specimen with the plane perpendicular to the sintered layers (a) and a fragment of the diffraction pattern with structural line (222) of the γ -(Fe,Cr,Ni) phase (b)

профиль структурных линий (222), (400) и (331) фазы γ -(Fe,Ni,Cr) из области больших углов 2Θ может быть представлен в виде суперпозиции двух линий от фаз с близкими параметрами решетки. Выявленный сложный профиль структурных линий γ -(Fe,Ni,Cr) фазы свидетельствует о неоднородном химическом составе на поверх-

ности образца, состоящем из соединений на основе γ -(Fe,Ni,Cr) фазы с разным химическим составом в разных локальных участках в исследуемых образцах.

Таким образом, проведенный анализ дифрактограмм исследуемых образцов позволяет сделать вывод, что в результате неравновесных

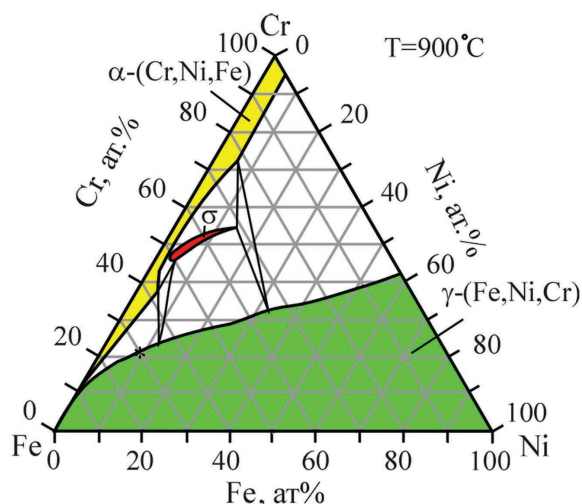


Рис. 9. Изотермическое сечение при температуре 900 °C тройной системы Fe-Cr-Ni [25]

Fig. 9. Isothermal section at 900 °C of the Fe-Cr-Ni triple system [25]

процессов при послойном образовании слитка методом электронно-лучевой наплавки происходит образование двух твердых растворов на основе γ -Fe-фазы с близкими значениями параметров решеток, которые можно условно представить как γ_1 -(Fe, Ni, Cr) и γ_2 -(Fe, Ni, Cr) фазы. Для твердого раствора γ_1 -(Fe, Ni, Cr) параметр решетки $a = 0,3592 \pm 0,0002$ нм и для γ_2 -(Fe, Ni, Cr) фазы $a = 0,3582 \pm 0,0002$ нм.

Результаты измерения микротвердости отдельных фаз полученных образцов в продольном и поперечном сечении показали, что при вдавливании индентора в области с большим содержанием δ -Fe-фазы приводит к образованию меньшего по размерам отпечатка. Это свиде-

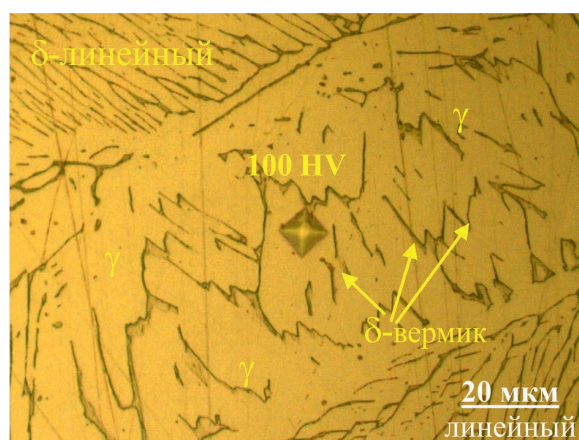
тельствует о более высокой твердости 122 HV в этих областях, чем в областях с аустенитной матрицей 100 HV (рис. 10, 11). Полученные данные свидетельствуют о том что δ -Fe-фаза является более твердой, чем аустенитная фаза на основе γ -Fe. При изготовлении деталей и конструкций с повышенной прочностью наличие δ -Fe будет оказывать отрицательное влияние на долговечность при длительных статических нагрузках и вызывать повышенную концентрацию напряжений, способствующую образованию трещин. Для увеличения долговечности изделий необходимо путем предварительной термомеханической обработки заготовки либо последующей упрочняющей термической обработки уменьшить отрицательное влияние δ -Fe возможно.

На диаграмме (рис. 11) не наблюдается заметного изменения твердости по высоте от подложки к верхнему наплавленному слою как в продольном, так и поперечном сечении. Среднее значение твердости в продольном (XOZ) сечении составляет 187 ± 7 HV, в поперечном (YOZ) – 200 ± 9 HV.

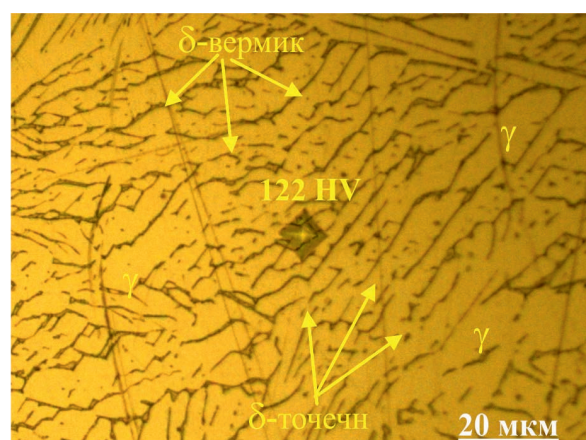
Среднее значение величины упругого последействия по результатам наноиндентирования составляет $7,24 \pm 0,63$ %.

Закключение

Установлено, что напечатанные на разработанной установке электронно-лучевой трехмерной печати образцы из нержавеющей стали марки AISI 308LSi не содержат макродефектов во всем объеме образца. Присутствуют небольшие микродефекты в виде остаточных газовых пор,



а



б

Рис. 10. Микрофотографии с указаниями численных значений микротвердости в однофазной области с γ -Fe (а) и двухфазной области с $(\gamma+\delta)$ Fe (б)

Fig. 10. Microhardness in the zone of γ -Fe (a) and the zone of $(\gamma+\delta)$ Fe (b)

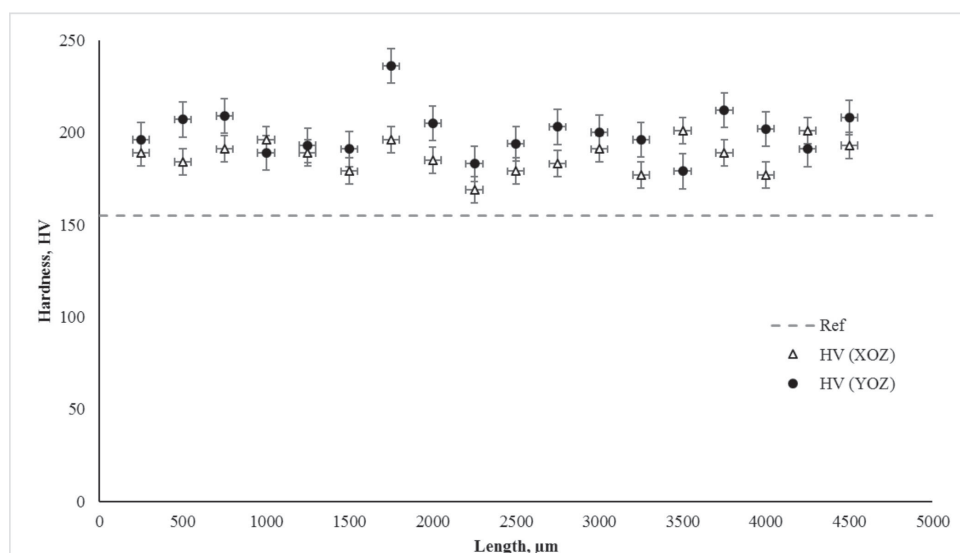


Рис. 11. Результаты измерения твердости в образце по высоте в плоскостях XOZ и YOZ

Fig. 11. Microhardness measurements along cross sections XOZ and YOZ

возникших в процессе выращивания заготовки. Размер газовых пор не более 5,2 мкм в диаметре. Микроструктура образцов формируется близкой к микроструктуре крупнозернистых литых аустенитных сталей. В структуре преобладают столбчатые зерна, направленные вдоль укладки слоев по высоте. Структурные исследования показали двухфазный характер строения. Основной фазой является аустенитная матрица на основе γ -Fe с ГЦК-решеткой и включений из высокотемпературного феррита δ -Fe с ОЦК-решеткой разной формы. Установлено присутствие игольчатой, зернистой и вермикулярной формы δ -феррита. Резкой границей раздела между слоями укладки проволоки не установлено, но выявлены небольшие отличия по фазовому составу. Данные изменения отражаются на механических свойствах. Полученные результаты измерения микротвердости показывают, что она изменяется в пределах 10 %.

Кроме того, полученные результаты свидетельствуют о том, что использование электронно-лучевой трехмерной печати для изготовления деталей из стали марки AISI 308LSi дает структуру, аналогичную литым аустенитным сталям. Появления макродефектов не происходит, а количество газовых пор мало.

Список литературы

1. Murr L.E. Metallurgy of additive manufacturing: examples from electron beam melting // Additive Manufacturing. – 2015. – Vol. 5. – P. 40–53. – DOI: 10.1016/j.addma.2014.12.002.

2. Milevski J.O. Additive manufacturing of metals: from fundamental technology to rocket nozzles, medical implants and custom jewelry. – Cham: Springer, 2017. – 351 p. – ISBN 978-3-319-58205-4.

3. Additive manufacturing of metallic materials: a review / Y. Zhang, L. Wu, X. Guo, S. Kane, Y. Deng, Y.-G. Jung, J.-H. Lee, J. Zhang // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2018. – Vol. 27, iss. 1. – P. 1–13. – DOI: 10.1007/s11665-017-2747-y.

4. Metallurgy, mechanistic models and machine learning in metal printing / T. DebRoy, T. Mukherjee, H.L. Wei, J.W. Elmer, J.O. Milewski // Nature Reviews Materials. – 2020. – Vol. 6. – P. 48–68. – DOI: 10.1038/s41578-020-00236-1.

5. Edwards P., O'Conner A., Ramulu M. Electron beam additive manufacturing of titanium components: properties and performance // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2013. – Vol. 135, iss. 6. – P. 061016. – DOI: 10.1115/1.4025773.

6. Tavlovich B., Shirizly A., Katz R. EBW and LBW of additive manufactured Ti6Al4V products // Welding Journal. – 2018. – Vol. 97, iss. 6. – P. 179–190. – DOI: 10.29391/2018.97.016.

7. Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products / S. Peleshenko, V. Korzhyk, O. Voitenko, V. Khaskin, V. Tkachuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3/1, iss. 87. – P. 42–52. – DOI: 10.15587/1729-4061.2017.99666.

8. Introduction of ternary alloying element in wire arc additive manufacturing of titanium aluminide intermetallic / J. Wang, Z. Pan, L. Wei, S. He, D. Cuiuri, H. Li // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 27. – P. 236–245. – DOI: 10.1016/j.addma.2019.03.014.



9. Laser wire deposition of a large Ti-6Al-4V space component / N. Chekir, J.J. Sixsmith, R. Tollett, M. Brochu // *Welding Journal*. – 2019. – Vol. 28, iss. 6. – P. 172–180.

10. *Taminger K.M., Hafley R.A.* Electron beam free-form Fabrication for cost effective near-net shape manufacturing // NATO/RTO AVT-139 Specialists' Meeting on Cost Effective Manufacture via Net Shape Processing. – Amsterdam, 2006. – P. 16.

11. Особенности структурно-фазового состояния сплава Ti-6Al-4V при формировании изделий с использованием электронно-лучевой проволоочной аддитивной технологии / Н.Л. Савченко, А.В. Воронцов, В.Р. Утяганова, А.А. Елисеев, В.Е. Рубцов, Е.А. Колубаев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 60–71. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-60-71.

12. Development of electron-beam equipment and technology for additive layer-wise wire cladding / V.V. Fedorov, V.A. Klimenov, A.V. Batranin, P. Ranga // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2167. – P. 020097. – DOI: 10.1063/1.5131964.

13. Microstructure and compressive behavior of Ti-6Al-4V alloy built by electron beam free-form fabrication / V.A. Klimenov, V.V. Fedorov, M.S. Slobodyan, N.S. Pushilina, I.L. Strelkova, A.A. Klopotov, A.V. Batranin // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2020. – Vol. 29, iss. 11. – P. 7710–7721. – DOI: 10.1007/s11665-020-05223-9.

14. *Simar A., Godet S., Watkins T.R.* Highlights of the special issue on metal additive manufacturing // *Materials Characterization*. – 2018. – Vol. 143. – P. 1–4. – DOI: 10.1016/j.matchar.2018.06.013.

15. Effect of heat input on phase content, crystalline lattice parameter, and residual strain in wire-feed electron beam additive manufactured 304 stainless steel / S.Yu. Tarasov, A.V. Filippov, N.L. Savchenko, S.V. Fortuna, V.E. Rubtsov, E.A. Kolubaev, S.G. Psakhie // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 99. – P. 2353–2363. – DOI: 10.1007/s00170-018-2643-0.

16. Microstructural evolution and chemical corrosion of electron beam wire-feed additively manufactured AISI 304 stainless steel / S.Yu. Tarasov, A.V. Filippov, N.N. Shamarin, S.V. Fortuna, G.G. Maier, E.A. Kolubaev // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2019. – Vol. 803. – P. 364–370. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.246.

17. Microstructural evolution and mechanical properties of maraging steel produced by wire + arc addi-

tive manufacture process / X. Xu, S. Ganguly, J. Ding, S. Guo, S. Williams, F. Martina // *Materials Characterization*. – 2018. – Vol. 143. – P. 152–162. – DOI: 10.1016/j.matchar.2017.12.002.

18. Особенности химического состава и структурно-фазового состояния, обусловившие снижение коррозионной стойкости деталей из стали 18Cr-10Ni / М.В. Костина, В.И. Криворотов, В.С. Костина, А.Э. Кудрашов, С.О. Мурадян // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2021. – Т. 64. – С. 217–229. – DOI: 10.17073/0368-0797-2021-3-217-229.

19. Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by selective laser melting and electron beam melting / H. Gong, K. Rafi, H. Gu, G.D. Janaki Ram, T. Starr, B. Stucker // *Materials and Design*. – 2015. – Vol. 86. – P. 545–554. – DOI: 10.1016/j.matdes.2015.07.147.

20. Applying nondestructive testing to quality control of additive manufactured parts / N.P. Aleshin, M.V. Grigo'rev, N.A. Shchipakov, M.A. Prilutskii, V.V. Murashov // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2016. – Vol. 52, iss. 10. – P. 600–609. – DOI: 10.1134/S1061830916100028.

21. Nanoindentation study of Ti6Al4V alloy nitride by low intensity plasma jet process / F. Barberi, C. Otani, C. Lepienski, W. Urruchi, H. Maciel, G. Petraconi // *Vacuum*. – 2002. – Vol. 67, iss. 3. – P. 457–461. – DOI: 10.1016/S0042-207X(02)00231-2.

22. Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti-6Al-4V powder fractions / J. Karlsson, A. Snis, H. Engqvist, J. Lausmaa // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2013. – Vol. 213, iss. 12. – P. 2109–2118. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.06.010.

23. *Ladany L., Roy L.* Mechanical behavior of Ti-6Al-4V manufactured by electron beam additive fabrication // *ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference*. – Madison, WI, 2013. – DOI: 10.1115/MSEC2013-1105.

24. Metallurgy of a Ti-Au alloy synthesized by controlled electric resistance fusion / V. Klimenov, M. Slobodyan, Yu. Ivanov, A. Kiselev, S. Matrenin // *Intermetallics*. – 2020. – Vol. 127. – P. 106968. – DOI: 10.1016/j.intermet.2020.106968.

25. *Lee B.J.* A thermodynamic evaluation of the Fe-Cr-Ni system // *Journal of the Korean Institute of Metals and Materials*. – 1993. – Vol. 31, iss. 4. – P. 480–489.

Конфликт интересов

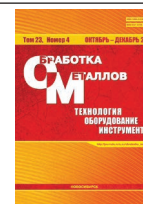
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

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



Structural and mechanical properties of stainless steel formed under conditions of layer-by-layer fusion of a wire by an electron beam

Vasiliy Fedorov^{1, a, *}, Aleksandr Rygin^{2, b}, Vasiliy Klimenov^{1, c}, Nikita Martyshev^{1, d}, Anatolii Klopotov^{2, 3, e},
 Irina Strelkova^{1, f}, Sergey Matrenin^{1, g}, Andrey Batranin^{1, h}, Valentina Deryusheva^{1, i}

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin ave., Tomsk, 634050, Russian Federation

² Tomsk State University of Architecture and Building, 2 Solyanaya Sq., Tomsk, 634003, Russian Federation

³ National Research Tomsk State University, 36 Lenin ave., Tomsk, 634050, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-5164-5875>, fedorov@tpu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-5664-8234>, alexandr.rygin@gmail.com,
^c <https://orcid.org/0000-0001-7583-0170>, klimenov@tpu.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0003-0620-9561>, martyshev@tpu.ru,
^e <https://orcid.org/0000-0002-3690-0436>, klopotovaa@tsuab.ru, ^f <https://orcid.org/0000-0002-2222-2865>, strelkova@tpu.ru,
^g <https://orcid.org/0000-0002-2188-8120>, msv@tpu.ru, ^h <https://orcid.org/0000-0001-9678-2905>, batranin@tpu.ru,
ⁱ <https://orcid.org/0000-0002-2116-3891>, vderusheva@tpu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 02 September 2021

Revised: 16 September 2021

Accepted: 23 September 2021

Available online: 15 December 2021

Keywords:

Additive technologies
 Electron beam surfacing
 Stainless steel
 Coarse austenitic steel

Funding

This research was supported by TPU development program.

Acknowledgements

Research were conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. As of today, additive technologies are among the most promising methods to manufacture various parts. They allow producing parts of complex shapes and provide their quality structure. The quality of the structure formed depends on numerous parameters: equipment type, its operation mode, materials, shielding medium, etc. Large international companies producing 3D-printers provide technological guidelines for working on it. Such guidelines include the information on the manufacturers of raw materials (printing powders), products their equipment can work with and the operation modes that should be used with such powders. These parameters should be investigated to use it on the domestic equipment developed within the framework of research programs and import substitution programs. The researchers and developers of 3D-printing equipment frequently run into a problem of using currently available raw materials for obtaining parts possessing minimal porosity, uniform structure and mechanical properties similar to that of at least cast blanks. One of the widely used materials for 3D-printing is stainless steel. It has high corrosion resistance, which reduces the requirements to the medium in which 3D printing is carried out. Manufactured stainless steel products have a good combination of strength and plastic characteristics. **The aim of the study** is to obtain stainless steel specimens possessing minimal number of micro- and macro-defects and uniform structure by the method of wire arc additive manufacturing using an electron-beam setup developed at Tomsk Polytechnic University. **The methods to study** the AISI 308LSi stainless steel 3D-printed specimens are as follows: XRD analysis, tomography, chemical analysis, metallographic analysis, microhardness testing. **Results and discussion.** It is established that the AISI 308LSi stainless steel specimens manufactured using the electron-beam 3D-printing setup contain no macro-defects in the bulk of the specimens. There are small microdefects represented by residual gas pores with the dimensions of no more than 5.2 μm. The microstructure of the specimens is formed close to that of coarse-grained cast austenite steels and consists of columnar grains of the γ-Fe austenite matrix and high-temperature ferrite. The interfaces between the wire layers are not pronounced; however, there are small differences in phase composition. Based on the analysis of the results obtained, it is established that the use of electron-beam 3D-printing for the manufacture of parts from AISI 308LSi steel gives a structure similar to cast austenitic steels. Macro-defects do not appear, and the number of gas pores is small.

For citation: Fedorov V.V., Rygin A.V., Klimenov V.A., Martyshev N.V., Klopotov A.A., Strelkova I.L., Matrenin S.V., Batranin A.V., Deryusheva V.N. Structural and mechanical properties of stainless steel formed under conditions of layer-by-layer fusion of a wire by an electron beam. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 111–124. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-111-124. (In Russian).

* Corresponding author

Fedorov Vasiliy Viktorovich, Laboratory manager
 National Research Tomsk Polytechnic University,
 30 Lenin ave.,
 634050, Tomsk, Russian Federation
 Tel.: 8 (3822) 606006, e-mail: fedorov@tpu.ru

References

1. Murr L.E. Metallurgy of additive manufacturing: examples from electron beam melting. *Additive Manufacturing*, 2015, vol. 5, pp. 40–53. DOI: 10.1016/j.addma.2014.12.002.
2. Milevski J.O. *Additive manufacturing of metals: from fundamental technology to rocket. nozzles, medical implants and custom jewelry*. Cham, Springer, 2017. 351 p. ISBN 978-3-319-58205-4.
3. Zhang Y., Wu L., Guo X., Kane S., Deng Y., Jung Y.-G., Lee J.-H., Zhang J. Additive manufacturing of metallic materials: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, vol. 27, iss. 1, pp. 1–13. DOI: 10.1007/s11665-017-2747-y.
4. DebRoy T., Mukherjee T., Wei H.L., Elmer J.W., Milewski J.O. Metallurgy, mechanistic models and machine learning in metal printing. *Nature Reviews Materials*, 2020, vol. 6, pp. 48–68. DOI: 10.1038/s41578-020-00236-1.
5. Edwards P., O’Conner A., Ramulu M. Electron beam additive manufacturing of titanium components: properties and performance. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2013, vol. 135, iss. 6, p. 061016. DOI: 10.1115/1.4025773.
6. Tavlovich B., Shirizly A., Katz R. EBW and LBW of additive manufactured Ti6Al4V products. *Welding Journal*, 2018, vol. 97, iss. 6, pp. 179–190. DOI: 10.29391/2018.97.016.
7. Peleshenko S., Korzhyk V., Voitenko O., Khaskin V., Tkachuk V. Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 3/1, iss. 87, pp. 42–52. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.99666.
8. Wang J., Pan Z., Wei L., He S., Cuiuri D., Li H. Introduction of ternary alloying element in wire arc additive manufacturing of titanium aluminide intermetallic. *Additive Manufacturing*, 2019, vol. 27, pp. 236–245. DOI: 10.1016/j.addma.2019.03.014.
9. Chekir N., Sixsmith J.J., Tollett R., Brochu M. Laser wire deposition of a large Ti-6Al-4V space component. *Welding Journal*, 2019, vol. 28, iss. 6, pp. 172–180.
10. Taminger K.M., Hafley R.A. Electron beam freeform Fabrication for cost effective near-net shape manufacturing. *NATO/RTO AVT-139 Specialists’ Meeting on Cost Effective Manufacture via Net Shape Processing*, Amsterdam, 2006, p. 16.
11. Savchenko N.L., Vorontsov A.V., Utyaganova V.R., Eliseev A.A., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Osobennosti strukturno-fazovogo sostoyaniya splava Ti-6Al-4V pri formirovanii izdelii s ispol’zovaniem elektronno-luchevoi provolochnoi additivnoi tekhnologii [Features of the structural-phase state of the alloy Ti-6Al-4V in the formation of products using wire-feed electron beam additive manufacturing]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 4, pp. 60–71. DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-60-71.
12. Fedorov V.V., Klimenov V.A., Batranin A.V., Ranga P. Development of electron-beam equipment and technology for additive layer-wise wire cladding. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2167, p. 020097. DOI: 10.1063/1.5131964.
13. Klimenov V.A., Fedorov V.V., Slobodyan M.S., Pushilina N.S., Strelkova I.L., Klopotov A.A., Batranin A.V. Microstructure and compressive behavior of Ti-6Al-4V alloy built by electron beam free-form fabrication. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, vol. 29, iss. 11, pp. 7710–7721. DOI: 10.1007/s11665-020-05223-9.
14. Simar A., Godet S., Watkins T.R. Highlights of the special issue on metal additive manufacturing. *Materials Characterization*, 2018, vol. 143, pp. 1–4. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.06.013.
15. Tarasov S.Yu., Filippov A.V., Savchenko N.L., Fortuna S.V., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A., Psakhie S.G. Effect of heat input on phase content, crystalline lattice parameter, and residual strain in wire-feed electron beam additive manufactured 304 stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 99, pp. 2353–2363. DOI: 10.1007/s00170-018-2643-0.
16. Tarasov S.Yu., Filippov A.V., Shamarin N.N., Shamarin N., Fortuna S.V., Maier G.G., E.A. Kolubaev. Microstructural evolution and chemical corrosion of electron beam wire-feed additively manufactured AISI 304 stainless steel. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 803, pp. 364–370. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.246.
17. Xu X., Ganguly S., Ding J., Guo S., Williams S., Martina F. Microstructural evolution and mechanical properties of maraging steel produced by wire + arc additive manufacture process. *Materials Characterization*, 2018, vol. 143, pp. 152–162. DOI: 10.1016/j.matchar.2017.12.002.
18. Kostina M.V., Krivorotov V.I., Kostina V.S., Kudrashov A.E., Muradyan S.O. Osobennosti khimicheskogo sostava i strukturno-fazovogo sostoyaniya, obuslovivshie snizhenie korrozionnoi stoikosti detalei iz stali 18Cr-10Ni [Features of chemical composition and structural-phase state decreasing corrosion resistance of parts from 18Cr-

10Ni steel]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2021, vol. 64, pp. 217–229. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-3-217-229. (In Russian).

19. Gong H., Rafi K., Gu H., Janaki Ram G.D., Starr T., Stucker B. Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by selective laser melting and electron beam melting. *Materials and Design*, 2015, vol. 86, pp. 545–554. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.07.147.

20. Aleshin N.P., Grigo'rev M.V., Shchipakov N.A., Prilutskii M.A., Murashov V.V. Applying nondestructive testing to quality control of additive manufactured parts. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, iss. 10, pp. 600–609. DOI: 10.1134/S1061830916100028.

21. Barberi F., Otani C., Lepiensi C., Urruchi W., Maciel H., Petraconi G. Nanoindentation study of Ti6Al4V alloy nitride by low intensity plasma jet process. *Vacuum*, 2002, vol. 67, iss. 3, pp. 457–461. DOI: 10.1016/S0042-207X(02)00231-2.

22. Karlsson J., Snis A., Engqvist H., Lausmaa J. Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti-6Al-4V powder fractions. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol. 213, iss. 12, pp. 2109–2118. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.06.010.

23. Ladany L., Roy L. Mechanical behavior of Ti-6Al-4V manufactured by electron beam additive fabrication. *ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, Madison, WI, 2013. DOI: 10.1115/MSEC2013-1105.

24. Klimenov V., Slobodyan M., Ivanov Yu., Kiselev A., Matrenin S. Metallurgy of a Ti-Au alloy synthesized by controlled electric resistance fusion. *Intermetallics*, 2020, vol. 127, p. 106968. DOI: 10.1016/j.intermet.2020.106968.

25. Lee B.J. A thermodynamic evaluation of the Fe-Cr-Ni System. *Journal of the Korean Institute of Metals and Materials*, 1993, vol. 31, iss. 4, pp. 480–489.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 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/>).