

УДК 620.179.1

DOI: 10.22213/2413-1172-2023-4-33-41

Исследование влияния параметров селективного лазерного плавления на структуру и физико-механические свойства заготовки из нержавеющей хромоникелевой стали*

А. А. Хлыбов, доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Д. А. Рябов, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

А. А. Соловьев, студент, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

А. А. Шуянова, студент, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

А. В. Лукоянов, Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И. И. Африкантова, Нижний Новгород, Россия

В настоящее время существует ряд аддитивных технологий, которые применяются в различных отраслях промышленности (лазерное сплавление порошковых материалов, электронно-лучевая плавка и др.). Формирование металлических конструкций и изделий методами аддитивных технологий происходит за счет добавления нового слоя материала и его дальнейшего плавления (спекания), обеспечивающего сцепление каждого последующего слоя с предшествующим в соответствии с данными цифровой модели. К преимуществам применения и развития аддитивных технологий относятся: возможность использования широкого спектра материалов, получения готовых изделий со сложной геометрией, восстановление и ремонт поврежденных конструкций, а также возможность нанесения защитных и антикоррозионных покрытий.

Важнейшее значение в аддитивном производстве имеют металлические порошковые материалы с заданными физико-механическими свойствами. К основным требованиям для таких порошков относятся требования к их форме и размерам. Предпочтительной формой частиц является сферическая, так как она обеспечивает более компактную укладку в заданном объеме и необходимую текучесть материала, которая обуславливается низким сопротивлением в системах подачи порошковых материалов в 3D-принтерах.

Целью работы является исследование влияния параметров процесса селективного лазерного плавления на структуру и механические свойства изделий из нержавеющей хромоникелевой стали.

Образцы, полученные селективным лазерным плавлением, подвергали пикнометрическому и металлографическому анализу. На основании полученных изображений микроструктур был проведен цифровой анализ пористости исследуемой заготовки в программном комплексе Thixomet Pro. Также в работе проводилось измерение микротвердости и акустических характеристик по всему сечению исследуемой заготовки. Выявлено, что при увеличении расстояния от подложки (0...112 мм) в поперечном и продольном сечении сохраняется тенденция снижения значений плотности и увеличения объемной доли пор. Показано, что для контроля изменения физико-механических свойств заготовок из нержавеющей хромоникелевой стали, полученной методом селективного лазерного плавления, может быть применен акустический параметр D_s .

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное плавление, нержавеющие хромоникелевые стали, пористость, микроструктура, акустический контроль.

Введение

Аддитивные технологии – это широкий термин, охватывающий различные способы изготовления изделий путем послойного добавления материала согласно цифровой модели [1–6]. Это позволяет получать заготовки с минимальным припуском на даль-

нейшую механическую обработку благодаря точной траектории движения инструмента и удержанию заданного поперечного сечения [7, 8]. Реализация метода послойного синтеза требует наличия инертной среды (аргон) во всей зоне построения, а также охлаждения определенных участков заготовки с целью снижения вероятно-

© Хлыбов А. А., Рябов Д. А., Соловьев А. А., Шуянова А. А., Лукоянов А. В., 2023

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-19-00332-П «Разработка научно обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в арктических условиях».

сти возникновения структурных дефектов. Такие дефекты могут быть образованы неправильным выбором параметров работы лазера и неоднородностью формируемого материала заготовки [9, 10].

Технология послойной печати нашла применение во многих отраслях (атомная энергетика, авиастроение, судостроение, космонавтика и др.) благодаря своей высокой точности построения заготовки, возможности создавать объекты сложной конфигурации и использованию различных материалов [11].

Технология селективного лазерного плавления (SLM) является одним из многих методов аддитивного производства, при котором используются высокоомощные лазеры для создания трехмерных объектов путем плавления металлических порошков. Метод SLM позволяет строить объекты сложной геометрической формы с тонкими стенками и полостями, а также применяется при создании высокопрочных элементов конструкций, которые сложно изготовить традиционными методами [12].

Материалы изделий, полученные по технологии SLM, отличаются повышенной прочностью и мелкозернистой структурой, однако могут иметь анизотропию свойств и пониженную пластичность из-за наличия значительных остаточных напряжений [13–15]. Распространенными порошковыми материалами для печати на

3D-принтерах являются чистые металлы и сплавы на железной, никелевой, титановой и других основах.

На данный момент среди основных задач при реализации 3D-печати металлами является получение материала заготовки с требуемыми физико-механическими свойствами. Кроме того, важно обеспечить приемлемую микроструктуру материала и снизить долю остаточных пор, образование которых связано с качеством исходного материала и параметрами процесса плавки [16–19].

Цель настоящей работы – исследование влияния параметров процесса SLM-печати (направления наплавки и расстояния от подложки) на структуру и механические свойства материала заготовки из сплава 12X18H10T.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись образцы из хромоникелевой аустенитной стали 12X18H10T. На рисунке 1, *a* представлена SLM-заготовка из исследуемого сплава. Примененный при построении режим печати: мощность лазера – 220 Вт, скорость сканирования луча – 650 мм/с, шаг сканирования – 60 мкм, шаг перемещения – 50 мкм. Вдоль основной (вертикальной) оси заготовка была разрезана на равные образцы размером 10×10×10 мм (рис. 1, *b*).

Химический состав марки стали 12X18H10T приведен в таблице 1.

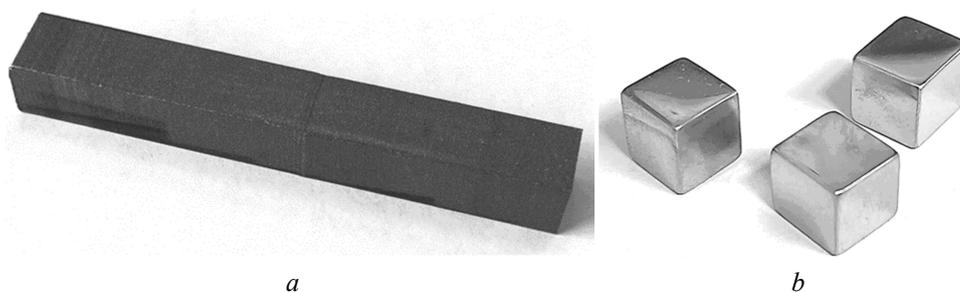


Рис. 1. SLM-заготовка (*a*) и полученные образцы (*b*) из стали 12X18H10T

Fig. 1. SLM-work piece (*a*) and obtained samples (*b*) made of 12Cr18Ni10Ti steel

Таблица 1. Химический состав марки стали 12X18H10T

Table 1. Chemical composition of 12Cr18Ni10Ti steel

Элементный состав, мас. %									
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Ti	Fe
до 0,12	до 0,8	до 2	9...11	до 0,02	до 0,035	17...19	до 0,3	0,6...0,8	Ост.

Образцы, полученные селективным лазерным плавлением, подвергались металлографическому и пикнометрическому исследованиям, измерению твердости и исследовались акустические характеристики материала.

Для определения плотности образцы предварительно подготавливались (поэтапная шлифовка абразивным материалом и полировка). Далее определялась плотности образцов методом гидростатического взвешивания. Измерения плотно-

сти проводились с использованием аналитических весов ВЛА-200 при температуре 22 °С.

Плотность испытуемого образца ρ (г/см³) определялась по формуле

$$\rho = \frac{m_1 \rho_1}{m_2}, \quad (1)$$

где m_1 – масса испытуемого образца, определенная при взвешивании на воздухе, г; ρ_1 – плотность жидкости на воздухе, г/см³; m_2 – масса объема жидкости, вытесненной образцом, помещенным в эту жидкость, равная разности масс образца, взвешенного на воздухе, и образца, взвешенного в воде, г. Результаты испытаний округлялись до третьего десятичного знака.

Среднее значение плотности определялось по формуле

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{\sum \rho_i}{n}, \quad (2)$$

где ρ_i – текущий замер плотности образца, г/см³; n – количество замеров.

После полирования для выявления структуры образцы были протравлены электролитическим способом в 10%-м растворе щавелевой кислоты по режиму 5 В, 2 А, выдержка 30 сек. Изображения микроструктур исследуемых образцов получали на оптическом микроскопе KYENCEVHX-1000.

Определение остаточной пористости и геометрических параметров наплавленных слоев производилось в программе Thixomet Pro (анализатор микроструктур). Определенные объекты выделялись на цветовых гистограммах по уровню яркости. По полученным данным производился анализ и расчет заданных характеристик.

Микротвердость поверхности образцов измерялась на микротвердомере ИТВ-1-АМ. Нагрузка составляла 1 кгс, время выдержки 15 сек.

В точке контроля микроструктуры и микротвердости проводились измерения скорости распространения упругих волн (м/с) по формуле

$$C_i = \frac{2h}{\tau_i}, \quad (3)$$

где h – толщина образца, м; τ_i – время распространения ультразвуковых импульсов.

Время распространения ультразвуковых (УЗ) импульсов рассчитывалось с помощью акустического измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) «АСТРОН». Данный комплекс обеспечивает точность измерения времени распространения упругих импульсов до 10⁻⁹ с.

Использовались совмещенные датчики продольных и поперечных волн с резонансной частотой 5 МГц. Работа ИВК «АСТРОН» осуществлялась в раздельно-совмещенном режиме (излучение упругих волн и их прием производили по разным каналам).

Для оценки структурного состояния материала (контроля остаточной пористости) использовался акустический диагностический параметр D_C , который рассчитывался по полученным скоростям распространения объемных УЗ-волн [20]:

$$D_C = \frac{(2h / C_i^{\parallel}) + (2h / C_i^{\perp})}{2h / C_i} = \frac{\tau_i^{\parallel} + \tau_i^{\perp}}{\tau_i}, \quad (4)$$

где C_i^{\parallel} , τ_i^{\parallel} – соответственно, скорость и время распространения импульса упругой сдвиговой волны с поперечной поляризацией (направление поляризации вдоль образца); C_i^{\perp} , τ_i^{\perp} – соответственно, скорость и время распространения импульса упругой волны сдвиговой с поперечной поляризацией (направление поляризации поперек образца); C_i , τ_i – соответственно, скорость и время распространения импульса упругой продольной волны.

Анализ результатов экспериментальных исследований

На рисунках 2, 3 представлены микроструктуры стали 12Х18Н10Т до и после цифровой обработки в среде Thixomet Pro.

Анализ результатов остаточной пористости показал, что в продольном и поперечном сечениях значения пористости возрастают с увеличением расстояния от подложки (табл. 2). В структуре исследуемого материала присутствуют поры как правильной круглой, так и вытянутой овальной формы, расположенные по границам слоев. Размеры обнаруженных в материале пор находится в пределах 0,18...564 мкм².

В ходе анализа микроструктур в продольном и поперечном сечениях выявлены микрованны расплава и наплавленные слои, отражающие стратегию прохода лазерного луча. Границы единичного наплавленного слоя представляют собой дугообразные линии, которые определяют морфологию структуры образца. Также выявлено, что при расплавлении каждого последующего слоя происходит частичный переплав предыдущего. Данный процесс способствует снижению вероятности образования остаточных пор в межслойном пространстве. Ширина

ванны расплава достигает 100...120 мкм, при этом высота этих областей составляет примерно 50...150 мкм.

На графике (рис. 4) отражено влияние расстояния от подложки на значение плотности материала формируемой заготовки.

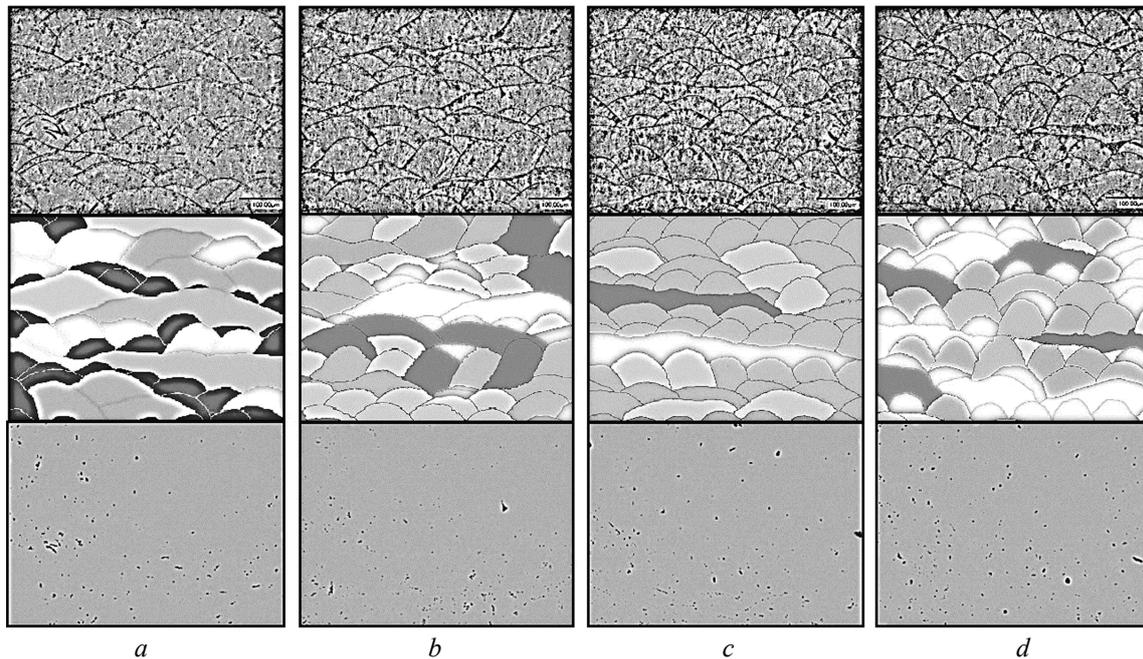


Рис. 2. Исходные структуры (сверху) и структуры после анализа (центр, низ) образца в продольном сечении, $\times 500$:
a – близ подложки; *b* – 54 мм от подложки; *c* – 86 мм от подложки; *d* – 112 мм от подложки

Fig. 2. Original structures (top) and structures after analysis (center, down) of the sample in longitudinal section, $\times 500$:
a - twin pads; *b* - 54 mm of pads; *c* - 86 mm of pads; *d* - 112 mm of pads

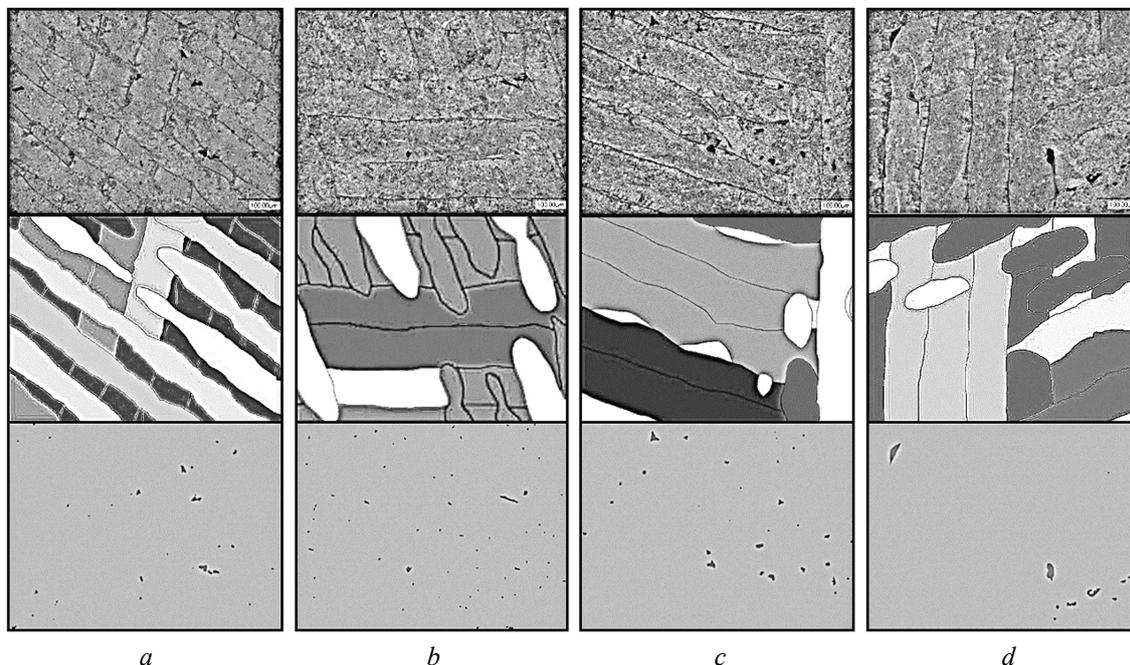


Рис. 3. Исходные структуры (сверху) и структуры после анализа (центр, низ) образца в поперечном сечении, $\times 500$:
a – близ подложки; *b* – 54 мм от подложки; *c* – 86 мм от подложки; *d* – 112 мм от подложки

Fig. 3. Original structures (top) and structures after analysis (center, down) of the sample in cross-section, $\times 500$:
a - twin pads; *b* - 54 mm of pads; *c* - 86 mm of pads; *d* - 112 mm of pads

Таблица 2. Объемная доля пор в продольном и поперечном сечении образцов, %

Table 2. The volume fraction of pores in the longitudinal and cross-section of samples, %

Расстояние, мм	Сечение	
	Продольное	Поперечное
0	0,68	0,36
54	0,70	0,39
86	0,73	0,51
112	0,73	0,52

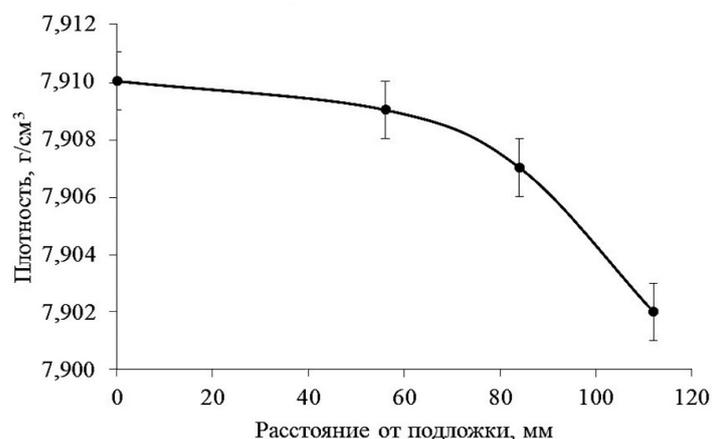


Рис. 4. Зависимость плотности полученного материала от высоты SLM-заготовки

Fig. 4. Dependence of the density of the obtained material on the height of the SLM work piece

Проанализировав полученные результаты измерения плотности образцов, можно сказать, что при увеличении расстояния от подложки плотность материала снижается. Данная зависимость может быть связана с тем, что в зоне печати с течением времени снижается теплоотвод ввиду разогрева сформированных ниже слоев. В начале построения заготовки активный отвод тепла обеспечивает массивная подложка, а по мере отдаления от подложки происходит увеличение температуры в рабочей камере, что способствует повышению длительности нахождения материала в жидкой фазе, захвату технологического газа в ванну расплава и формированию пор. Полученные результаты измерения плотности согласуются с металлографическим анализом (табл. 2).

Были проведены замеры микротвердости напечатанных образцов в продольном и поперечном сечениях заготовки. Была построена область средних значений микротвердости (рис. 5) для материала SLM-заготовки. Видно, что значения микротвердости с увеличением расстояния от подложки носят циклический характер, однако в целом наблюдается тенденция к снижению значений твердости материала по мере отдаления от подложки. Причины циклического изменения значений микротвер-

дости связано, по всей видимости, с особенностями печати заготовки, которые предусматривают технологические выдержки (примерно каждые 20 мм вертикального построения), направленные на понижение температуры заготовки.

На рисунке 6 представлено распределение вдоль вертикальной оси заготовки полученных значений акустического параметра D_C в продольном и поперечном сечениях.

Анализ полученных значений акустического параметра показывает, что величина D_C монотонно снижается при увеличении расстояния от подложки как в продольном, так и в поперечном сечениях. Данный характер зависимости может быть связан с тем, что увеличение остаточной пористости снижает все физико-механические свойства исследуемого материала, включая упругие характеристики и плотность (рис. 4). Это оказывает существенное влияние на параметры акустических импульсов, которые распространяются в объеме исследуемых образцов (рис. 6). В результате проделанной работы установлено, что значения акустического диагностического параметра D_C могут быть использованы в решении практических задач контроля остаточной пористости в материале заготовок, полученных методом SLM.

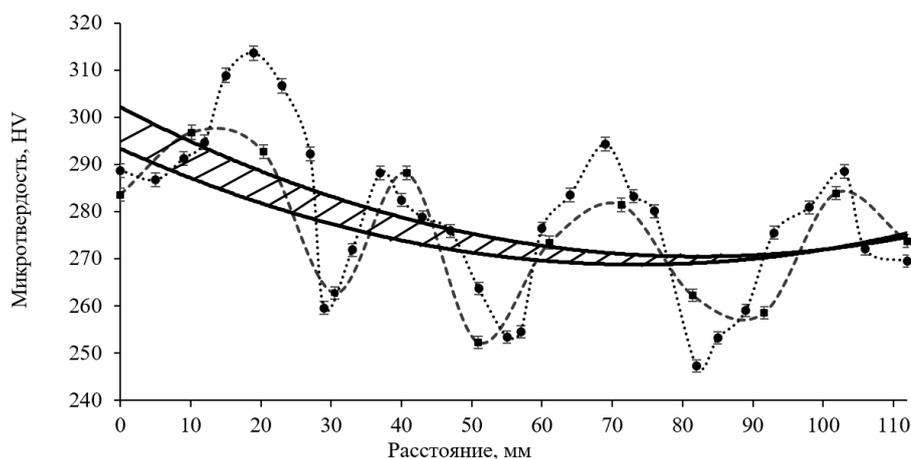


Рис. 5. Зависимость микротвердости полученного материала от высоты SLM-заготовки

Fig. 5. Dependence of the microhardness of the obtained material on the height of the SLM work piece

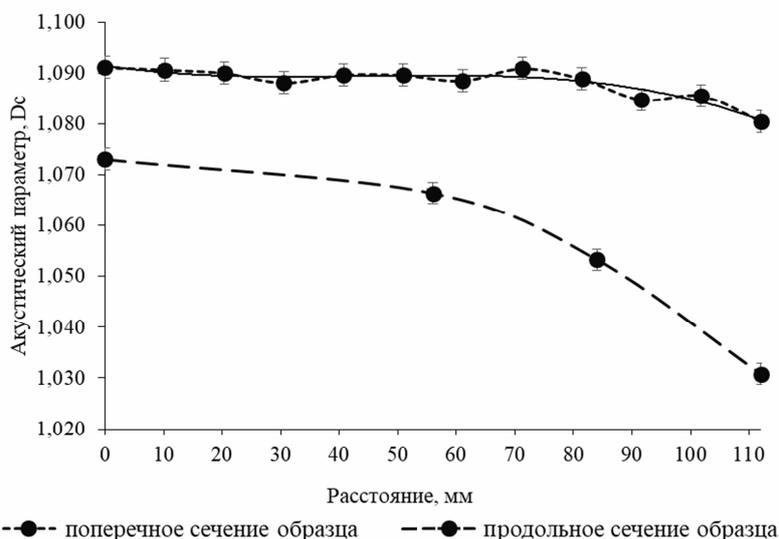


Рис. 6. Распределение акустического параметра D_C в продольном и поперечном сечениях образца

Fig. 6. Distribution of the acoustic parameter D_C in the longitudinal and cross sections of the sample

Выводы

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы.

1. Установлено, что в SLM-заготовке из сплава 12X18H10T при увеличении расстояния от подложки наблюдается снижение физико-механических характеристик материала. При этом плотность исследуемых образцов уменьшилась с 7,910 до 7,902 г/см³, а значения твердости изменились с 300 до 280 HV.

2. Анализ микроструктур в программном комплексе Thixomet Pro показал, что при увеличении расстояния от подложки сохраняется зависимость увеличения остаточной пористости в обоих сечениях: в поперечном – с 0,36 до 0,52 %, в продольном – с 0,68 до 0,73 %.

3. Выявлено монотонное снижение акустического параметра D_C по мере увеличения рас-

стояния от подложки: продольное сечение – с 1,073 до 1,030; поперечное – с 1,091 до 1,080. Данная зависимость связана со снижением плотности материала заготовки. Это подтверждается микроструктурными и пикнометрическими исследованиями.

4. Установлено, что акустический параметр D_C может быть использован для контроля остаточной пористости в материале заготовок, полученных методом SLM.

Библиографические ссылки

1. Kabaldin Y., Shatagin D., Ryabov D., Solovyov A., Kurkin A. (2023) Microstructure, Phase Composition, and Mechanical Properties of a Layered Bimetallic Composite ER70S-6 - ER309LSI Obtained by the WAAM Method. *Metals*, 2023, no. 13, p. 851.

2. Оганесян О. В., Бурлаченков О. В. Современные технологии, используемые на стадии производства, применительно к различным фазам жизненного цикла изделий и деталей машин // *Транспортное машиностроение*. 2023. № 03. С. 21–29. DOI: 10.30987/2782-5957-2023-3-21-29
3. Рихарев М. Цифровая аддитивная линейка // *Аддитивные технологии*. 2020. № 3. С. 18–26.
4. Финогеев Д. Ю., Решетникова О. П. Аддитивные технологии в современном производстве деталей точного машиностроения // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2020. № 3 (86). С. 63–71.
5. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий / А. А. Осколков, Е. В. Матвеев, И. И. Безукладников, Д. Н. Трушников, Е. Л. Кротова // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2018. Т. 20, № 3. С. 90–104.
6. Киричек А. В. Аддитивно-субтрактивные технологии – эффективный переход к инновационному производству / А. В. Киричек, О. Н. Федонин, Д. Л. Соловьев, А. А. Жирков, А. В. Хандожко, Е. В. Смоленцев // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2019. № 8. С. 4–10.
7. Какорин Д. Д., Лаврентьев А. Ю. Способы послойного синтеза металлических изделий // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2021. № 3 (11). С. 24–33.
8. Григорьянц А. Г., Лутченко А. В. Современные проблемы развития аддитивных технологий в машиностроении // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2022. № 8 (134). С. 27–30.
9. Особенности материалов и технологий аддитивного производства изделий / А. Н. Кубанова, А. Н. Сергеев, Н. М. Добровольский, А. Е. Гвоздев, П. Н. Медведев, Д. В. Малий // *Чебышевский сборник*. 2019. Т. 20, вып. 3. С. 453–477.
10. Карпенко Н. Р., Попов И. С. Аддитивные технологии как прогрессивный метод современного производства // *Наука молодых – будущее России*. 2018. Т. 6. С. 58–64.
11. Дектярев А. В., Морозов В. Н., Яфасов А. Я. Аддитивные технологии в судостроении: тенденции и правовое регулирование // *Морские интеллектуальные технологии*. 2019. № 4-4 (46). С. 38–49.
12. Определение геометрической точности и шероховатости поверхности малогабаритных деталей круглого и квадратного сечения, получаемых в зависимости от расположения в рабочем пространстве принтера по технологии селективного лазерного плавления из стали марки 12X18H10T / И. В. Горбатов, Ю. А. Орлов, В. А. Антюфеев, Т. В. Тельгереева, Н. Ю. Орлова // *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»*. 2019. № 1 (28). С. 59–67.
13. Ильиных А. В. Механические свойства стали 12X18H10T, полученной методом селективного лазерного плавления // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. 2018. № 55. С. 103–109.
14. Современные проблемы моделирования теплопереноса в технологических процессах селективного лазерного спекания и сплавления / С. И. Жаворонок, А. С. Курбатов, Л. Н. Рабинский, Ю. О. Соляев // *Теплофизика высоких температур*. 2019. Т. 57, № 6. С. 919–952.
15. Формирование структуры и свойств стали 04X18H9 при аддитивном производстве заготовок / Ю. Д. Щицын, С. А. Терентьев, С. Д. Неулыбин, А. О. Артемов, Д. С. Белинин // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2018. Т. 20, № 3. С. 55–62.
16. Исследование микроструктуры и свойств коррозионностойкой стали системы Fe–Cr–Ni, полученной методом селективного лазерного сплавления / И. А. Богачев, Е. А. Сульянова, Д. И. Сухов, П. Б. Мазалов // *Труды ВИАМ. Жаропрочные сплавы и стали*. 2019. № 3 (75). С. 3–13.
17. Структура и свойства коррозионностойкой стали, полученной селективным лазерным плавлением / А. А. Сметкин, С. А. Оглезнева, К. В. Калинин, Э. Ф. Ханипов // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2019. № 1. С. 91–97.
18. Структура и механические свойства аустенитной нержавеющей стали, полученной методом селективного лазерного плавления // В. И. Зельдович, И. В. Хомская, Н. Ю. Фролова, А. Э. Хейфец, Д. Н. Абдуллина, Е. А. Петухов, Е. Б. Смирнов, Е. В. Шорохов, А. И. Клёнов, А. А. Пильщиков // *Физика металлов и материаловедение*. 2021. Т. 122, № 5. С. 527–534.
19. Отработка эффективного режима сплавления металлопорошковой композиции ПР-12X18H10T / А. Б. Мазалов, Д. Е. Силотин, Л. С. Зеленина, Е. П. Ендальцев // *Воронежский научно-технический вестник*. 2022. Т. 4, № 4 (38). С. 21–28.
20. Khlybov A.A., Pichkov S.N., Shishulin D.N. (2019) Developing an Acoustic Method for Determining the Degree of Hydrogenation in Structures Made of Titanium Alloys. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 55, no. 4, pp. 255-261. DOI: 10.1134/S1061830919040090

References

1. Kabaldin Y., Shatagin D., Ryabov D., Solovyov A., Kurkin A. (2023) Microstructure, Phase Composition, and Mechanical Properties of a Layered Bimetallic Composite ER70S-6 - ER309LSI Obtained by the WAAM Method. *Metals*, 2023, no. 13, p. 851.
2. Oganesyanyan O.V., Burlachenkov O.V. (2023) [Modern technologies used at the production stage, applied to various phases of the life cycle of products and machine parts]. *Transportnoye mashinostroyeniye*, no. 03, pp. 21-29 (in Russ.). DOI: 10.30987/2782-5957-2023-3-21-29
3. Rikharev M. (2020) [Digital additive ruler]. *Additivnyye tekhnologii*, no. 3, pp. 18-26 (in Russ.).

4. Finogeyev D.Yu., Reshetnikova O.P. (2020) [Additive technologies in modern production of precision engineering parts]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, no. 3 (86), pp. 63-71 (in Russ.).
5. Oskolkov A.A., Matveyev E.V., Bezukladnikov I.I., Trushnikov D.N., Krotova E.L. (2018) [Advanced metal additive manufacturing technology]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeniye, materialovedeniye*, vol. 20, no. 3, pp. 90-104 (in Russ.).
6. Kirichek A.V., Fedonin O.N., Solov'yev D.L., Zhirkov A.A., Khandozhko A.V., Smolentsev E.V. (2019) [Additive-subtractive technologies - an effective transition to innovative production]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, no. 8, pp. 4-10 (in Russ.).
7. Kakorin D.D., Lavrent'yev A.Yu. (2021) [Methods of layer-by-layer synthesis of metal products]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Series: Technical Sciences*, no. 3 (11), pp. 24-33 (in Russ.).
8. Grigoryants A.G., Lutchenko A.V. (2022) [Modern problems of development of additive technologies in mechanical engineering]. *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii*, no. 8 (134), pp. 27-30 (in Russ.).
9. Kubanova A.N., Sergeev A.N., Dobrovolskiy N.M., Gvozdev A.E., Medvedev P.N., Maliy D.V. (2019) [Features of materials and technologies for additive manufacturing of products]. *Chebyshevskiy sbornik*, vol. 20, iss. 3, pp. 453-477 (in Russ.).
10. Karpenko N.R., Popov I.S. (2018) [Additive technologies as a progressive method of modern production]. *Nauka molodykh - budushcheye Rossii*, vol. 6, pp. 58-64 (in Russ.).
11. Dektyarev A.V., Morozov V.N., Yafasov A.Ya. (2019) [Additive technologies in shipbuilding: trends and legal regulation]. *Morskiye intellektual'nyye tekhnologii*, no. 4-4 (46), pp. 38-49 (in Russ.).
12. Gorbatov I.V., Orlov Yu.A., Antyufeyev V.A., Telgerekova T.V., Orlova N.Yu. (2019) [Determination of geometric accuracy and surface roughness of small-sized parts of round and square cross-section, obtained depending on their location in the working space of the printer using selective laser melting technology from steel grade 12Cr18Ni10Ti]. *Vestnik Kontserna VKO "Almaz - Antey"*, no. 1 (28), pp. 59-67 (in Russ.).
13. Ilinykh A.V. (2018) [Mechanical properties of steel 12Cr18Ni10Ti, obtained by selective laser alloying]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*, no. 55, pp. 103-109 (in Russ.).
14. Zhavoronok S.I., Kurbatov A.S., Rabinskiy L.N., Solyayev Yu.O. (2019) [Modern problems of modeling heat transfer in technological processes of selective laser sintering and alloying]. *Teplofizika vysokikh temperature*, vol. 57, no. 6, pp. 919-952 (in Russ.).
15. Shchitsyn Yu.D., Terentyev S.A., Neulybin S.D., Artemov A.O., Belinin D.S. (2018) [Formation of the structure and properties of steel 04Cr18Ni9 during additive manufacturing of blanks]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeniye, materialovedeniye*, vol. 20, no. 3, pp. 55-62 (in Russ.).
16. Bogachev I.A., Sil'janova E.A., Sukhov D.I., Mazalov P.B. (2019) [Study of the microstructure and properties of corrosion-resistant steel of the Fe-Cr-Ni system obtained by selective laser alloying]. *Trudy VLAM. Zharoprochnyye splavy i stali*, no. 3 (75), pp. 3-13 (in Russ.).
17. Smetkin A.A., Oglezneva S.A., Kalinin K.V., Khanipov E.F. (2019) [Structure and properties of corrosion-resistant steel obtained by selective laser melting]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*, no. 1, pp. 91-97 (in Russ.).
18. Zeldovich V.I., Khomskaya I.V., Frolova N.Yu., Kheyfets A.E., Abdullina D.N., Petukhov E.A., Smirnov E.B., Shorokhov E.V., Klenov A.I., Pil'shchikov A.A. (2021) [Structure and mechanical properties of austenitic stainless steel produced by selective laser melting]. *Fizika metallov i metallovedeniye*, vol. 122, no. 5, pp. 527-534 (in Russ.).
19. Mazalov A.B., Silyutin D.E., Zelenina L.S., Endaltsev E.P. (2022) [Working out the effective mode of fusion of metal powder composition PR-12Cr18Ni10Ti]. *Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskij vestnik*, vol. 4, no. 4 (38), pp. 21-28 (in Russ.).
20. Khlybov A.A., Pichkov S.N., Shishulin D.N. (2019) Developing an Acoustic Method for Determining the Degree of Hydrogenation in Structures Made of Titanium Alloys. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 55, no. 4, pp. 255-261. DOI: 10.1134/S1061830919040090

Study of the Effect of Selective Laser Melting Parameters on the Structure and Physico-Mechanical Properties of a Blank Made of Stainless Chromium-Nickel Steel

A.A. Khlybov, DSc in Engineering, Professor, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

D.A. Ryabov, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Solov'ev, Student, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Shuyanov, Student, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

A.V. Lukoyanov, OAO I. I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering, Nizhny Novgorod, Russia

Currently, there are a number of additive technologies that are used in various industries (laser fusion of powder materials, electron beam melting, etc.). The formation of metal structures and products by methods of additive technologies occurs by adding a new layer of material and its further melting (sintering), ensuring the adhesion of each subsequent layer with the previous one in accordance with digital model data. The advantages of using and developing additive technologies include the possibility of using a wide range of materials, obtaining finished products with complex geometries, restoring and repairing damaged structures, as well as the possibility of applying protective and anticorrosive coatings.

Metal powder materials with specified physical and mechanical properties are of crucial importance in additive manufacturing. The main requirements for such powders include requirements for their shape and size. The preferred particle shape is spherical, as it provides a more compact installation in a given volume and the necessary fluidity of the material, which is due to the low resistance in the supply systems of powder materials in 3D printers.

The aim of the work is to study the influence of the parameters of the SLM printing process on the structure and mechanical properties of products made of 12Cr18Ni10Ti alloy.

Samples obtained by selective laser melting were subjected to pycnometric and metallographic analysis. Based on the obtained microstructure images, a digital porosity analysis of the work piece under study was performed in the Thixomet Pro software package. The microhardness and acoustic characteristics were also measured over the entire section of the work piece under study. It was revealed that with an increase in the distance from the substrate (0...112 mm) in the transverse and longitudinal sections, the tendency remains to decrease the density values and increase the volume fraction of pores. It is shown that the acoustic parameter D_c can be used to control changes in the physical and mechanical properties of stainless chromium-nickel steel blanks obtained by selective laser melting.

Keywords: additive technologies, selective laser melting, stainless chromium-nickel steels, porosity, microstructure, acoustic control.

Получено 10.11.2023

Образец цитирования

Исследование влияния параметров селективного лазерного плавления на структуру и физико-механические свойства заготовки из нержавеющей хромоникелевой стали / А. А. Хлыбов, Д. А. Рябов, А. А. Соловьев, А. А. Шуянова, А. В. Лукоянов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 4. С. 33–41. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-4-33-41

For Citation

Khlybov A.A., Ryabov D.A., Solovjev A.A., Shuyanova A.A., Lukoyanov A.V. (2023) [Study of the Effect of Selective Laser Melting Parameters on the Structure and Physico-Mechanical Properties of a Blank Made of Stainless Chromium-Nickel Steel]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2023, vol. 26, no. 4, pp. 33-41 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2023-4-33-41