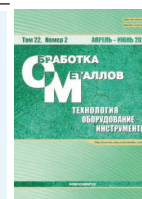




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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

Влияние параметров процесса электронно-лучевого аддитивного производства на структуру и свойства аустенитной нержавеющей стали 12X18Н9Т

Анна Зыкова^{а, *}, Сергей Никонов^б, Вероника Утяганова^с, Евгений Колубаев^д

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, Томск, 634055, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0001-8779-3784>,  zykovaap@mail.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0002-5588-4718>,  SergRFF@ngs.ru,

^с  <https://orcid.org/0000-0002-2303-8015>,  filaret_2012@mail.ru, ^д  <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>,  eak@ispms.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.1:620.184:620.178.152

История статьи:

Поступила: 09 марта 2020

Рецензирование: 02 апреля 2020

Принята к печати: 17 апреля 2020

Доступно онлайн: 15 июня 2020

Ключевые слова:

Аддитивные технологии

Электронный луч

Аустенитная сталь

Ток электронного пучка

Скорость наплавки

Скорость подачи проволоки

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект III.23.2.11.

АННОТАЦИЯ

Введение. В современной промышленной и научно-технической сфере проблема создания деталей из различных металлов и сплавов аддитивными методами является одной из наиболее острых и требующих своевременного решения. Связано это прежде всего с необходимостью получения крупногабаритных деталей сложной формы с высокой производительностью и как можно с меньшим количеством отходов. Одним из наиболее применимых аддитивных методов для формирования изделий является электронно-лучевая проволоочная технология. С применением проволоочного филамента и электронного луча для плавления в зоне печати возможно получение деталей с высокой производительностью и приемлемыми показателями получаемой структуры и механических свойств. Однако на настоящее время недостаточно представлены в литературе взаимосвязи получаемой структуры и механических свойств от параметров процесса аддитивного электронно-лучевого производства. В связи с этим **целью данной работы** является проведение анализа влияния технологических параметров процесса аддитивного электронно-лучевого производства на формирование изделий из стали 12X18Н9Т. **Результаты и обсуждение.** В качестве варьируемых параметров использовали ток электронного пучка, линейную скорость печати и коэффициент подачи проволоки, а за параметр оптимизации был принят предел прочности. Установлены оптимальные параметры тока электронного пучка (40 мА), скорости наплавки (180 мм/мин) и коэффициента подачи проволоки (1,3) при постоянном ускоряющем напряжении (30 кВ), которые позволяют сформировать изделие в целом без дефектов и без оплавления ранее сформированных слоев с пределом прочности 583 МПа. Показано, что использование наибольших значений скорости наплавки (320 мм/мин) и коэффициента подачи проволоки (1,3) при варьировании тока электронного пучка не позволяют осуществить процесс формирования образцов. Установлено, что при параметрах процесса электронно-лучевого аддитивного производства, обеспечивающих формирование изделия в целом, получаемые в материалах структуры обеспечивают механические свойства в пределах 558...595 МПа.

Для цитирования: Влияние параметров процесса электронно-лучевого аддитивного производства на структуру и свойства аустенитной нержавеющей стали 12X18Н9Т / А.П. Зыкова, С.Ю. Никонов, В.Р. Утяганова, Е.А. Колубаев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 63–75. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.2-63-75.

Введение

В настоящее время в научно-исследовательской литературе проблема аддитивного производства представлена наиболее широко [1–16]. Это связано прежде всего с интересом к отрасли со стороны промышленных предприятий авиационной и ракетно-космической сферы, а также

морской техники и металлургической промышленности. Аддитивные технологии позволяют формировать изделия с минимальной финишной обработкой после печати и экономией исходного сырья, что наиболее актуально с точки зрения производства деталей из дорогостоящих материалов, а также крупногабаритных изделий в виде корпусов, баков, втулок.

Аддитивные технологии позволяют изготавливать детали из стали [2, 6–8, 13], меди со сталью [12], титановых сплавов [4, 8, 10, 15, 16] и др. В основном для производства деталей из различных металлов и сплавов используются техно-

*Адрес для переписки

Зыкова Анна Петровна, к.ф.-м.н., ведущий инженер
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
пр. Академический 2/4,
634055, г. Томск, Россия
Тел.: 8-923-448-20-00, e-mail: zykovaap@mail.ru

логии, основанные на селективном сплавлении или спекании порошкового материала. В настоящее время для производства изделий набирает актуальность применение технологий аддитивного электронно-лучевого проволочного производства [2, 6, 7, 12, 14, 15]. Проволочные технологии аддитивного производства имеют более высокую производительность, чем технологии, основанные на послойном сплавлении порошкового материала. Кроме того, применение проволочных филаментов обуславливает меньшую стоимость исходного сырья по сравнению с порошковыми технологиями. Наиболее производительными из проволочных технологий являются методики, основанные на электродуговом способе расплавления материала. Технологии, основанные на электронно-лучевом способе расплавления проволок в вакууме, позволяют получать изделия с высокой производительностью и высокими показателями по качеству материала и механическим свойствам.

Следует отметить, что в современной литературе имеется небольшое количество сведений по влиянию технологических параметров на процесс электронно-лучевого аддитивного производства, включающих в себя скорость подачи, ускоряющее напряжение, ток пучка и скорость перемещения зоны печати вдоль образца [17–20]. При этом влияние параметров электронно-лучевого аддитивного производства определяет зависимости теплового воздействия на материал в процессе печати.

Исходя из этого **целью** настоящей работы является определение влияния параметров процесса электронно-лучевого аддитивного производства на формирование изделий аустенитной стали 12Х18Н9Т, их структуру и механические свойства.

Методика исследований

Для формирования изделий методом электронно-лучевого аддитивного производства использовали филамент нержавеющей аустенитной стали марки 12Х18Н9Т диаметром 1,0 мм. В качестве подложки использовали сталь 12Х18Н9Т толщиной 5 мм.

Для установления оптимальных технологических параметров процесса электронно-лучевого аддитивного производства образцы изготавлива-

ли в виде стенок (рис. 1). Изготовление стенок производили на экспериментальном оборудовании для электронно-лучевого аддитивного получения в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН по схеме, представленной на рис. 1. Образец в виде вертикальной стенки 1 формировался на поверхности подложки из стали 12Х18Н9Т 2, зафиксированной на охлаждаемом медном столе 3, из филамента 4 (проволока диаметром 1,0 мм из стали 12Х18Н9Т), расплавляемого в зоне печати электронным лучом 5 от источника 6, фокусируемого систе-

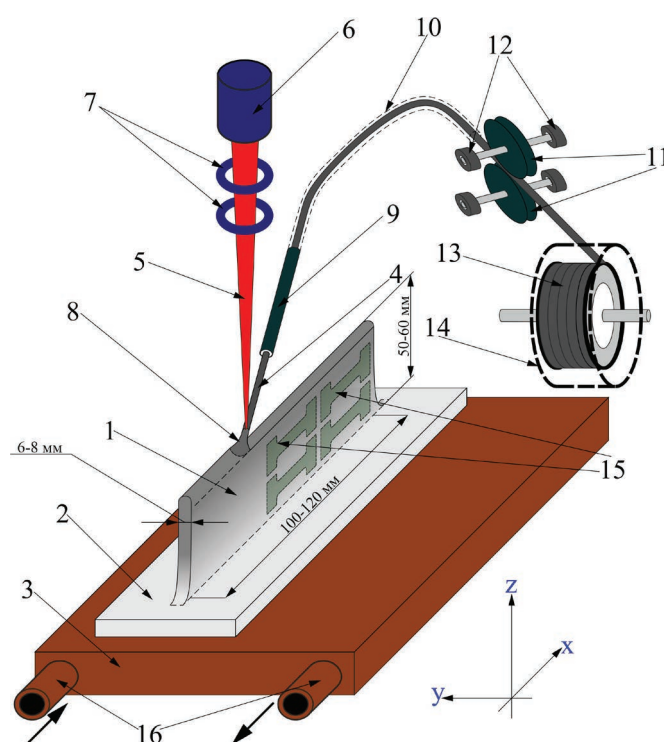


Рис. 1. Схема 3D-печати образцов в форме «стенок» методом аддитивного электронно-лучевого производства:

1 – образец; 2 – подложка; 3 – охлаждаемый медный стол; 4 – филамент; 5 – электронный луч; 6 – источник луча; 7 – система фокусировки луча; 8 – ванна расплава; 9 – сопло; 10 – направляющая трубка; 11 – подающие ролики; 12 – подшипники; 13 – барабан; 14 – экран; 15 – образцы для механических испытаний; 16 – подача охлаждающей жидкости для стола

Fig. 1. Scheme of 3D-printing wall-shaped samples by additive electron beam manufacturing:

1 – sample; 2 – substrate; 3 – cooled copper table; 4 – filament; 5 – electron beam; 6 – beam source; 7 – beam focusing system; 8 – molten pool; 9 – nozzle; 10 – guide tube; 11 – feed rollers; 12 – bearings; 13 – revolver; 14 – screen; 15 – samples for mechanical testing; 16 – table coolant supply

мой фокусировки 7 на зону ванны расплава 8. Филамент подается через сопло 9, в которое направляется трубкой 10 системой роликового податчика 11, установленной на подшипниковых опорах 12 из барабана 13, закрытого при электронно-лучевой печати экраном 14. После печати из экспериментальных образцов вырезались образцы в виде «лопаток» для механических испытаний на растяжение 15. В процессе печати поверхность медного стола охлаждается путем пропускания жидкости через охлаждающие каналы 16.

Подбор параметров процесса электронно-лучевого аддитивного производства проводили с целью определения контролируемых параметров процесса и оптимизации этих параметров для обеспечения получения стенок с одной из заданных характеристик (параметра оптимизации). В настоящем исследовании за параметр оптимизации был принят предел прочности (σ_b). В качестве варьируемых параметров использовали: ток электронного пучка (I_e , А), линейную скорость печати (V_w , мм/мин) и коэффициент подачи проволоки ($k_{пр}$). Коэффициент подачи проволоки ($k_{пр}$) является аналогом скорости подачи филамента ($V_{пр}$) и рассчитывается исходя из геометрических размеров формируемого слоя стенок и диаметра филамента. Условно коэффициент подачи определяется по формуле

$$k = \frac{V'}{V},$$

где V' – скорость подачи материала мм/мин; V – скорость подачи образца, мм/мин.

Ускоряющее напряжение при варьировании параметров оптимизации оставляли неизменным, а именно 30 кВ.

Тепловой вклад в работе оценивался через параметр погонной энергии по формуле

$$E = \frac{60UI}{1000V},$$

где U – ускоряющее напряжение, В; I – сила тока, А; V – скорость подачи проволоки, мм/мин.

В табл. 1 представлены данные по планированию серии экспериментов с указанием комбинаций параметров процесса мультитручкового электронно-лучевого аддитивного производства изделий из филаментов аустенитной стали марки 12X18H9T.

Механические свойства определяли на универсальной испытательной машине УТС-110М в испытаниях образцов, вырезанных горизонтально из «стенок» (направление x на рис. 1). Испытания проводили на растяжение со скоростью деформации 1 мм/мин. Размеры рабочей части образцов для испытаний составляли 2,7×2,5×12 мм. Структурные исследования проводили на оптическом микроскопе Altami MET 1С и конфокальном микроскопе Olympus LEXT 4100.

Химический состав филамента и аддитивных изделий из аустенитной стали марки 12X18H9T определялся при помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра NitonXL3t.

Таблица 1

Table 1

Параметры процесса мультитручкового электронно-лучевого аддитивного производства для серии из 8 экспериментов

Multibeam electron beam additive manufacturing process parameters for a series of 8 experiments

Номер серии эксперимента	Ток электронного пучка, мА	Линейная скорость печати, мм/мин	Коэффициент подачи проволоки (k)	Напряжение, кВ
1	40	180	0,9	30
2	65	180	0,9	
3	40	320	0,9	
4	65	320	0,9	
5	40	180	1,3	
6	65	180	1,3	
7	40	320	1,3	
8	65	320	1,3	

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены изображения образцов, полученных по различным режимам электронно-лучевого формирования согласно табл. 1. Внешний обзор полученных образцов показывает, что режимы 1, 2, 4–6 позволяют получить образцы из филаментов аустенитной стали марки 12X18H9T с удовлетворительными формами и размерами. Параметры процесса печати, характерные для режимов 7 и 8, не позволяют осуществить процесс формирования образцов.

По режиму 7 изделие не формируется (рис. 2, ж) по причине низкого значения погонной энергии (225 кДж/м) в сочетании с высоким значением коэффициента подачи филамента ($k = 1,3$). Филамент не плавится вообще и аддитивный процесс не реализуется. Сочетание такого же значения подачи филамента ($k = 1,3$) с умеренным значением погонной энергии (368 кДж/м) не обеспечивает устойчивого процесса формирования изделия. Филамент плавится частично, и уже на третьем слое аддитивный процесс прекращается.

Сочетание низких значений погонной энергии (225 кДж/м) и коэффициента подачи проволоки ($k = 0,9$), реализованное в режиме 3, принципиально позволяет формировать изделие (рис. 2, в). Однако и в этом случае подведенной погонной энергии оказывается недостаточно для полного плавления филамента. Высокое значение погонной энергии (650 кДж/м), реализованное в режимах 2 и 6, позволяет полностью плавить филамент независимо от коэффициента подачи ($k = 0,9$ или $k = 1,3$), но одновременно с этим происходит чрезмерное оплавление ранее сформированных слоев.

При этом оплавление материала формируемого изделия частично компенсируется повышенным объемом филамента при большем значении коэффициента его подачи, что реализовано в режиме 6 (рис. 2, е). Сочетание умеренного значения погонной энергии (368 кДж/м) с низким значением коэффициента подачи филамента ($k = 0,9$), реализованное в режиме 4, позволяет устойчиво формировать изделие с удовлетворительным внешним видом.

Еще более лучший результат реализуется в режиме 5 (рис. 2, д) при сочетании высо-

кого значения коэффициента подачи филамента ($k = 1,3$) и также умеренного, но несколько большего значения погонной энергии (400 кДж/м). Как следует из сравнения геометрических размеров (и внешнего вида) изделий, сформированных по режимам 4 и 5, у последнего повышенная на 8,0 % погонная энергия позволила полностью переплавить подаваемый филамент без оплавления ранее сформированных слоев. В то же время при аналогичном значении погонной энергии (400 кДж/м) в сочетании с низким значением коэффициента подачи филамента ($k = 0,9$) имеет место чрезмерное оплавление ранее сформированных слоев (см. изображение изделия, сформированного по режиму 1).

Легирующие элементы, определяющие марку материала, такие как хром, никель и титан, в стенках образцов по режимам 4–6 соответствуют исходному филаменту (табл. 2). В то же время содержание марганца как химического элемента, наиболее чувствительного к повышенным температурам в процессе переделов плавлением, понизилось по сравнению с исходным материалом (1,163 % вес.) в 2 раза для режима 5 и в 6,5 раз для режима 6. Другими словами, повышенные значения погонной энергии вызывают избыточное испарение чувствительных к перегреву элементов.

На рис. 3–6 приведены изображения макро- и микроструктуры изделий в сечениях, перпендикулярных направлению формирования слоев, сформированных при реализации эксперимента по оптимизации нового технологического процесса электронно-лучевой аддитивной технологии из филаментов аустенитной стали марки 12X18H9T.

В режиме 2 при наибольшем значении погонной энергии (650 кДж/м) в сочетании с наименьшим значением коэффициента подачи проволоки ($k = 0,9$) имеет место чрезмерное проплавление ранее сформированных слоев. Это приводит к проплавлению филамента в подложку на большую глубину, а в последующих слоях – оплавлению и растеканию расплавленного филамента по образцу. В результате формируются геометрически низкие по высоте и широкие образцы, а границы слоев практически не различимы. Это хорошо видно на изображении микроструктуры изделия на рис. 4, б.

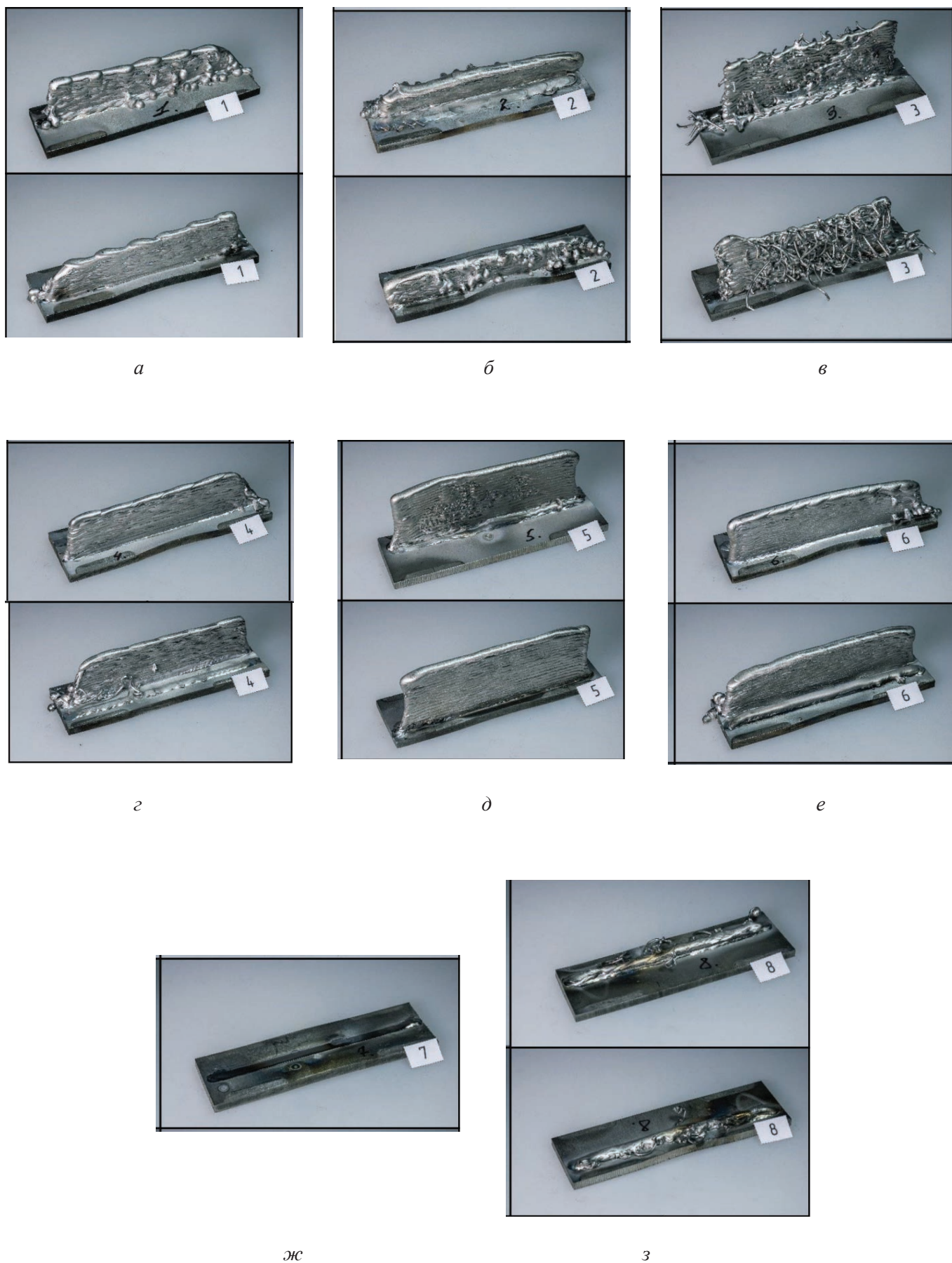


Рис. 2. Внешний вид образцов стали 12X18H9T после 3D-печати

Fig. 2. Overview of samples made of SS321 after 3D printing

Таблица 2

Table 2

Фактическое содержание основных легирующих элементов исходного проволоки (филамента) из аустенитной стали 12X18Н9Т и стенок, сформированных методом электронно-лучевой технологии в процессе оптимизации факторов

Actual content of the main alloying elements of the raw wire (filament) from austenitic steel 321 and wall-shaped samples formed by electron beam additive manufacturing in the process of factors optimization

Материал	Содержание химических элементов, % вес.				
	Si	Mn	Cr	Ni	Ti
Исходный (проволока)	0,420±0,076	1,163±0,095	17,79±0,09	9,72±0,11	0,839±0,061
Образец № 1	0,472±0,059	0,194±0,045	17,49±0,07	9,89±0,10	0,943±0,034
Образец № 2	0,469±0,060	0,325±0,047	17,19±0,07	9,85±0,10	0,954±0,035
Образец № 3	0,484±0,058	0,369±0,051	17,74±0,07	9,97±0,11	0,960±0,038
Образец № 4	0,426±0,049	0,325±0,047	17,91±0,07	9,71±0,10	0,883±0,034
Образец № 5	0,388±0,058	0,566±0,048	18,08±0,07	9,73±0,10	0,951±0,036
Образец № 6	0,452±0,052	0,181±0,046	17,50±0,07	9,95±0,10	0,929±0,035
Образец № 7	0,432±0,055	0,485±0,048	17,54±0,07	8,47±0,09	0,039±0,055
Образец № 8	0,619±0,072	2,06±0,06	17,89±0,07	8,67±0,11	0,551±0,032

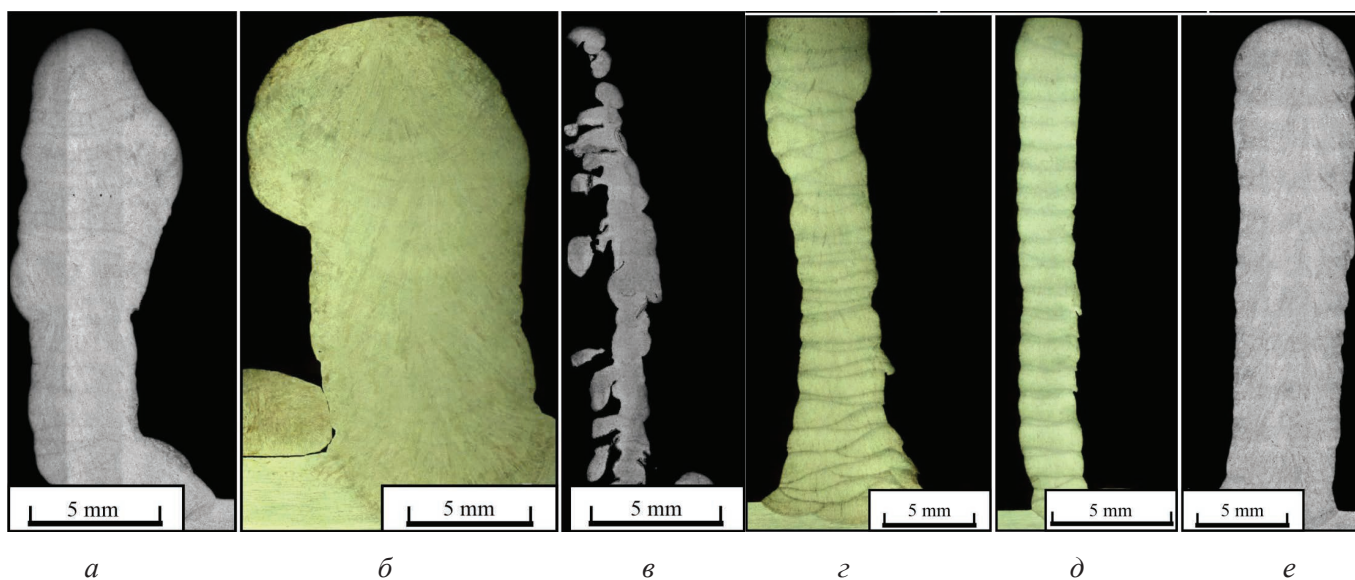


Рис. 3. Макроструктура образцов из филаментов аустенитной стали марки 12X18Н9Т, полученных аддитивным методом производства:

a – режим 1; б – режим 2; в – режим 3; г – режим 4; д – режим 5; e – режим 6

Fig. 3. Macrostructure of samples from filaments of austenitic steel grade SS321 obtained by additive manufacturing method:

a – mode 1; б – mode 2; в – mode 3; г – mode 4; д – mode 5; e – mode 6

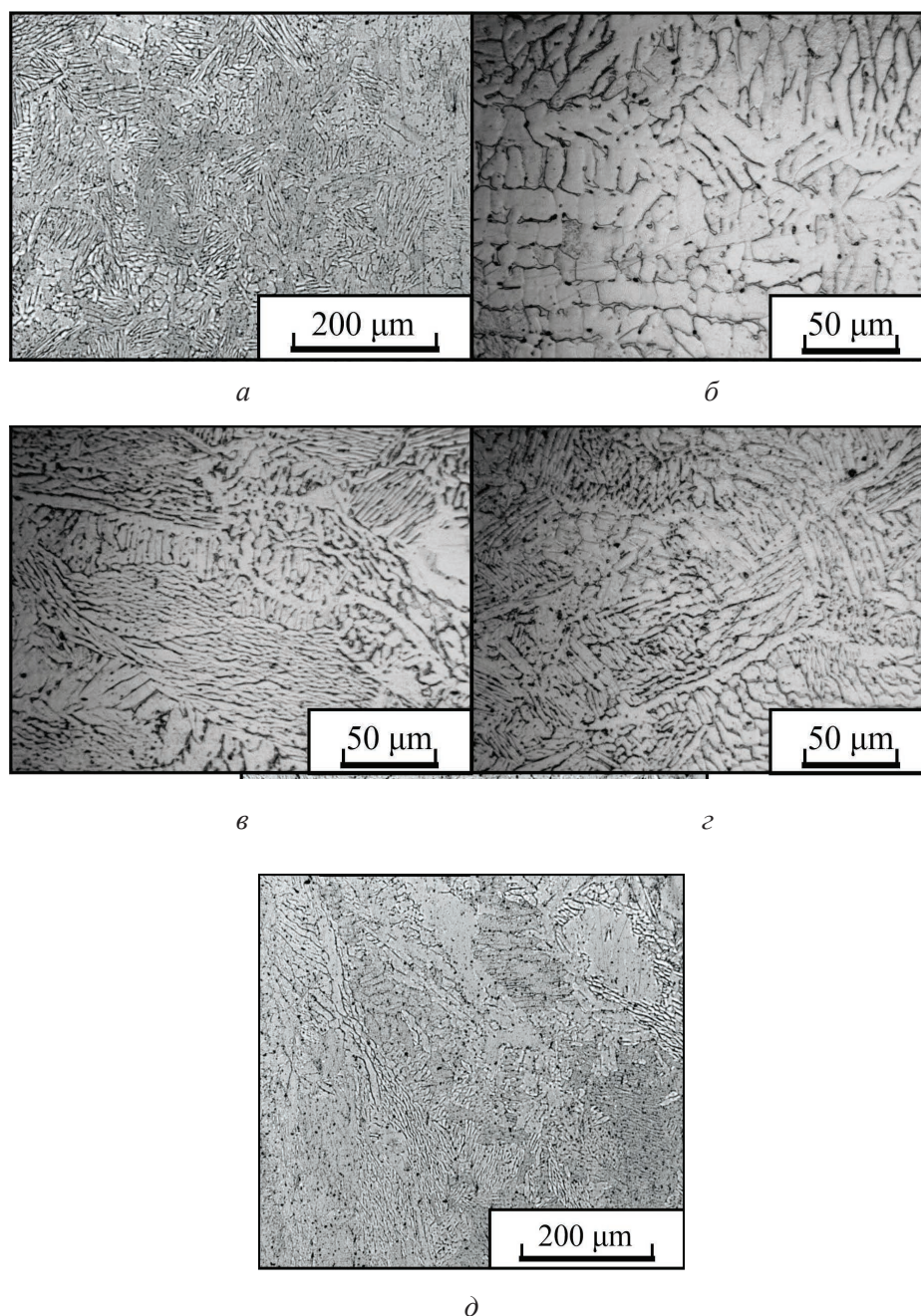


Рис. 4. Микроструктура образцов аустенитной стали 12Х18Н9Т, полученных аддитивным методом производства:

a – режим 1; *б* – режим 2; *в* – режим 4; *г* – режим 5; *д* – режим 6

Fig. 4. Microstructure of austenitic steel 321 samples obtained by additive manufacturing method:

a – mode 1; *б* – mode 2; *в* – mode 4; *г* – mode 5; *д* – mode 6

Удовлетворительным внешним видом обладают изделия, полученные по режимам 4 (при значениях технологических факторов: $I_e = 65$ мА, $V_w = 320$ мм/мин, $k_{пр} = 0,9$), 5 ($I_e = 40$ мА, $V_w = 180$ мм/мин, $k_{пр} = 1,3$) и 6 ($I_e = 65$ мА, $V_w = 180$ мм/мин, $k_{пр} = 1,3$). При этом все три режима обеспечивают формирование материала образца с близкими

значениями механических характеристик (рис. 7). Незначительно большим (на 4,2 %) временным сопротивлением (параметр оптимизации) обладает материал образца, сформированный по режиму 5 (рис. 7, 8). Однако по величине погонной энергии режимы 4, 5 и 6 различаются существенно: 368, 400 и 650 кДж/м соответственно.

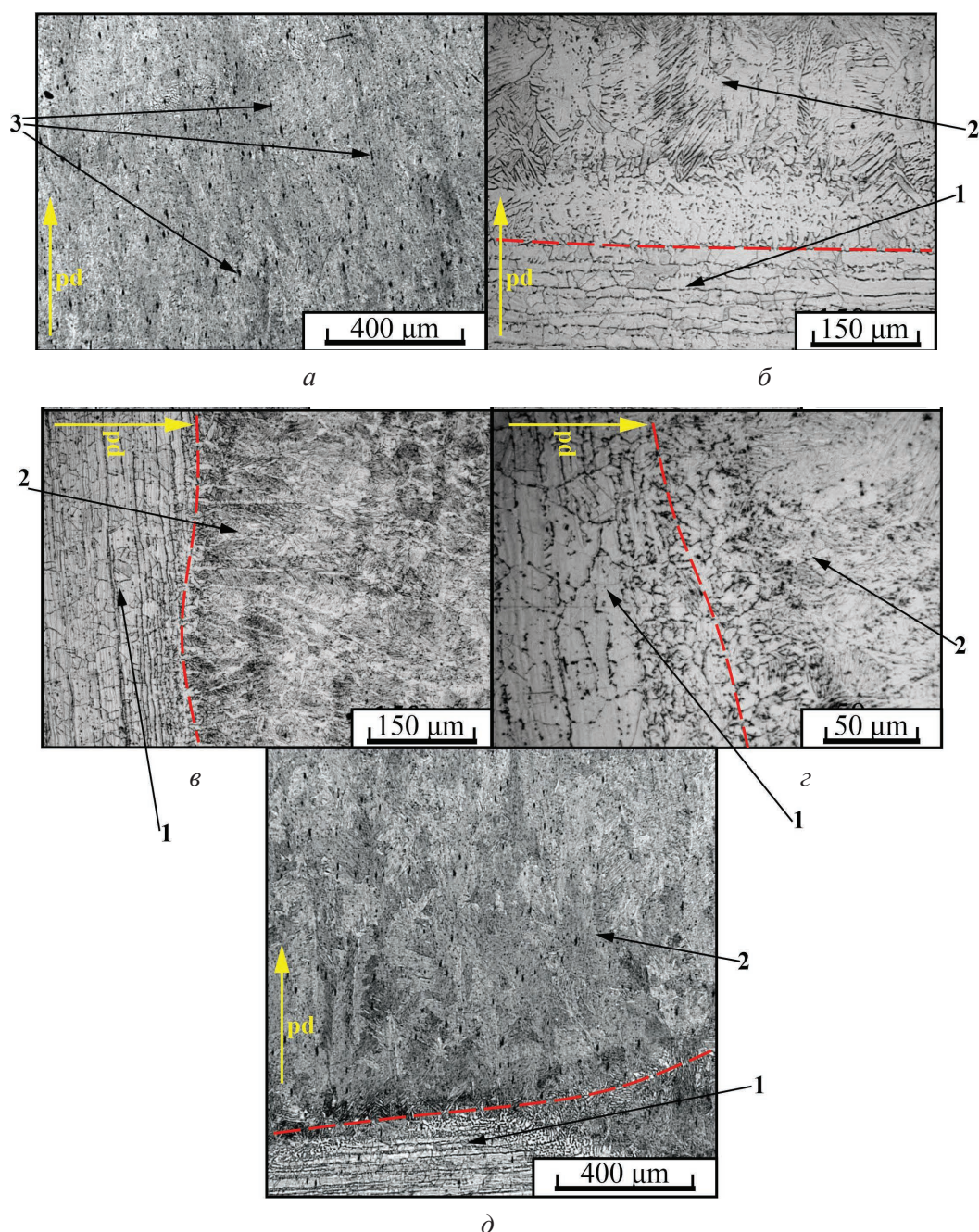


Рис. 5. Структура образцов аустенитной стали 12Х18Н9Т, полученных аддитивным электронно-лучевым методом на границе «подложка-стенка»:

1 – подложка; 2 – первые слои образцов; 3 – частицы карбидов по границам дендритов; pd – направление печати

Fig. 5. Structure of austenitic steel 321 samples formed by electron beam additive manufacturing on the border “substrate-wall”:

1 – substrate; 2 – the first layers of samples; 3 – carbide particles along the boundaries of dendrites; pd – print direction

Исследования микроструктуры образцов, полученных из филаментов аустенитной стали марки 12Х18Н9Т показали, что структура всех образцов характеризуется дендритным строением, как показано на рис. 4. Структура образцов состоит из твердых растворов γ -Fe (аустенита)

и остаточного α -Fe или δ -Fe (феррита), а также частиц карбидов, расположенных по границам дендритных ячеек. Размер и форма дендритных ячеек изменяется с увеличением слоев стенки (рис. 4). При исследовании микроструктуры образцов, полученных из филаментов аустенитной

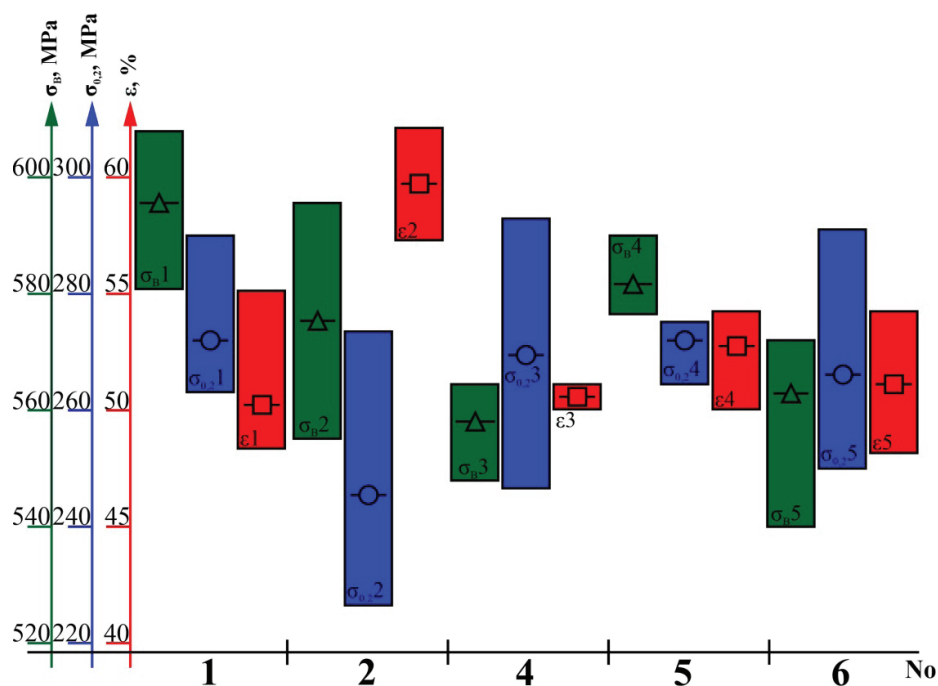


Рис. 6. Распределение предела прочности, предела текучести и относительного удлинения образцов, изготовленных по режимам 1–6. Символами обозначены средние значения механических свойств

Fig. 6. Distribution of ultimate tensile strength, creep strength and relative elongation of specimens manufactured by modes 1–6. Symbols indicate the average value of mechanical properties

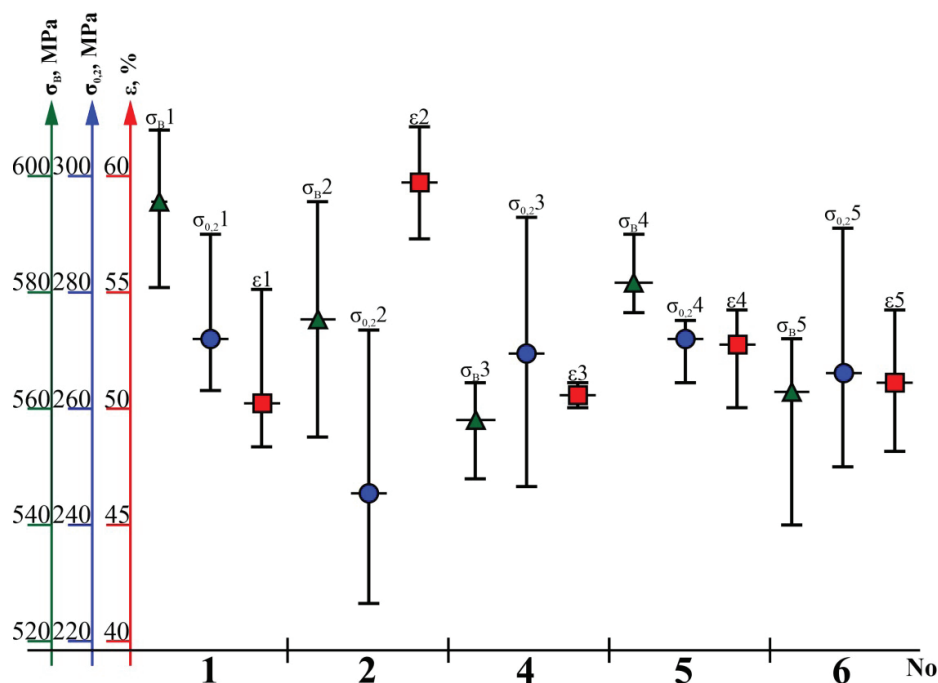


Рис. 7. Диаграммы «напряжение – деформация» образцов из аустенитной стали 12Х18Н9Т, полученных аддитивным электронно-лучевым методом по различным режимам

Fig. 7. Stress-strain diagram of samples from austenitic steel 321 obtained by the additive electron beam method in different modes

стали марки 12X18H9T по режимам 1, 2, 4–6, не было выявлено наличия дефектов, таких как поры и трещины, что указывает на полное осаждение слоев (рис. 4).

Микропоры, усадочные поры и другие дефекты в переходном слое между первыми слоями экспериментальных образцов и подложкой также отсутствуют (рис. 5). Первичные слои экспериментальных образцов аустенитной стали 12X18H9T характеризуются мелкоячеистой дендритной структурой с карбидными частицами по границам дендритов (рис. 5, а).

Механические характеристики образцов, полученных из филаментов аустенитной стали марки 12X18H9T, имеют высокие показатели механических свойств, находящихся на уровне листового проката стали 12X18H9T в термообработанном состоянии (закалка 1030...1080 °C в воде или на воздухе), для которой характерны значения предела прочности 530 МПа, предела текучести 216 МПа и относительного удлинения 38 % (рис. 6). На рис. 7 изображены диаграммы «напряжение–деформация» при испытаниях образцов из аустенитной стали 12X18H9T на растяжение по различным режимам. Характерные особенности изменения напряжений являются типичными для всех экспериментальных образцов из аустенитной стали 12X18H9T, полученных аддитивным методом производства при испытаниях на растяжение по режимам 1, 2, 4–6 (рис. 7). Для кривых характерно наличие трех основных стадий деформации, включающих в себя упругую стадию, сменяемую стадией с параболически изменяющимися в процессе деформации напряжениями, после которой происходит переход к стадии с незначительно изменяющимися значениями напряжений и в дальнейшем образованию «шейки» и разрушению образца.

Выводы

Таким образом, с учетом особенностей внешнего вида, макро- и микроструктуры, а также механических свойств и химического состава можно констатировать, что оптимизация достигается сочетанием технологических факторов, при котором значение погонной энергии приближается к 400 кДж/м (режим 5). Закономерности пластического течения материала образцов, полученных в различных режимах, исходя из анализа

диаграмм нагружения являются идентичными. Стадийность кривой «напряжение – деформация», заключающаяся в наличии трех основных стадий, является неизменной для всех образцов. Микро- и макроструктура образцов, полученных на различных режимах, определяющих механические свойства материалов, также имеют лишь незначительные отклонения. Во всех режимах электронно-лучевого нанесения образцов происходило снижение концентрации марганца в материале. В части неоптимальных режимов отмечается резкое уменьшение содержания титана. Исследования показывают, что получение образцов при варьировании технологических параметров аддитивного электронно-лучевого метода, позволяющих формировать изделия с удовлетворительной формой и размерами без нарушений макрогеометрии в процессе печати, обуславливает получение образцов с механическими свойствами, отличающимися в узких пределах.

Список литературы

1. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties / T. Debroy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee, J.W. Elmer, J.O. Milewski, A.M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang // *Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 92. – P. 112–224. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
2. Microstructural evolution and chemical corrosion of electron beam wire-feed additively manufactured AISI 304 stainless steel / S.Y. Tarasov, A.V. Filippov, N.N. Shamardin, 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.
3. Progress in additive manufacturing on new materials: a review / N. Li, S. Huang, G. Zhang, R. Qin, W. Liu, H. Xiong, G. Shi, J. Blackburn // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2019. – Vol. 35 (2). – P. 242–269. – DOI: 10.1016/j.jmst.2018.09.002.
4. Microstructure and surface analysis of friction stir processed Ti-6Al-4V plates manufactured by electron beam melting / F. Rubino, F. Scherillo, S. Franchitti, A. Squillace, A. Astarita, P. Carlone // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2019. – Vol. 37. – P. 392–401. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.12.015.
5. Basak A., Das S. Epitaxy and microstructure evolution in metal additive manufacturing // *Annual Review of Materials Research*. – 2016. – Vol. 46. – P. 125–149. – DOI: 10.1146/annurev-matsci-070115-031728.
6. The Features of structure formation in chromium-nickel steel manufactured by a wire-feed electron



beam additive process / A.V. Kolubaev, S.Y. Tarasov, A.V. Filippov, Y.A. Denisova, E.A. Kolubaev, A.I. Potekaev // *Russian Physics Journal*. – 2018. – Vol. 61 (8). – P. 1491–1498. – DOI: 10.1007/s11182-018-1561-9.

7. Effect of heat input on phase content, crystalline lattice parameter, and residual strain in wire-feed electron beam additive manufactured 304 stainless steel / S.Y. Tarasov, A.V. Filippov, N.L. Savchenko, S.V. Fortuna, V.E. Rubtsov, E.A. Kolubaev, S.G. Psakhie // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 99 (9–12). – P. 2353–2363. – DOI: 10.1007/s00170-018-2643-0.

8. Additive manufacturing of metals: a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys / S. Gorsse, C. Hutchinson, M. Gouné, R. Banerjee // *Science and Technology of Advanced Materials*. – 2017. – Vol. 18 (1). – P. 1–27. – DOI: 10.1080/14686996.2017.1361305.

9. Design of novel materials for additive manufacturing – Isotropic microstructure and high defect tolerance / J. Günther, F. Brenne, M. Droste, M. Wendler, O. Volkova, H. Biermann, T. Niendorf // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8. – P. 1–14. – DOI: 10.1038/s41598-018-19376-0.

10. Friction stir welding of additively manufactured Ti-6Al-4V: microstructure and mechanical properties / A.K. Singh, B. Kumar, K. Jha, A. Astarita, A. Squillace, S. Franchitti, A. Arora // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2020. – Vol. 277. – P. 116433. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116433.

11. Regularities of composite materials formation using additive electron-beam technology, friction stir welding and friction stir processing / T.A. Kalashnikova, A.V. Gusarova, A.V. Chumaevskii, E.O. Knyazhev, M.A. Shvedov, P.A. Vasilyev // *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*. – 2019. – Vol. 21, N 4. – P. 94–112. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.4-94-112.

12. Peculiarities of structure formation in copper/steel bimetal fabricated by electron-beam additive technology / K.S. Osipovich, A.V. Chumaevskii, A.A. Eliseev, K.N. Kalashnikov, E.A. Kolubaev, V.E. Rubtsov, E.G. Astafurova // *Russian Physics Journal*. – 2019. – Vol. 62 (8). – P. 1486–1494. – DOI: 10.1007/s11182-019-01867-w.

13. Wang Z., Palmer T.A., Beese A.M. Effect of processing parameters on microstructure and tensile properties of austenitic stainless steel 304L made by directed energy deposition additive manufacturing // *Acta Materialia*. – 2016. – Vol. 110. – P. 226–35. – DOI: 10.1016/j.actamat.2016.03.019.

14. Characterization of wire arc additively manufactured titanium aluminide functionally graded material: microstructure, mechanical properties and oxidation behavior / J. Wang, Z. Pan, Y. Ma, Y. Lu, C. Shen, D. Cuiuri, H. Li // *Materials Science and Engineering: A*. – 2018. – Vol. 734. – P. 110–119. – DOI: 10.1016/j.msea.2018.07.097.

15. The effect of wire feed geometry on electron beam freeform 3D printing of complex-shaped samples from Ti-6Al-4V alloy / K.N. Kalashnikov, V.E. Rubtsov, N.L. Savchenko, T.A. Kalashnikova, K.S. Osipovich, A.A. Eliseev, A.V. Chumaevskii // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 105 (7–8). – P. 3147–3156. – DOI: 10.1007/s00170-019-04589-y.

16. Friction welding of electron beam melted Ti-6Al-4V / P.T. Qin, R. Damodaram, T. Maity, W.W. Zhang, C. Yang, Z. Wang, K.G. Prashanth // *Materials Science and Engineering A*. – 2019. – Vol. 761. – P. 138045. – DOI: 10.1016/j.msea.2019.138045.

17. Electron beam additive manufacturing with wire – Analysis of the process / M.St. Węglowski, S. Blacha, J. Pilarczyk, J. Dutkiewicz, L. Rogal // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – Vol. 1960, iss. 1. – P. 140015. – DOI: 10.1063/1.5035007.

18. Wanjara P., Brochu M., Jahazi M. Electron beam freeforming of stainless steel using solid wire feed // *Materials and Design*. – 2007. – Vol. 28. – P. 2278–2286. – DOI: 10.1016/j.matdes.2006.08.008.

19. A three dimensional transient model for heat transfer and fluid flow of weld pool during electron beam freeform fabrication of Ti-6Al-4V alloy / Q. Tang, Sh. Pang, B. Chen, H. Suo, J. Zhou // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – Vol. 78. – P. 203–215. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.06.048.

20. Taminger K.M.B., Hafley R.A. Characterization of 2219 aluminum produced by electron beam freeform fabrication // *Proceedings of the 13th Solid Freeform Fabrication Symposium*, 5–7 August 2002. – Austin, TX, United States, 2002. – P. 1–8.

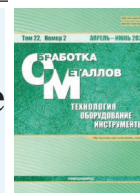
Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Influence of Electron Beam Additive Manufacturing Process Parameters on Structure and Properties of Austenitic Stainless Steel 321

Anna Zykova^{a,*}, Sergey Nikonov^b, Veronika Utyaganova^c, Evgeny Kolubaev^d

Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-8779-3784>, zykovaap@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-5588-4718>, SergRFF@ngs.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-2303-8015>, filaret_2012@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>, eak@ispms.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 09 March 2020

Revised: 02 April 2020

Accepted: 17 April 2020

Available online: 15 June 2020

Keywords:

Additive technologies

Electron beam

Austenitic steel

Electron beam current

Cladding rate

Wire feed speed

Funding

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. III.23.2.11

ABSTRACT

Introduction. In modern industrial and scientific-technical sphere the problem of details formation from various metals and alloys by additive methods is one of the most critical and demanding timely decision. This is primarily due to the need to produce large, complex shaped parts with high productivity and as little waste as possible. One of the most applicable methods for the formation of products by additive method is electron beam wire-feed technology. With use of wire filament and an electron beam for melting in a printing zone it is possible to obtain details with high productivity and acceptable indicators of final structure and mechanical properties. However, interrelation of received structure and mechanical properties depending on parameters of electron beam additive manufacturing process nowadays insufficiently presented in the literature. In this regard, the purpose of this work is to analyze the influence of additive electron-beam production process parameters on the formation of products from SS 321. **Results and discussion.** Electron beam current, linear printing speed, and wire feeding ratio are used as variable parameters, and the ultimate tensile strength is taken as the optimization parameter. Optimal parameters of the electron beam current (40 mA), printing speed (180 mm/min) and wire feeding ratio (1.3) at constant accelerating voltage (30 kV) are established. These parameters allow forming the product without defects and without melting the previously formed layers with the ultimate tensile strength of 583 MPa. It is shown that the use of the highest values of printing speed (320 mm/min) and wire feeding ratio (1.3) at varying the electron beam current does not allow to perform the sample formation process. It is established that at the parameters of the electron beam additive manufacturing process, which provide the complete formation of the product, the structures obtained in materials achieve ultimate tensile strength within 558–595 MPa.

For citation: Zykova A.P., Nikonov S.Yu., Utyaganova V.R., Kolubaev E.A. Influence of electron beam additive manufacturing process parameters on structure and properties of austenitic stainless steel 321. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 63–75. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.2-63-75. (In Russian).

References

1. Debroy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 92, pp. 112–224. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
2. Tarasov S.Y., Filippov A.V., Shamarin N.N., Fortuna S.V., Maier G.G., Kolubaev E.A. 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.
3. Li N., Huang S., Zhang G., Qin R., Liu W., Xiong H., Shi G., Blackburn J. Progress in additive manufacturing on new materials: a review. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, vol. 35 (2), pp. 242–269. DOI: 10.1016/j.jmst.2018.09.002.

* Corresponding author

Zykova Anna P., Ph.D. (Physics and Mathematics), Lead Engineer
 Institute of Strength Physics and Materials Science
 of the Siberian Branch of the RAS,
 2/4, pr. Akademicheskii,
 634055, Tomsk, Russian Federation
 Tel.: +7-923-448-20-00, e-mail: zykovaap@mail.ru



4. Rubino F., Scherillo F., Franchitti S., Squillace A., Astarita A., Carlone P. Microstructure and surface analysis of friction stir processed Ti-6Al-4V plates manufactured by electron beam melting. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 37, pp. 392–401. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.12.015.
5. Basak A., Das S. Epitaxy and microstructure evolution in metal additive manufacturing. *Annual Review of Materials Research*, 2016, vol. 46, pp. 125–149. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070115-031728.
6. Kolubaev A.V., Tarasov S.Y., Filippov A.V., Denisova Y.A., Kolubaev E.A., Potekaev A.I. The features of structure formation in chromium-nickel steel manufactured by a wire-feed electron beam additive process. *Russian Physics Journal*, 2018, vol. 61 (8), pp. 1491–1498. DOI: 10.1007/s11182-018-1561-9.
7. Tarasov S.Y., 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. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 99 (9–12), pp. 2353–2363. DOI: 10.1007/s00170-018-2643-0.
8. Gorsse S., Hutchinson C., Gouné M., Banerjee R. Additive manufacturing of metals: a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2017, vol. 18 (1), pp. 1–27. DOI: 10.1080/14686996.2017.1361305.
9. Günther J., Brenne F., Droste M., Wendler M., Volkova O., Biermann H., Niendorf T. Design of novel materials for additive manufacturing – Isotropic microstructure and high defect tolerance. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, pp. 1–14. DOI: 10.1038/s41598-018-19376-0.
10. Singh A.K., Kumar B., Jha K., Astarita A., Squillace A., Franchitti S., Arora A. Friction stir welding of additively manufactured Ti-6Al-4V: microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, vol. 277, p. 116433. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116433.
11. Kalashnikova T.A., Gusarova A.V., Chumaevskii A.V., Knyazhev E.O., Shvedov M.A., Vasilyev P.A. Regularities of composite materials formation using additive electron-beam technology, friction stir welding and friction stir processing. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 94–112. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.4-94-112.
12. Osipovich K.S., Chumaevskii A.V., Eliseev A.A., Kalashnikov K.N., Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Astafurova E.G. Peculiarities of structure formation in copper/steel bimetal fabricated by electron-beam additive technology. *Russian Physics Journal*, 2019, vol. 62 (8), pp. 1486–1494. DOI: 10.1007/s11182-019-01867-w.
13. Wang Z., Palmer T.A., Beese A.M. Effect of processing parameters on microstructure and tensile properties of austenitic stainless steel 304L made by directed energy deposition additive manufacturing. *Acta Materialia*, 2016, vol. 110, pp. 226–35. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.03.019.
14. Wang J., Pan Z., Ma Y., Lu Y., Shen C., Cuiuri D., Li H. Characterization of wire arc additively manufactured titanium aluminide functionally graded material: microstructure, mechanical properties and oxidation behavior. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, vol. 734, pp. 110–119. DOI: 10.1016/j.msea.2018.07.097.
15. Kalashnikov K.N., Rubtsov V.E., Savchenko N.L., Kalashnikova T.A., Osipovich K.S., Eliseev A.A., Chumaevskii A.V. The effect of wire feed geometry on electron beam freeform 3D printing of complex-shaped samples from Ti-6Al-4V alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 105 (7–8), pp. 3147–3156. DOI: 10.1007/s00170-019-04589-y.
16. Qin P.T., Damodaram R., Maity T., Zhang W.W., Yang C., Wang Z., Prashanth K.G. Friction welding of electron beam melted Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering A*, 2019, vol. 761, p. 138045. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138045.
17. Węglowski M.St., Błacha S., Pilarczyk J., Dutkiewicz J., Rogal L. Electron beam additive manufacturing with wire – Analysis of the process. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 1960, iss. 1, p. 140015. DOI: 10.1063/1.5035007.
18. Wanjara P., Brochu M., Jahazi M. Electron beam freeforming of stainless steel using solid wire feed. *Materials and Design*, 2007, vol. 28, pp. 2278–2286. DOI: 10.1016/j.matdes.2006.08.008.
19. Tang Q., Pang Sh., Chen B., Suo H., Zhou J. A three dimensional transient model for heat transfer and fluid flow of weld pool during electron beam freeform fabrication of Ti-6-Al-4-V alloy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, vol. 78, pp. 203–215. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.06.048.
20. Taminger K.M.B., Hafley R.A. Characterization of 2219 aluminum produced by electron beam freeform fabrication. *Proceedings at the 13th Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, United States, 5–7 August 2002, pp. 1–8.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.