

Исследование структуры и свойств Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods of research
and monitoring**

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-1-1-29-35

УДК (UDC) 621.9.048.7

НАПРАВЛЕННАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 316L МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО НАНЕСЕНИЯ МЕТАЛЛА¹

© **Андрей Игоревич Горунов**

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ, г. Казань, Россия;
e-mail: gorunow.andrej@yandex.ru

Статья поступила 23 мая 2017 г.

Показаны преимущества метода прямого лазерного нанесения металла, обеспечивающего направленную кристаллизацию образцов из нержавеющей стали 316L. Установлено, что метод открывает широкие возможности для получения монокристаллических структур путем направленной кристаллизации наплавляемого металла. Структура металла получаемых образцов представлена дендритными кристаллами, ориентированными в направлении теплового центра. В поперечном сечении структура, образованная осями кристаллов первого порядка, имеет вид сот. Толщина наносимого слоя (200 мкм) в центральной части образца не препятствует развитию дендритной структуры и способствует формированию монокристаллических структур (с отсутствием пор и трещин). Отмечено, что направление роста дендритным кристаллам задает тепловой центр, определяемый положением лазерного пятна. Представлена методика получения изделий из нержавеющей стали с использованием технологии прямого лазерного нанесения по разработанному алгоритму, позволяющему контролировать перемещение роботизированного комплекса и образца, включение лазера и подачу газопорошковой смеси. Показаны возможности определения угла наклона дендритных кристаллов в металле относительно оси симметрии образца с помощью металлографического программного комплекса анализа цифровых изображений микроструктур, а также контроля качества получаемых изделий с помощью рентгеновской томографии, подбора параметров лазерного пятна на поверхности подложки при высокоскоростной съемке, оценки фазового состава наплавленного металла методом рентгеноструктурного анализа. При этом шероховатость образцов, определяемую размером порошковых частиц, можно устранить механической обработкой.

Ключевые слова: аддитивное производство; лазерная наплавка; нержавеющая сталь; микроструктура; твердость.

DIRECTIONAL CRYSTALLIZATION OF 316L STAINLESS STEEL SPECIMENS BY DIRECT LASER CLADDING

© **Andrey I. Gorunov**

Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia; e-mail: gorunow.andrej@yandex.ru

Submitted May 23, 2017.

Advantages of direct laser cladding of metal consisting in the possibility of directional crystallization of 316L stainless steel samples are shown. Direct laser cladding of metal offers exciting possibilities for

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ (задание № 9.3236.2017/4.6).

production of single crystal structures by directional crystallization of the deposited metal. The growth direction of dendritic crystals is driven by the thermal center determined by the position of the laser spot. We present a technique of manufacturing stainless steel products by direct laser deposition using the developed algorithm which allowed us to connect the movement of the robotic cell and turntable with a sample, laser switching and feeding of the gas powder mixture. The possibility of x-ray tomographic quality control of the obtained products, determination of the parameters of the laser spot on the substrate surface using high-speed photography, estimation of the phase composition of the deposited metal using x-ray diffraction analysis is demonstrated. The structure of obtained metal samples is represented by dendritic crystals oriented in the direction of the thermal center. The sample structure in the sample cross section is represented in the form of a honeycomb formed by the first order axes of dendritic crystals. It is shown that 200- μm thickness of the deposited layer in the central part of the sample does not interfere with the development of the dendritic structure and promotes the possibility of obtaining single-crystal structures free of pores and cracks. The possibility of estimating the inclination angle of dendritic crystals in the metal relative to the symmetry axis of the sample using a metallographic software package for analysis of digital images of the microstructures is shown. It is demonstrated that the roughness of the obtained samples is determined by the size of the powder particles and can be eliminated by the mechanical treatment.

Keywords: additive manufacturing; laser cladding; stainless steel; microstructure; hardness.

Изделия, получаемые аддитивным методом, активно внедряются в серийное производство, например, в таких отраслях, как машино- и самолетостроение [1, 2]. Однако, приобретая дорогостоящее оборудование для 3D печати, производители сталкиваются с тем, что стоимость расходных материалов может достигать трети от стоимости прибора, а технология для изготовления даже простой детали может в десятки раз превышать стоимость самого приобретаемого оборудования.

В настоящее время активно разрабатываются новые методы, алгоритмы и устройства для аддитивного производства порошковых материалов и изделий, не уступающих по скорости изготовления и качеству зарубежным аналогам. Объявленные на государственном уровне стратегические направления развития материалов включают разработку аддитивных технологий получения деталей, монокристаллических и естественных композитов, коррозионно-стойких свариваемых сплавов и сталей [3].

Одно из направлений, относящееся к аддитивным технологиям, — прямое лазерное нанесение металла [4 – 9]. Мощный лазерный луч разогревает порошковый материал, подаваемый в зону нанесения с помощью коаксиального сопла. Материал наносят в расплавленном состоянии, слой за слоем. Метод обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с традиционными способами литья и обработки металлов давлением: более высокую скорость изготовления изделий, отсутствие требований к технологической оснастке, возможность изготовления сложных форм [10 – 14].

Несмотря на то, что результаты отдельных исследований микроструктурных характеристик и микротвердости образцов из нержавеющей стали, сформированных методом лазерной наплавки, хорошо известны [15], потенциал технологии

применительно к аддитивному производству до конца не раскрыт. Вопросы, связанные с формированием монокристаллических структур в многослойных изделиях, а также алгоритм их получения методом прямого лазерного выращивания изучены достаточно слабо.

Цель работы — исследование закономерности формирования структуры и свойств изделий из нержавеющей стали, полученных методом прямого лазерного нанесения, и разработка рекомендаций по возможному использованию метода для создания монокристаллических структур.

Для получения изделий методом прямого лазерного нанесения использовали коаксиальное сопло, которое перемещали с помощью робота. Для оплавления порошкового материала (нержавеющая сталь марки 316Д, размер частиц — 45 – 100 мкм) применяли иттербиевый волоконный лазер (длина волны — 1070 нм). В качестве газа для транспортировки порошкового материала использовали аргон (расход — 3 л/мин, расход дополнительного газа для формирования газопорошкового потока — 5 л/мин). Лазерный луч фокусировали на поверхности подложки из среднеуглеродистой стали. При этом рабочее расстояние между соплом и подложкой оставалось постоянным и составляло 5 мм. Расход порошкового материала составлял 0,05 г/с. Химический состав исследуемой стали 316L следующий, % масс.: 18 Cr; 3 Mo; 14 Ni; 0,03 C; 2 Mn; 0,75 Si; 0,045 P; 0,03 S (основа — Fe).

Микротвердость измеряли с помощью автоматизированного твердомера Tukon 2500. Для формирования поля распределения микротвердости после автоматического нанесения отпечатков на поверхность шлифа использовали компьютерную программу Tixomet.

Измерения шероховатости и профиля поверхности покрытия выполняли с помощью профилографа-профилометра «Абрис-ПМ7».



Рис. 1. Компьютерная модель (а), соединительная муфта (б), полученная методом прямого лазерного нанесения, и цилиндрическая оболочка — образец для исследования (в)

Образцы перед анализом макро- и микро-структуры шлифовали алмазными шлифовальными дисками (120, 220 и 500 grit), затем полировали с использованием алмазных суспензий (9 и 3 мкм). Травление осуществляли в подготовленном реактиве азотной кислоты.

Для выявления в образцах пор и трещин применяли рентгеновский компьютерный томограф X5000 серии XView™. Микроструктуру образцов исследовали с помощью оптического микроскопа Axio Observer Dlm Carl Zeiss.

Рентгенофазовый анализ проводили с помощью многофункционального дифрактометра Rigaku SmartLab. Дифрактограммы регистрировали в геометрии Брэгга – Брентано при условии, что щели на первичном пучке составляли 10 мм (интервал сканирования — 10 – 90°, шаг сканирования — 0,02°, время съемки в точке — 5 с).

Видеорегистрацию процесса прямого лазерного нанесения осуществляли с помощью скоростной камеры NAC NX-4 Memrecam (частота кадров при съемке — 2000 кадров/с).

Прямое лазерное нанесение осуществляли в режиме, обеспечивающем стабильность выращивания цилиндрической оболочки (образца) — основы для конечного изделия (муфты). Стабильность режима достигалась тем, что наплавочное сопло поднимали при каждом последующем нанесении с шагом, соответствующим высоте одного слоя. По алгоритму, задаваемому программой [16], управляли манипуляциями робота, удерживающего коаксиальное сопло, подачей газопорошковой смеси, защитного газа и включением лазера.

Для получения изделия (соединительной муфты) из нержавеющей стали 316L методом прямого лазерного нанесения материала (рис. 1) трубчатые заготовки (образцы) механически обрабатывали и полировали (толщина стенки изделия составляла 1 – 1,2 мм).

На рис. 2 представлены профилограммы внешней и внутренней поверхностей заготов-



Рис. 2. Профилограммы внутренней (сплошная линия) и наружной (пунктир) поверхностей цилиндрической оболочки

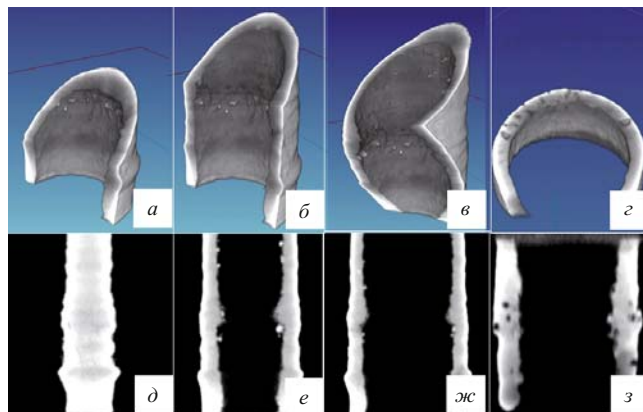


Рис. 3. Компьютерная модель (а – з) и рентгеновские снимки цилиндрических образцов (д – з) в различных сечениях

ки, выращенной методом прямого лазерного нанесения.

Установили, что шероховатости внутренних и наружных слоев близки (разброс между максимальным и минимальным значением не превышает 200 мкм) [21] и определяются в основном размером порошковых частиц, т.е. качество получаемой поверхности цилиндрических заготовок (образцов) достаточно низкое.

На рис. 3 представлены изображения заготовок в различных сечениях, полученные на рентгеновском томографе.

Недостаточная защита в газовой среде при расплавлении порошкового материала приводит к формированию высокой пористости. При длительном перегреве наплавляемого металла (случается при превышении мощности лазерного излучения 2 кВт) в поперечном сечении фиксировали образование крупных пор (см. рис. 3, з, з). Из-за нарушения стабильности газопорошкового потока наблюдали смещение образца вследствие растекания по поверхности подложки наплавляемого металла или его вскипания.

На рис. 4 представлена микроструктура образца в продольном и поперечном сечениях.

Видно, что в продольном сечении произошло формирование ориентированной дендритной структуры. Заметим, что рост дендритных кри-

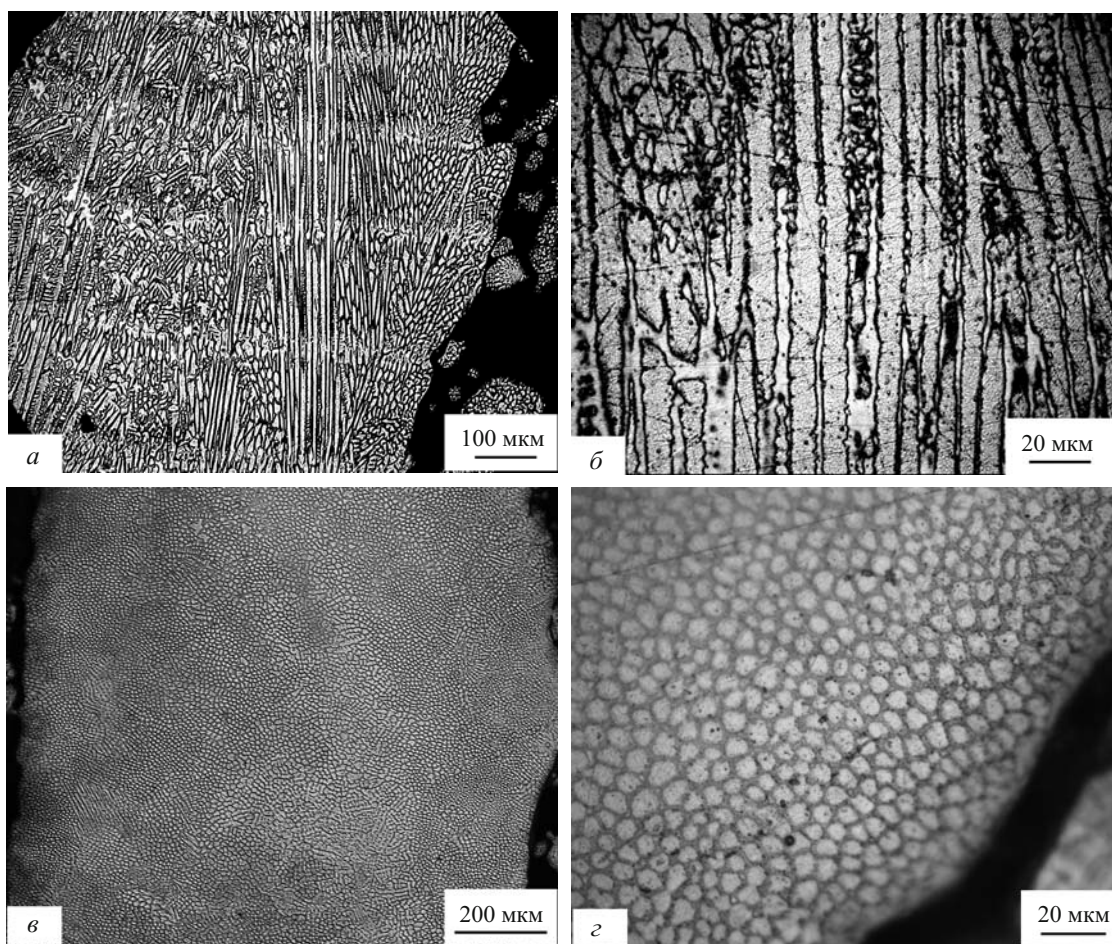


Рис. 4. Микроструктура в продольном (*а, б*) и поперечном (*в, г*) сечениях образца из стали 316L, полученного методом прямого лазерного нанесения

сталлов (см. рис. 4, *а*) не останавливается на границе слоев. Длина оси первого порядка составляет ~ 500 мкм при условии, что высота каждого нанесенного слоя — 100 – 150 мкм.

В поперечном сечении дендритные кристаллы представлены как высокодисперсная ячеистая (сотовая) структура, а оси первого порядка направлены перпендикулярно плоскости реза. При этом границы зерен не обнаруживаются и средний диаметр кристаллов составляет 5 – 15 мкм.

Лазерный луч разогревает порошковый материал вплоть до его полного расплавления. Скорость же кристаллизации настолько высока, что оси второго и третьего порядков не успевают развиваться.

При спекании порошкового материала 316L методом селективного лазерного плавления образующаяся в металле зернистая структура [17] должна способствовать остановке дислокаций в процессе пластической деформации. Различие в структуре для одного и того же материала (316L), полученного родственными методами селективного лазерного плавления и прямого лазерного

нанесения, можно объяснить разностью в плотности мощности лазерного излучения, фокусируемого на обрабатываемой поверхности, степени расплавления порошкового материала, скорости кристаллизации расплава, степени защиты ванны расплава в газовой среде и др.

На рис. 5 приведены изображения лазерного пятна, полученные с помощью высокоскоростной съемки в процессе прямого лазерного нанесения.

После включения лазера и начала движения сопла происходит формирование так называемого «хвостика», тянущегося вслед за пятном. Скорость перемещения лазерного пятна выбирали таким образом, чтобы минимизировать нарастание «хвостика». Этому достигали высокой скоростью движения сопла. Низкая скорость перемещения лазера создает условия для длительного нахождения наплавляемого металла выше температуры плавления, что ведет к его окислению и искривлению осей дендритных кристаллов.

По полученным дифрактограммам (рис. 6) видно, что в образце присутствует фаза γ -Fe с пространственной группой Fm-3m и параметрами решетки: $a = 3,6009$, $b = 3,6009$ и $c = 3,6009$ Å.

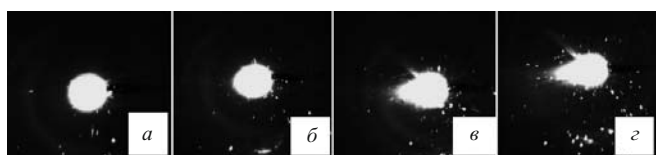


Рис. 5. Форма лазерного пятна, полученного с помощью высокоскоростной съемки в интервале 0,5 (а), 1 (б), 2 (в) и 4 с (г) после включения лазера и движения сопла

Дополнительных фаз, в том числе типа MeO и MeC, не выявлено либо процент их содержания незначителен.

Известно, что размер дендритных кристаллов ограничивается толщиной слоя металла в процессе прямого лазерного нанесения [18]. Это объясняется накоплением включений, образующих центры кристаллизации, на границах слоев, препятствующих продвижению ранее сформированных кристаллов.

Преимущество метода прямого лазерного нанесения — обдув зоны лазерной наплавки защитным газом. Это позволяет исключить, например, влияние выделяющихся в процессе наплавки паров оксидов железа [19]. В случае селективного лазерного плавления, которое проводят в закрытой камере 3D-принтера путем спекания лазером порошка, предварительно равномерно распределенного по поверхности подложки, напротив, дополнительный обдув зоны воздействия лазерного пятна на порошок невозможен, поскольку это нарушает стабильность спекания. Следовательно, для получения структуры, свободной от окислов железа, необходимо выращивание изделий методом прямого лазерного нанесения с интенсивным обдувом ванны расплава в среде защитного газа.

На рис. 7 представлена структура образцов в продольном сечении. Видно, что в центральной зоне преобладает ориентированная структура в направлении параллельном выращиванию об-

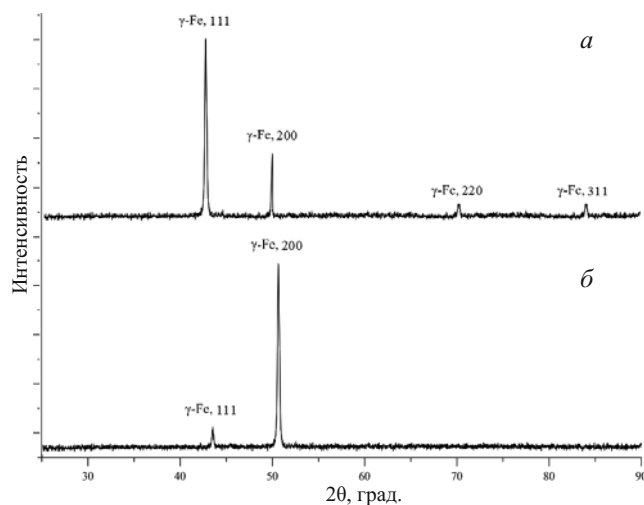


Рис. 6. Дифрактограммы образца с дифракционными пиками γ -Fe: а — исходный порошок; б — наплавленный металл

разца, а на краях наблюдается отклонение дендритных кристаллов на угол 45° относительно оси, параллельной направлению выращивания.

По цветовому полю, отражающему распределение микротвердости, рассчитанному по измеренным отпечаткам алмазной пирамидки (рис. 8), видно, что на краях образца твердость наплавленного металла растет, а по мере продвижения вглубь снижается. Краевое повышение связано с тем, что скорость охлаждения на поверхности образца достигает максимального значения и наружные слои металла в большей степени подвержены влиянию атмосферы воздуха по сравнению с центральной зоной. Можно предположить, что дополнительный нагрев, плавное охлаждение и защита всего образца в защитной газовой камере позволят гомогенизировать свойства в его сечении.

Далее оценивали потенциальный предел прочности образцов по их твердости [20]: $\sigma_b =$

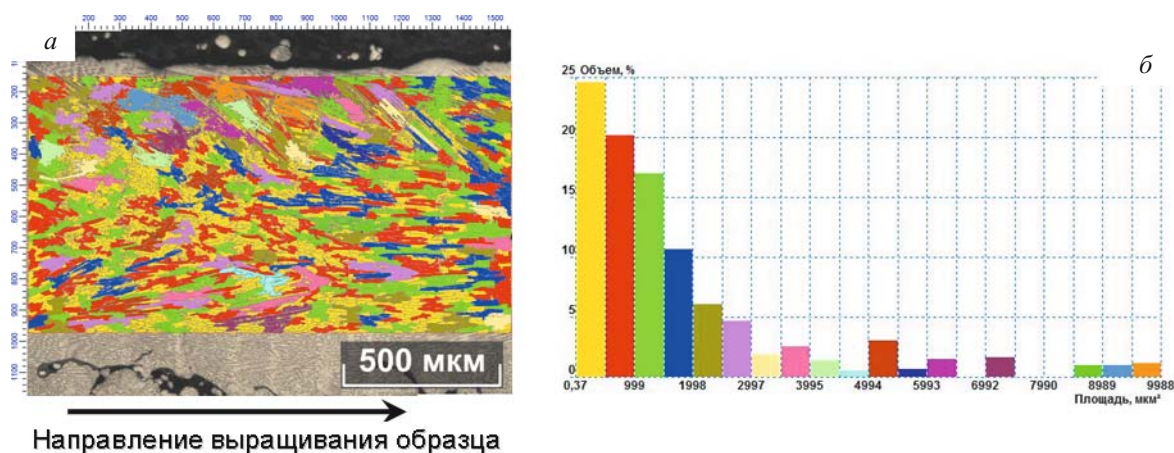


Рис. 7. Структура металла образца в продольном сечении (а), количественная оценка структурных составляющих (б)

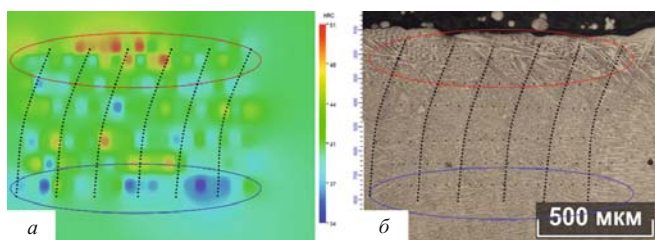


Рис. 8. Распределение микротвердости в продольном сечении образца (а) и измеряемых отпечатков (б) (черные пунктирные линии — границы слоев, синий и красный овалы — области пониженной и повышенной твердости соответственно)

$= kHV$ (k — коэффициент, определяемый экспериментально). Согласно полученным данным по распределению твердости в продольном сечении образца и с учетом механической обработки в конечном изделии твердость металла составляет $\sim 322 HV_{0,1}$ ($\sim 315 HB$). Для исследуемой стали $k = 3,6$ при $HB > 175$. Следовательно, расчетный предел прочности $\sigma_b = 1134$ МПа (не уступает свойствам нержавеющей сталей, изготовленных по традиционным технологиям производства).

Таким образом, для формирования столбчатых монокристаллических структур путем направленной кристаллизации необходим значительный температурный градиент, который можно задать положением и параметрами лазерного пятна. Нанесение первого слоя на холодную подложку определяет положение и ориентировку центров кристаллизации в металле. Лазерное нанесение каждого следующего слоя способствует росту сформированных ранее кристаллов (они будут продолжать свой рост по наиболее энергетически выгодному направлению, пробиваясь от слоя к слою). Наносимые слои должны быть по возможности минимальными, так как смещение теплового центра ведет к искривлению кристаллов (в нашем случае толщина слоя не превышала 200 мкм). После каждого нанесения необходима полировка слоя. Это позволит устранить с поверхности образующийся шлак и оксиды, которые могут оказать негативное влияние и создать дополнительный барьер для формирования монокристаллических структур. Вместе с тем существует риск того, что тугоплавкие оксиды образуют большое количество центров кристаллизации. А поскольку наружные слои начинают кристаллизоваться в первую очередь, то можно предположить, что скорость зародышеобразования превысит скорость роста кристаллов, в результате чего сформируется прослойка различно ориентированных кристаллов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Аддитивные технологии — доминанта национальной технологической инициативы / Интеллект & Технологии. 2015. № 2(11). С. 52 – 55.
2. Григорьев С. Н., Смуров И. Ю. Перспективы развития инновационного аддитивного производства в России и за рубежом / Инновации. 2013. № 10. С. 76 – 82.
3. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года / Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7 – 17.
4. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 664 с.
5. Турчин Г., Земляков Е., Поздеева Е., Туоминен Я. Технологические возможности лазерной наплавки с использованием мощных волоконных лазеров / Металловедение и термическая обработка металлов. 2012. № 3. С. 35 – 40.
6. Горынин И. В., Орыщенко А. С., Мальшевский В. А., Фармаковский Б. В., Кузнецов П. А. Аддитивные технологии на базе композиционных наноматериалов / Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 10(712). С. 4 – 8.
7. Sova A., Grigoriev S., Okunkova A., Smurov I. Cold spray deposition of 316L stainless steel coatings on aluminium surface with following laser post-treatment / Surface and Coatings Technology. 2013. Vol. 235. P. 283 – 289.
8. Горунов А. И. Создание покрытий и объемных изделий из материала на основе никеля методом аддитивной лазерной обработки / Металлы. 2016. № 1. С. 101 – 105.
9. Gorunov A. I., Gilmutdinov A. Kh. Study of the effect of heat treatment on the structure and properties of the specimens obtained by the method of direct metal deposition / The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Vol. 86. Issue 9. P. 2567 – 2574.
10. Luo K., Jing X., Sheng J., Sun G., Yan Z., Lu J. Characterization and analyses on micro-hardness, residual stress and microstructure in laser cladding coating of 316L stainless steel subjected to massive LSP treatment / Journal of Alloys and Compounds. 2016. Vol. 673(15). P. 158 – 169.
11. Gorunov A. I., Gilmutdinov A. Kh. Investigation of coatings of austenitic steels produced by supersonic laser deposition / Optics & Laser Technology. 2017. Vol. 88. P. 157 – 160.
12. Peng G., Bin Z., Chuanzhen H., Huabing G. Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition / Journal of Materials Processing Technology. 2017. Vol. 240. P. 12 – 22.
13. Кузнецов П. А., Зисман А. А., Петров С. Н., Гончаров И. С. Структура и механические свойства аустенитной стали 316L, полученной методом селективного лазерного сплавления / Деформация и разрушение материалов. 2016. № 4. С. 9 – 13.
14. Di W., Changhui S., Yongqiang Y., Yuchao B. Investigation of crystal growth mechanism during selective laser melting and mechanical property characterization of 316L stainless steel parts / Materials and Design. 2016. Vol. 100. P. 291 – 299.
15. Mingming M., Zemin W., Dengzhi W., Xiaoyan Z. Control of shape and performance for direct laser fabrication of precision large-scale metal parts with 316L Stainless Steel / Optics & Laser Technology. 2013. Vol. 45. P. 209 – 216.
16. А. с. 2016660262 RU. Программа управления процессом выращивания металлических изделий аддитивным методом на установке лазерной наплавки / Горунов А. И.; правообладатель Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ (КНИТУ-КАИ). — № 2016617644; заявл. 09.09.2016; опубл. 20.10.2016.
17. Грязнов М. Ю., Шотин С. В., Чувильдеев В. Н. Эффект мезоструктурного упрочнения стали 316L при послойном лазерном сплавлении / Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2012. № 5(1). С. 45 – 50.
18. Горунов А. И. Изучение влияния термической обработки на структуру и свойства образцов, получаемых методом прямого лазерного нанесения / Цветные металлы. 2016. № 5(881). С. 69 – 74.

19. **Yang L., Yongqiang Y., Shuzhen M., Di W., Changhui S.** Investigation into spatter behavior during selective laser melting of AISI 316L stainless steel powder / *Materials and Design*. 2015. Vol. 87. P. 797 – 806.
20. **Горунов А. И.** Исследование структуры и механических свойств покрытия из коррозионно-стойкой стали, сформированного методом газодинамического напыления с активацией процесса лазерным излучением / *Деформация и разрушение материалов*. 2016. № 9. С. 2 – 7.
21. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. — М.: Стандартинформ, 2006. — 7 с.

REFERENCES

1. **Kablov E. N.** Additive technologies — the dominant of the national technological initiative / *Intellect Tekhnol.* 2015. N 2(11). P. 52 – 55 [in Russian].
2. **Grigor'ev S. N., Smurov I. Yu.** Prospects for the development of innovative additive production in Russia and abroad / *Innovatsii*. 2013. N 10. P. 76 – 82 [in Russian].
3. **Kablov E. N.** Strategic directions of development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030 / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2012. N 5. P. 7 – 17 [in Russian].
4. **Grigor'yants A. G., Shiganov I. N., Misyurov A. I.** Technological processes of laser processing. — Moscow: Izd. MGTU im. N. É. Baumana, 2006. — 664 p. [in Russian].
5. **Turichin G., Zemlyakov E., Pozdeeva E., Tuominen Ya.** Technological possibilities of laser surfacing using high-power fiber lasers / *Metalloved. Termich. Obrab. Met.* 2012. N 3. P. 35 – 40 [in Russian].
6. **Gorynin I. V., Oryshchenko A. S., Malyshevskii V. A., Farmakovskii B. V., Kuznetsov P. A.** Additive technologies on the basis of composite nanomaterials / *Metalloved. Termich. Obrab. Met.* 2014. N 10(712). P. 4 – 8 [in Russian].
7. **Sova A., Grigoriev S., Okunkova A., Smurov I.** Cold spray deposition of 316L stainless steel coatings on aluminium surface with following laser post-treatment / *Surface and Coatings Technology*. 2013. Vol. 235. P. 283 – 289.
8. **Gorunov A. I.** Creation of coatings and bulk products from a nickel-based material by the method of additive laser treatment / *Metally*. 2016. N 1. P. 101 – 105 [in Russian].
9. **Gorunov A. I., Gilmutdinov A. Kh.** Study of the effect of heat treatment on the structure and properties of the specimens obtained by the method of direct metal deposition / *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 86. Issue 9. P. 2567 – 2574.
10. **Luo K., Jing X., Sheng J., Sun G., Yan Z., Lu J.** Characterization and analyses on micro-hardness, residual stress and microstructure in laser cladding coating of 316L stainless steel subjected to massive LSP treatment / *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. Vol. 673(15). P. 158 – 169.
11. **Gorunov A. I., Gilmutdinov A. Kh.** Investigation of coatings of austenitic steels produced by supersonic laser deposition / *Optics & Laser Technology*. 2017. Vol. 88. P. 157 – 160.
12. **Peng G., Bin Z., Chuazhen H., Huabing G.** Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition / *Journal of Materials Processing Technology*. 2017. Vol. 240. P. 12 – 22.
13. **Kuznetsov P. A., Zisman A. A., Petrov S. N., Goncharov I. S.** Structure and mechanical properties of 316L austenitic steel obtained by selective laser fusion / *Deform. Razrush. Mater.* 2016. N 4. P. 9 – 13 [in Russian].
14. **Di W., Changhui S., Yongqiang Y., Yuchao B.** Investigation of crystal growth mechanism during selective laser melting and mechanical property characterization of 316L stainless steel parts / *Materials and Design*. 2016. Vol. 100. P. 291 – 299.
15. **Mingming M., Zemin W., Dengzhi W., Xiaoyan Z.** Control of shape and performance for direct laser fabrication of precision large-scale metal parts with 316L Stainless Steel / *Optics & Laser Technology*. 2013. Vol. 45. P. 209 – 216.
16. A. s. 2016660262 RU. Program for controlling the process of growing metal products by an additive method in a laser welding setup / Gorunov A. I.; owner KAI (KNITU — KAI). — N 2016617644; appl. 09.09.2016; publ. 20.10.2016 [in Russian].
17. **Gryaznov M. Yu., Shotin S. V., Chuvil'deev V. N.** The effect of mesostructural hardening of 316L steel with layer-by-layer laser fusion / *Vestn. Nizhegorod. Univ. im. N. I. Lobachevskogo*. 2012. N 5(1). P. 45 – 50 [in Russian].
18. **Gorunov A. I.** Study of the influence of heat treatment on the structure and properties of samples obtained by direct laser deposition / *Tsvet. Met.* 2016. N 5(881). P. 69 – 74 [in Russian].
19. **Yang L., Yongqiang Y., Shuzhen M., Di W., Changhui S.** Investigation into spatter behavior during selective laser melting of AISI 316L stainless steel powder / *Materials and Design*. 2015. Vol. 87. P. 797 – 806.
20. **Gorunov A. I.** Investigation of the structure and mechanical properties of a coating made of corrosion-resistant steel formed by the method of gas-dynamic spraying with activation of the process by laser radiation / *Deform. Razrush. Mater.* 2016. N 9. P. 2 – 7 [in Russian].
21. RF State Standard GOST 2789–73. Surface roughness. Parameters and characteristics. — Moscow: Standartinform, 2006. — 7 p. [in Russian].