



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Анализ, моделирование и прогнозирование шероховатости поверхности меди, полученной методом селективного лазерного плавления

Наталья Сапрыкина^{1, а,*}

¹Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского Томского политехнического университета, ул. Ленинградская, 26, г. Юрга, 652055, Россия

^а <http://orcid.org/0000-0002-5874-8287>, nat_anat_sapr@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.7.044

История статьи:

Поступила: 27 апреля 2017
 Рецензирование: 25 июля 2017
 Принята к печати: 02 августа 2017
 Доступно онлайн: 15 сентября 2017

Ключевые слова:

Селективное лазерное плавление
 Режимы плавления
 Коагуляция
 Шероховатость
 Порошковый материал
 Качество поверхности
 Качество внутреннего объема

АННОТАЦИЯ

В отличие от традиционных методов удаления материала технологии быстрого прототипирования направлены на создание сложных изделий путем последовательного добавления материала (материалов). К настоящему времени известно большое количество методов быстрого прототипирования, которые отличаются применяемым материалом и способом формообразования изделия. Инновационным является метод селективного лазерного плавления физической копии различных объектов из металлов, сплавов и металломагнитных композитных материалов для удовлетворения требований со стороны аэрокосмической, оборонной, автомобильной и биомедицинской промышленности. Важным направлением развития технологии селективного лазерного плавления является повышение качества формируемого изделия. Это является сложным многопараметрическим процессом, в котором можно выделить порядка 130 параметров, влияющих на конечный результат. В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния защитного газа аргона, механоактивации порошка и воздействия технологических режимов плавления: мощности лазерного излучения, скорости перемещения луча лазера, шага сканирования, предварительной температуры подогрева порошкового материала на шероховатость поверхности, полученной из медного порошкового материала методом селективного лазерного плавления. Эксперименты по плавлению медного порошка реализованы на установке послыйного лазерного плавления оригинальной конструкции, которая позволяет регулировать все технологические режимы плавления. Шероховатость поверхности определена на цифровом бесконтактном микроскопе Olympus LEXT OLS4100. Получена математическая зависимость шероховатости поверхностного слоя из медного порошка от технологических режимов плавления на основе теории планирования эксперимента и статической обработки результатов. Определены значимые параметры режима – мощность лазерного излучения, скорость перемещения луча лазера, шаг сканирования, влияющие на шероховатость слоя, а также пределы ее изменения с 480 до 725 мкм при увеличении мощности с 14 до 30 Вт, скорости перемещения луча лазера 1400 мм/мин, температуре подогрева порошка 114 °С, шаге сканирования 0,2 мм; с 750 до 480 мкм – при увеличении скорости перемещения луча лазера с 200 до 3000 мм/мин, мощности 22 Вт, температуре подогрева порошка 114 °С, шаге сканирования 0,2 мм. Увеличение шага сканирования с 0,1 до 0,3 мм приводит к уменьшению шероховатости с 740 до 525 мкм при скорости перемещения луча лазера 3000 мм/мин, мощности 30 Вт, температуре подогрева порошка 200 °С. Показано положительное влияние защитной атмосферы и механоактивации порошкового материала на качество поверхностного слоя.

Для цитирования: Сапрыкина Н.А. Анализ, моделирование и прогнозирование шероховатости поверхности меди, полученной методом селективного лазерного плавления // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 3 (76). – С. 6–16. – doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-6-16.

Введение

Первый коммерчески успешный метод аддитивного производства был разработан в 1987 году Карлом Декартом и использован для

изготовления моделей и прототипов [1]. В настоящее время аддитивные технологии являются самыми быстро развивающимися передовыми технологиями в мире. В отличие от традиционных методов удаления материала технологии быстрого прототипирования направлены на создание сложных изделий путем последовательного добавления материала (материалов). К настоящему времени известно большое количество методов быстрого прототипирования, которые отличаются

*Адрес для переписки

Сапрыкина Наталья Анатольевна, к.т.н., доцент
 Юргинский технологический институт (филиал)
 ул. Ленинградского, 26, 652055, г. Юрга, Кемеровская обл., Россия
 E-mail: nat_anat_sapr@mail.ru

ся применяемым материалом и способом формообразования изделия. Инновационным является метод селективного лазерного плавления физической копии различных объектов из металлов и сплавов на основе 3D CAD-модели. Объемное изделие создается путем послойного плавления лучом лазера порошкового материала в соответствии с контуром каждого сечения. В последние годы значительно улучшились микроструктурные и механические свойства деталей за счет улучшений условий лазерной обработки (повышение мощности лазера, уменьшение диаметра луча лазера, уменьшение толщины получаемого слоя и т. п.). Несмотря на значительный прогресс, технология селективного лазерного плавления по-прежнему сталкивается с проблемами качества поверхности [2, 3]. Получение поверхности хорошего качества является главным вопросом для предотвращения расслаивания, остаточных напряжений, преждевременного разрушения.

Обзор литературы показал, что мощность лазера и скорость сканирования часто представлены как основные параметры, влияющие на каче-

ство поверхности изделия, полученного методом селективного лазерного спекания [4]. Скорость сканирования, предположили Brecher и соавторы [5], является предпочтительной при назначении режимов плавления. Относительно низкая скорость позволяет обеспечить равномерное плавление порошкового материала, но в результате возникает проблема низкой производительности [6]. Ван и соавторы [7] анализировали влияние скорости и шага сканирования для достижения хорошего качества поверхности. Большое значение уделено влиянию стратегии сканирования. В работе [8] проведены исследования по оценке остаточных напряжений и деформаций при различных стратегиях сканирования для никель-хромового сплава Инконель 718. Описано, что максимальные напряжения вдоль осей X и Y наблюдались у образцов со стратегией сканирования по контуру при смещении к центру (рис. 1, з).

Значительные напряжения были образованы при горизонтальной стратегии сканирования (рис. 1, б). У всех образцов возникает напряжение вдоль осей X и Y между единичным слоем и

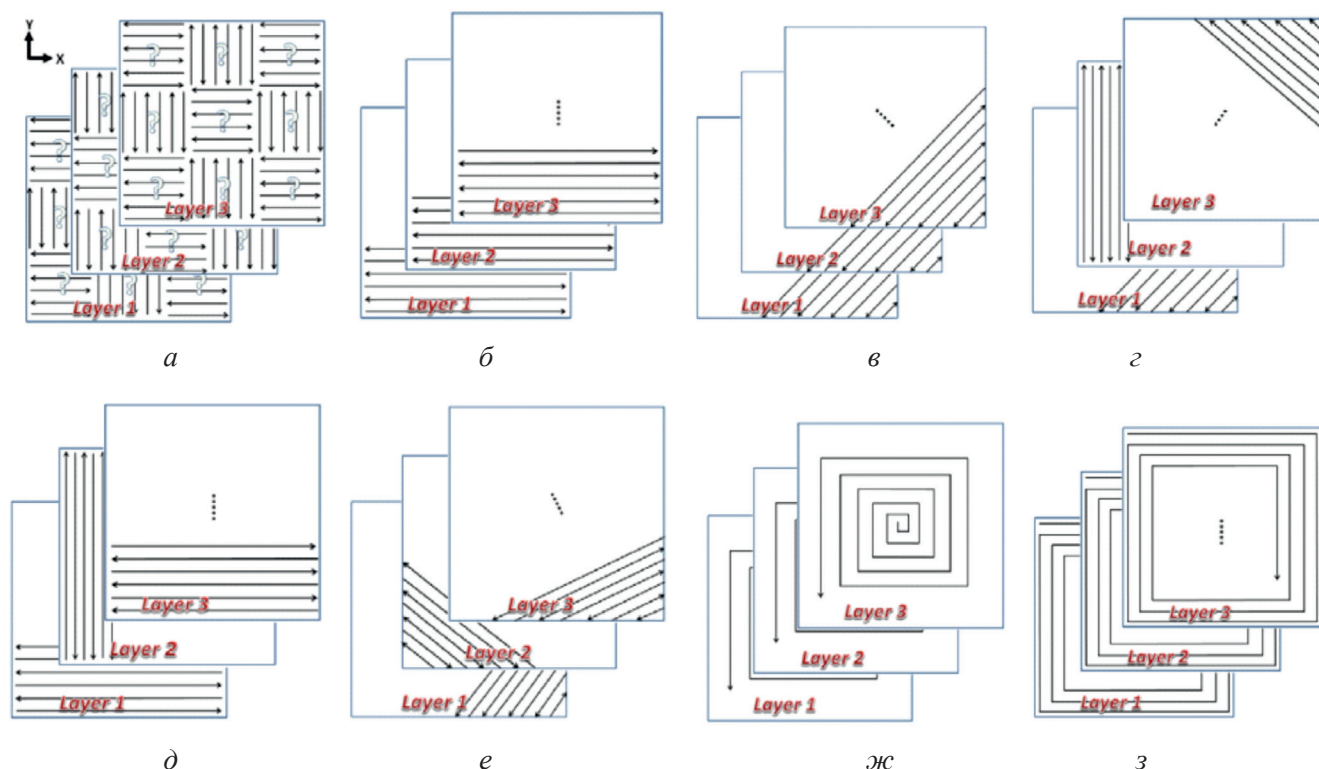


Рис. 1. Стратегии сканирования [8]:

a – островная; b – горизонтальная; $в$ – наклонная 45° ; $г$ – поворотная 45° ; $д$ – поворотная 90° ; $е$ – поворотная 67° ; $ж$ – по контуру из центра; $з$ – по контуру к центру

Fig. 1. Scanning strategies [8]:

a – island scanning; b – horizontal scanning; $в$ – lean scanning (45°); $г$ – rotating scanning (45°); $д$ – rotating scanning (90°); $е$ – rotating scanning (67°); $ж$ – by contour from the center; $з$ – by contour to the center

подложкой. Отмечено, что при наклонном сканировании под углом 45° у образцов наблюдались незначительные остаточные напряжения и деформации по сравнению с другими стратегиями сканирования (рис. 1, в) [8].

В работе [9] представлены исследования влияния мощности лазера, скорости сканирования, толщины слоя и стратегии сканирования на шероховатость поверхности никель-хром-железо-молибденового сплава HASTELLOY X, полученной методом селективного лазерного плавления. Отмечено, что на шероховатость поверхностного слоя большое влияние оказывает коагуляция. Коагуляцией называется слияние

мелких частиц порошка в более крупные под влиянием лазерного излучения. Наблюдалось снижение коагуляции при уменьшении скорости сканирования, которое обусловлено увеличением времени плавления порошка и снижением вязкости расплава. Увеличение шага сканирования приводит к увеличению шероховатости поверхности. Шероховатость поверхности имеет наименьшее значение 15 мкм при мощности лазера 200 Вт и скорости сканирования 3000 мм/с . Авторами предложено улучшать шероховатость наклонной поверхности за счет контурного сканирования каждого слоя с увеличенной плотностью энергии (рис. 2).

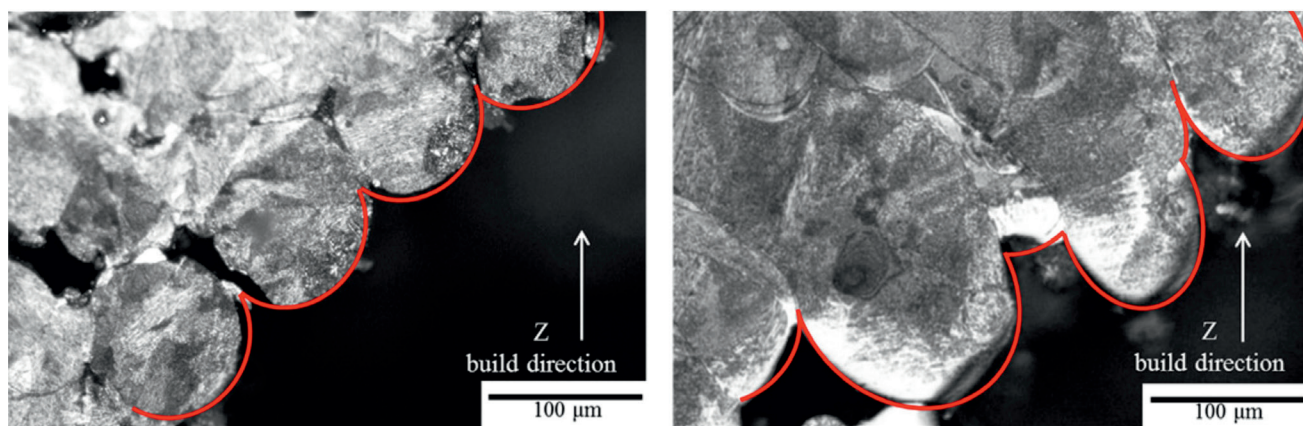


Рис. 2. Фотография наклонной поверхности из сплава HASTELLOY X, полученная на режимах:
а – мощность 200 Вт , скорость сканирования 3000 мм/с ; б – мощность 370 Вт , скорость сканирования 1900 мм/с [9]

Fig. 2. Images of the leaned surface of the alloy HASTELLOY X, obtained in the modes:
а – power 200 W , scanning speed 3000 мм/с ; б – power 370 W , scanning speed 1900 мм/с [9]

Анализ литературы показал, что режимы и условия плавления для разных материалов определяются экспериментально и зависят от значительного количества параметров [10, 11, 12]. Цель данной работы – установление пределов, в которых можно изменять шероховатость поверхностного слоя из медного порошка, полученного методом селективного лазерного плавления за счет изменения технологических режимов лазерной обработки.

Методика экспериментального исследования

Эксперименты по плавлению медного порошка реализованы на установке послойного лазерного плавления оригинальной конструкции, которая позволяет регулировать все технологические режимы плавления. Устройство яв-

ляется технологическим лазерным комплексом формирования поверхностей изделий сложной пространственной формы, состоящей из иттербиевого волоконного лазера ЛК – 100 – В, трехкоординатного стола, персонального компьютера, системы ЧПУ и оригинального программного обеспечения. Иттербиевый волоконный лазер с длиной волны $1,07 \text{ мкм}$ позволяют регулировать мощность от 10 до 100 Вт . Качество и точность изготавливаемых изделий обеспечивают постоянная мощность на выходе и точность фокусировки волоконного лазера. Управление лучом лазера с помощью специальной программы в рабочей зоне размером $100 \times 100 \times 100 \text{ мм}$ позволяет осуществлять сканирование по любому заданному контуру. На корпусе установки для нанесения слоя порошка в зону плавления закреплена каретка и выравнивающие ролики. Внутри каретки расположен бункер для порошка, позволяющий

регулировать плотность нанесенного слоя. Слой порошка сканируется лучом лазера по необходимой траектории на заданных режимах. После получения единичного слоя стол опускается с помощью шагового двигателя на толщину слоя [13]. С помощью каретки происходит заполнение платформы порошковым материалом для формирования следующего слоя. Цикл повторяется до полного создания изделия, затем стол перемещается в исходное положение и готовая деталь извлекается. Для исключения взаимодействия порошка с кислородом и азотом возможна подача в зону лазерного плавления защитного газа.

Порошок медный стабилизированный находит широкое применение в различных областях промышленности. Частицы порошка имеют сферическую форму с номинальным размером 0,007 мм, насыпной плотностью 1,25...1,9 г/см³. Шероховатость слоя определялась на микроскопе OLYMPUS LEXT OLS 4100.

В процессе эксперимента были изменены технологические режимы плавления: мощность лазерного излучения, скорость сканирования, шаг сканирования, температура подогрева порошковой композиции. Были проведены исследования по влиянию защитного газа аргона и механоактивации порошка на шероховатость поверхностного слоя из медного порошка, полученного методом селективного лазерного плавления. Защитная среда позволяет исключить взаимодействие порошковых изделий с кислородом и азотом, а также упрочнить поверхность изделия. Механоактивация применяется для увеличения дисперсности, дефектности кристаллической решетки порошка [14]. Механическая обработка порошка осуществлялась в центробежно-планетарной мельнице АГО-2.

Результаты и обсуждения

На первом этапе были проведены предварительные поисковые эксперименты для определения приемлемых режимов плавления. Под ними подразумевались режимы, когда единичный слой не рассыпался, т. е. обладал некоторой механической прочностью без значительной деформации. Эксперименты показали, что мощность лазера менее 14 Вт и скорость перемещения луча лазера более 3000 мм/мин являются недостаточными для плавления по-

рошкового материала. Мощность более 30 Вт и скорость менее 200 мм/мин приводит к интенсивному окислению и возгоранию порошка. Шаг сканирования более 0,3 мм не позволяет единичным трекам спечься между собой, что препятствует образованию единичного слоя. Увеличение температуры подогрева порошкового материала оказывает положительное влияние на прочность единичного слоя.

Для установления эмпирической зависимости шероховатости слоя из медного порошка от технологических режимов плавления был поставлен четырехфакторный эксперимент по программе центрального композиционного планирования второго порядка. Для этого реализовали шестнадцать опытов четырехфакторного эксперимента, провели семь опытов в центре плана и дополнили восьмью опытами в «звездных» точках. Для медного порошка были определены следующие диапазоны режимов плавления: мощность излучения $P = (14...30)$ Вт, скорость перемещения луча лазера $V = (200...3000)$ мм/мин, шаг сканирования $s = (0,1...0,3)$ мм; температура подогрева порошковой композиции изменялась в диапазоне $t = (26...200)$ °С. Шероховатость поверхности определяли на цифровом бесконтактном микроскопе Olympus LEXT OLS4100 (рис. 3).

На рис. 4–9 показано влияние технологических режимов и условий плавления на внешний вид поверхности единичного слоя из медного порошка, полученного методом селективного лазерного плавления.

Влияние мощности лазера на шероховатость поверхности единичного слоя показано на рис. 4. Увеличение мощности с 14 до 30 Вт при $V = 1600$ мм/мин, $s = 0,2$ мм приводит к изменению R_z с 480 до 725 мкм.

Влияние скорости перемещения луча лазера на шероховатость поверхности единичного слоя показано на рис. 5. Увеличение скорости с 200 до 3000 мм/мин при $P = 22$ Вт, $s = 0,2$ мм приводит к изменению R_z с 750 до 480 мкм. На рис. 5, а имеются участки равномерного плавления порошка.

Воздействие температуры подогрева порошкового материала на шероховатость поверхности единичного слоя показано на рис. 6. Увеличение температуры с 20 до 200 °С при $P = 30$ Вт, $V = 3000$ мм/мин, $s = 0,3$ мм приводит к изменению R_z с 540 до 525 мкм.

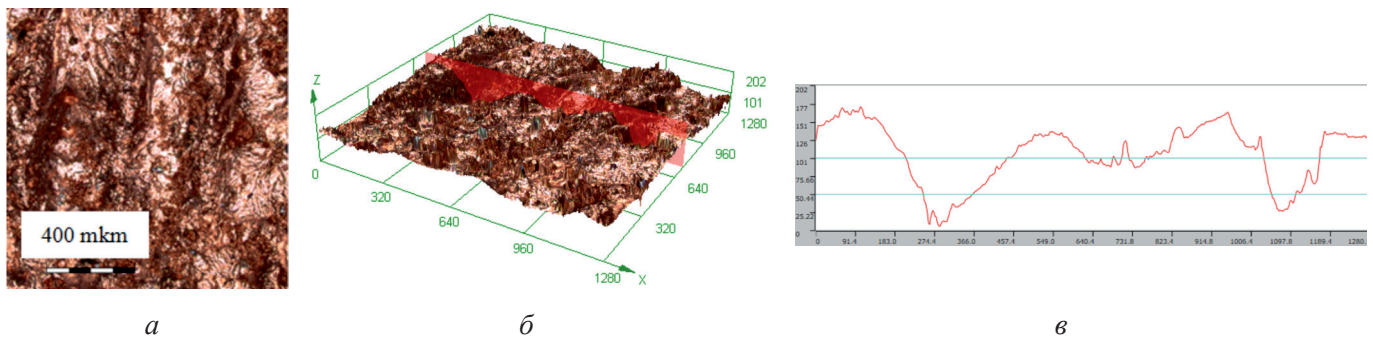


Рис. 3. Определение шероховатости поверхности на микроскопе Olympus LEXT OLS4100:

a – фотография единичного слоя из медного порошка, полученного методом селективного плавления на следующих режимах: $P = 30$ Вт, $V = 2000$ мм/мин, $s = 0,2$ мм, $t = 300$ °С; *б* – сечение профиля поверхности; *в* – профилограмма поверхностного слоя R_z , мкм

Fig. 3. Determination of surface roughness with the microscope Olympus LEXT OLS4100:

a – a photograph of a single layer of copper powder obtained by the selective melting method (x200) in the following modes: $P = 30$ W, $V = 2000$ mm/min, $s = 0.2$ mm, $t = 300$ °C; *б* – section of the surface profile; *в* – profilogram of the surface layer R_z , μm

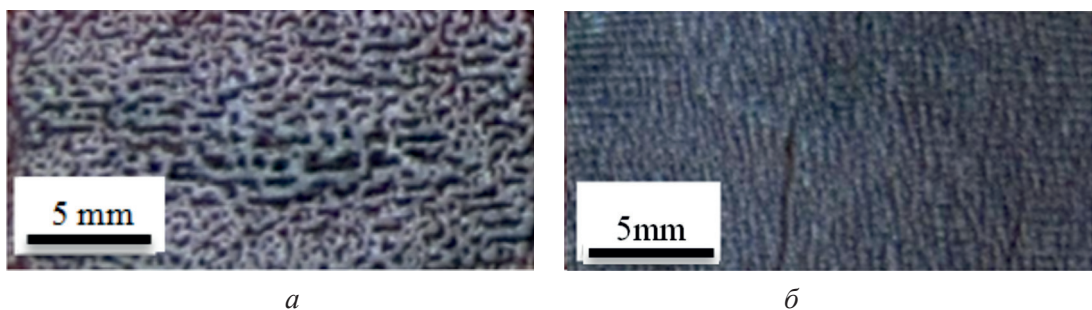


Рис. 4. Фотографии поверхности единичного слоя из медного порошка, полученного методом селективного плавления на режимах:

a – $P = 30$ Вт, $V = 1600$ мм/мин, $t = 114$ °С, $s = 0,2$ мм, $R_z = 725$ мкм; *б* – $P = 14$ Вт, $V = 1600$ мм/мин, $t = 114$ °С, $s = 0,2$ мм, $R_z = 480$ мкм

Fig. 4. Images of the surface of a single layer of copper powder obtained by the selective melting method in the modes:

a – $P = 30$ W, $V = 1600$ mm/min, $t = 114$ °C, $s = 0.2$ mm, $R_z = 725$ μm; *б* – $P = 14$ W, $V = 1600$ mm/min, $t = 114$ °C, $s = 0.2$ mm, $R_z = 480$ μm

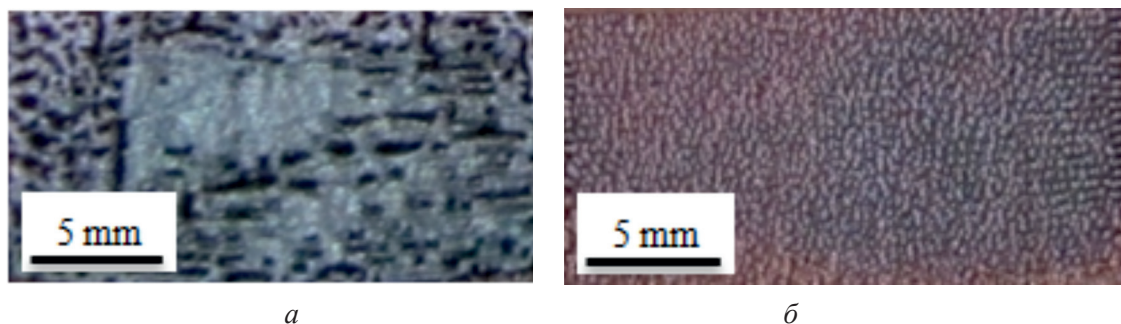


Рис. 5. Фотографии поверхности единичного слоя из медного порошка, полученного методом селективного плавления на режимах:

a – $P = 22$ Вт, $V = 200$ мм/мин, $t = 114$ °С, $s = 0,2$ мм, $R_z = 750$ мкм; *б* – $P = 22$ Вт, $V = 3000$ мм/мин, $t = 114$ °С, $s = 0,2$ мм, $R_z = 480$ мкм

Fig. 5. Images of the surface of a single layer of copper powder obtained by the selective melting method in the modes:

a – $P = 22$ W, $V = 200$ mm/min, $t = 114$ °C, $s = 0.2$ mm, $R_z = 750$ μm; *б* – $P = 22$ W, $V = 3000$ mm/min, $t = 114$ °C, $s = 0.2$ mm, $R_z = 480$ μm

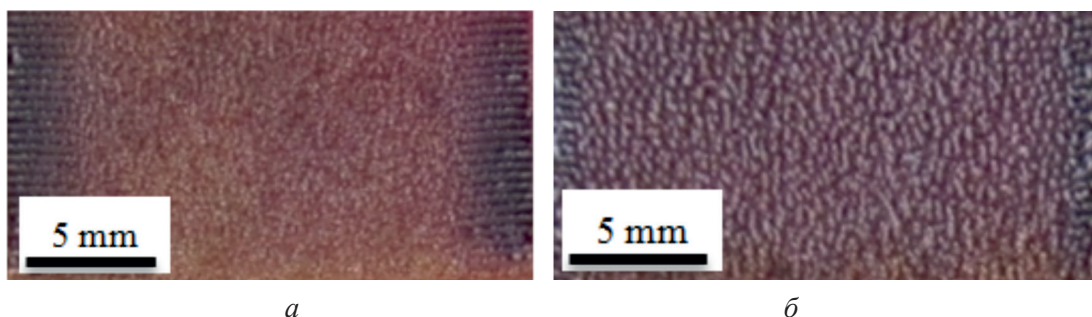


Рис. 6. Фотографии поверхности единичного слоя из медного порошка, полученного методом селективного лазерного плавления на режимах:

$a - P = 30 \text{ Вт}, V = 3000 \text{ мм/мин}, t = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}, s = 0,3 \text{ мм}, R_z = 525 \text{ мкм};$ $b - P = 30 \text{ Вт}, V = 3000 \text{ мм/мин}, t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}, s = 0,3 \text{ мм}, R_z = 540 \text{ мкм}$

Fig. 6. Images of the surface of a single layer of copper powder obtained by the selective melting method in the modes:

$a - P = 30 \text{ W}, V = 3000 \text{ mm/min}, t = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}, s = 0.3 \text{ mm}, R_z = 525 \text{ }\mu\text{m};$ $b - P = 30 \text{ W}, V = 3000 \text{ mm/min}, t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}, s = 0.3 \text{ mm}, R_z = 540 \text{ }\mu\text{m}$

Влияние шага сканирования на шероховатость поверхности единичного слоя показано на рис. 7. Увеличение шага сканирования с 0,1 до 0,3 мм при $P = 30 \text{ Вт}, V = 3000 \text{ мм/мин}, t = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к изменению R_z с 740 до 525 мкм.

На рис. 8 показано влияние защитного газа на шероховатость поверхности единичного слоя. При спекании медного порошка в аргоне наблюдалось изменение цвета спеченной поверхности, она приобрела золотистый цвет и уменьшилась шероховатость поверхности R_z с 650 до 500 мкм.

Влияние механоактивации порошка на шероховатость поверхности единичного слоя показано на рис. 9. Воздействие лазерного излучения на порошок, подвергнутый трехминутной

активации, приводит к уменьшению диаметра коагулированных частиц и их равномерному распределению по поверхности. Шероховатость поверхности значительно уменьшается с 600 до 125 мкм, при $P = 14 \text{ Вт}, V = 200 \text{ мм/мин}, t = 20^{\circ}, s = 0,1 \text{ мм}$.

В результате планирования и проведения экспериментов и статической обработки [15] полученных результатов получена математическая зависимость шероховатости поверхности медного порошка от режимов плавления, позволяющая выявить значимые параметры:

$$R_z = 356 + 15P - 0,1V - 0,057t + 425S.$$

Зависимость шероховатости единичного слоя от режимов плавления показана на рис. 10.

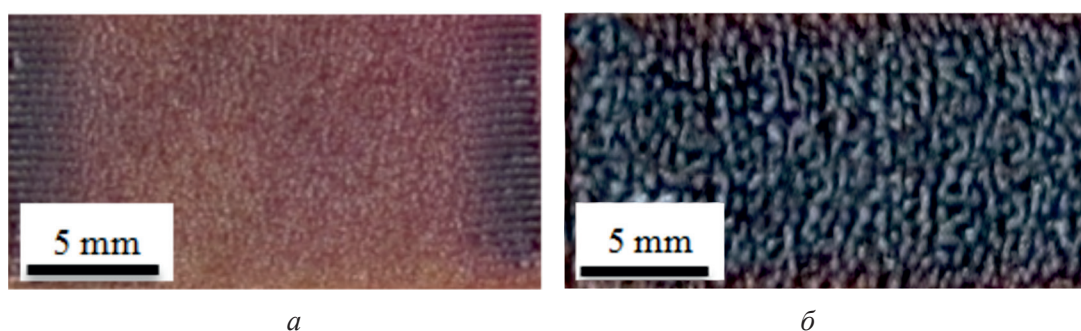


Рис. 7. Фотографии поверхности единичного слоя из медного порошка, полученного методом селективного лазерного плавления на режимах:

$a - P = 30 \text{ Вт}, V = 3000 \text{ мм/мин}, t = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}, s = 0,3 \text{ мм}, R_z = 525 \text{ мкм};$ $b - P = 30 \text{ Вт}, V = 3000 \text{ мм/мин}, t = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}, s = 0,1 \text{ мм}, R_z = 740 \text{ мкм}$

Fig. 7. Images of the surface of a single layer of copper powder obtained by the selective melting method in the modes:

$a - P = 30 \text{ W}, V = 3000 \text{ mm/min}, t = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}, s = 0.3 \text{ mm}, R_z = 525 \text{ }\mu\text{m};$ $b - P = 30 \text{ W}, V = 3000 \text{ mm/min}, t = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}, s = 0.1 \text{ mm}, R_z = 740 \text{ }\mu\text{m}$

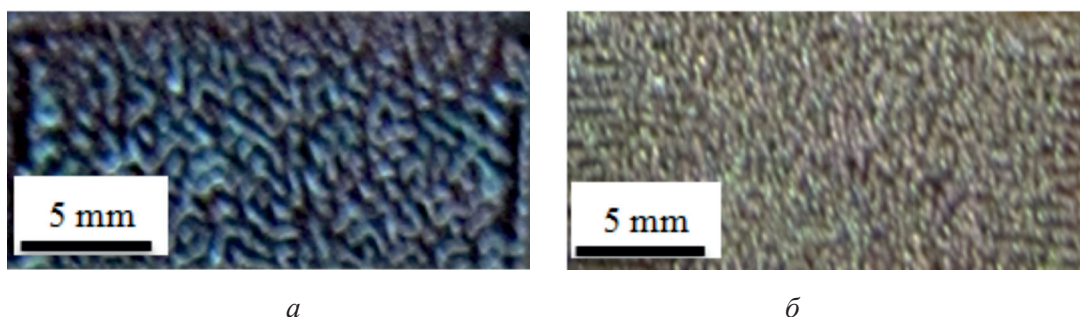


Рис. 8. Фотографии поверхности единичного слоя из медного порошка, полученного методом селективного плавления на разных режимах:

a – $P = 22$ Вт, $V = 1600$ мм/мин, $t = 114$ °С, $s = 0,3$ мм, $R_z = 650$ мкм, спекание на воздухе;
б – $P = 22$ Вт, $V = 1600$ мм/мин, $t = 114$ °С, $s = 0,3$ мм, $R_z = 500$ мкм, спекание в аргоне

Fig. 8. Images of the surface of a single layer of copper powder obtained by the selective melting method in the modes:

a – $P = 22$ W, $V = 1600$ mm/min, $t = 114$ °C, $s = 0.3$ mm, $R_z = 650$ μ m, air sintering; *б* – $P = 22$ W, $V = 1600$ mm/min, $t = 114$ °C, $s = 0.3$ mm, $R_z = 500$ μ m, argon sintering

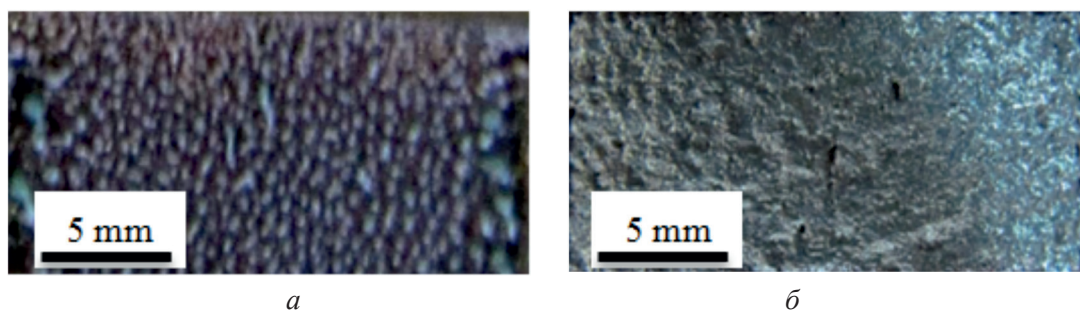


Рис. 9. Фотографии поверхности единичного слоя из медного порошка, полученного методом селективного плавления:

a – $P = 14$ Вт, $V = 200$ мм/мин, $t = 20$ °С, $s = 0,1$ мм, $R_z = 600$ мкм; *б* – $P = 14$ Вт, $V = 200$ мм/мин, $t = 20$ °С, $s = 0,1$ мм, $R_z = 125$ мкм после трех минутной активации

Fig. 9. Images of the surface of a single layer of copper powder obtained by the selective melting method in the modes:

a – $P = 14$ W, $V = 200$ mm/min, $t = 20$ °C, $s = 0.1$ mm, $R_z = 600$ μ m; *б* – $P = 14$ W, $V = 200$ mm/min, $t = 20$ °C, $s = 0.1$ mm, $R_z = 125$ μ m after 3 minute activation

На шероховатость поверхностного слоя из медного порошка значительное влияние оказывает скорость перемещения луча лазера. Изменение V от 200 до 3000 мм/мин приводит к уменьшению R_z на 56,25 %, при $P = 22$ Вт, $s = 0,2$ мм, $t = 114$ °С в соответствии с рис. 5. Мощность также оказывает большое влияние на R_z . Повышение P от 14 до 30 Вт R_z увеличивает на 62 %, при $V = 1600$ мм/мин, $t = 114$ °С, $s = 0,2$ мм, рис. 4. Изменение s с 0,1 до 0,3 мм уменьшает R_z на 40 %, при $P = 30$ Вт, $t = 200$ °С, $V = 3000$ мм/мин в соответствии с рис. 7. Температура подогрева порошкового материала на R_z влияет незначительно. Таким образом, скорость перемещения

луча лазера, мощность излучения лазера и шаг сканирования являются основными параметрами, влияющими на шероховатость спеченного поверхностного слоя из медного порошка.

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Определены рациональные области технологических режимов селективного лазерного плавления медного порошка: $P = 14...30$ Вт, $V = 200...3000$ мм/мин, $s = 0,1...0,3$ мм; $t = 26...200$ °С.

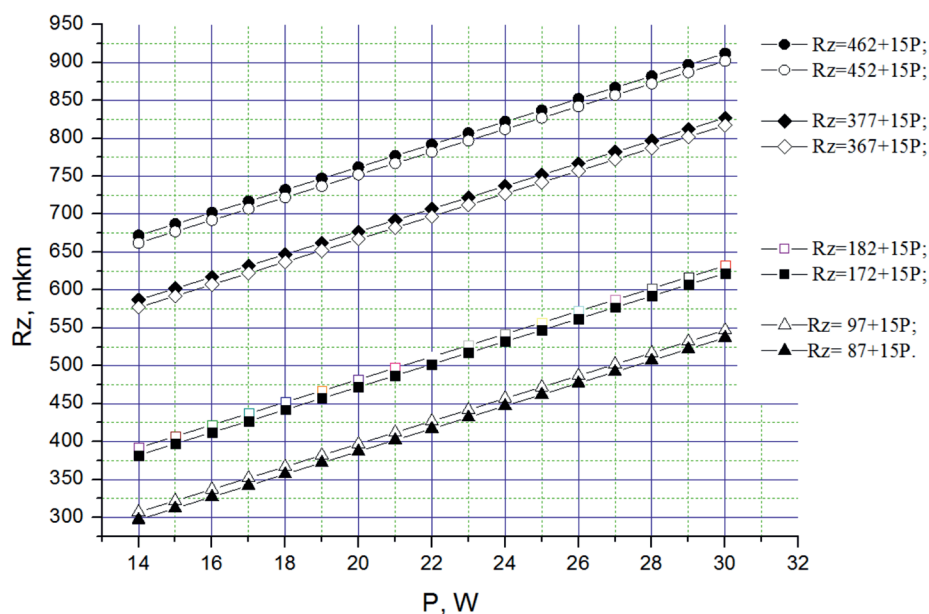


Рис. 10. Диаграмма влияния режимов плавления на шероховатость единичного слоя R_z :

—●— $V = 200$ мм/мин, $t = 26$ °C, $S = 0,3$ мм; —○— $V = 200$ мм/мин, $t = 200$ °C, $s = 0,3$ мм; —◆— $V = 200$ мм/мин, $t = 26$ °C, $S = 0,1$ мм; —◇— $V = 200$ мм/мин, $t = 200$ °C, $s = 0,1$ мм; —□— $V = 3000$ мм/мин, $t = 26$ °C, $S = 0,3$ мм; —■— $V = 3000$ мм/мин, $t = 200$ °C, $s = 0,3$ мм; —△— $V = 3000$ мм/мин, $t = 26$ °C, $S = 0,1$ мм; —▲— $V = 3000$ мм/мин, $t = 200$ °C, $s = 0,1$ мм

Fig. 10. The diagram of the effect of melting regimes on the roughness of a single layer R_z :

—●— $V = 200$ mm/min, $t = 26$ °C, $S = 0.3$ mm; —○— $V = 200$ mm/min, $t = 200$ °C, $s = 0.3$ mm; —◆— $V = 200$ mm/min, $t = 26$ °C, $S = 0.1$ mm; —◇— $V = 200$ mm/min, $t = 200$ °C, $s = 0.1$ mm; —□— $V = 3000$ mm/min, $t = 26$ °C, $S = 0.3$ mm; —■— $V = 3000$ mm/min, $t = 200$ °C, $s = 0.3$ mm; —△— $V = 3000$ mm/min, $t = 26$ °C, $S = 0.1$ mm; —▲— $V = 3000$ mm/min, $t = 200$ °C, $s = 0.1$ mm

2. Установлен характер влияния режимов селективного лазерного плавления и получена эмпирическая зависимость шероховатости единичного поверхностного слоя из медного порошка, позволяющие управлять процессом с целью получения качественного изделия.

3. Отмечено положительное влияние защитной атмосферы и механоактивации металлических порошковых материалов на качество поверхностного слоя. Для уменьшения шероховатости, улучшения внутренней структуры и прочностных свойств плавление рекомендуется проводить в аргоне с применением металлических порошковых материалов, подвергнутых механоактивации.

4. Проведенные исследования показывают, что шероховатость поверхностного слоя R_z можно изменять в значительных пределах, меняя технологические режимы лазерной обра-

ботки. На шероховатость спеченного поверхностного слоя из ПМС-1 наибольшее влияние оказывает скорость перемещения луча лазера. Изменение V от 200 до 3000 мм/мин приводит к уменьшению R_z на 56,25 % при $P = 22$ Вт, $s = 0,2$ мм, $t = 114$ °C. Мощность также оказывает большое влияние на R_z . Повышение P от 14 до 30 Вт R_z увеличивает на 62 % при $V = 1600$ мм/мин, $t = 114$ °C, $s = 0,2$ мм. Изменение s с 0,1 до 0,3 мм уменьшает R_z на 40 % при $P = 30$ Вт, $t = 200$ °C, $V = 3000$ мм/мин. Температура подогрева порошкового материала на R_z влияет незначительно. Таким образом, скорость перемещения луча лазера, мощность излучения лазера и шаг сканирования являются основными параметрами, влияющими на шероховатость спеченного поверхностного слоя из медного порошка.

Список литературы

1. *Beaman J.J., Deckard C.R.* Selective laser sintering with assisted powder handling: patent 4938816 US. – Appl. date 03.07.1990.
2. *Шишковский И.В.* Селективное лазерное спекание и синтез функциональных структур: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.17. – Самара, 2006. – 390 с.
3. Direct selective laser sintering of metals / M. Agarwala, D. Bourell, J. Beaman, H. Marcus, J. Barlow // *Rapid Prototyping Journal*. – 1995. – Vol. 1, iss. 1. – P. 26–36. – doi: 10.1108/13552549510078113.
4. *Mumtaz K., Hopkinson N.* Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting // *Rapid Prototyping Journal*. – 2009. – Vol. 15, iss. 2. – P. 96–103. – doi: 10.1108/13552540910943397.
5. Integrative production technology for high-wage countries / ed. by C. Brecher. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. – 1096 p. – ISBN 978-3-642-21066-2. – doi: 10.1007/978-3-642-21067-9.
6. *Gibson I., Rosen D.W., Stucker B.* Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. – New York, USA: Springer, 2009. – 459 p. – ISBN-10: 1441911197. – ISBN-13: 9781441911193.
7. Theoretical and experimental study on surface roughness of 316L stainless steel metal parts obtained through selective laser melting / D. Wang, Y. Liu, Y. Yang, D. Xiao // *Rapid Prototyping Journal*. – 2016. – Vol. 22, iss. 4. – P. 706–716. – doi: 10.1108/RPJ-06-2015-0078.
8. *Cheng B., Shrestha S., Chou K.* Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting // *Additive Manufacturing*. – 2016. – Vol. 12, pt. B. – P. 240–251. – doi: /10.1016/j.addma.2016.05.007.
9. Influences of processing parameters on surface roughness of Hastelloy X produced by selective laser melting / Y. Tian, D. Tomus, P. Rometsch, X. Wu // *Additive Manufacturing*. – 2017. – Vol. 13. – P. 103–112. – doi: 10.1016/j.addma.2016.10.010.
10. Lasers and materials in selective laser sintering / J. Kruth, X. Wang, T. Laoui, L. Froyen // *Assembly Automation*. – 2003. – Vol. 23, iss. 4. – P. 357–371. – doi: 10.1108/01445150310698652.
11. *Jhabvala J., Boillat E., Glardon R.* Study of the inter-particle necks in selective laser sintering // *Rapid Prototyping Journal*. – 2013. – Vol. 19, iss. 2. – P. 111–117. – doi: 10.1108/13552541311302969.
12. Selective laser melting of iron-based powder / J.P. Kruth, L. Froyen, J. Van Vaerenbergh, P. Mercelis, M. Rombouts, B. Lauwers // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2004. – Vol. 149, iss. 1–3. – P. 616–622. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.051.
13. *Saprykin A.A., Saprykina N.A.* Engineering support for improving quality of layer-by-layer laser sintering // *Proceedings – 2012 7th International Forum on Strategic Technology IFOST 2012, Tomsk, 18–21 September 2012*. – Tomsk, 2012. – P. 6357719. – doi:10.1109/IFOST.2012.6357719.
14. Improvement of the sintered surface and bulk of the product via differentiating laser sintering (melting) modes / N.A. Saprykina, A.A. Saprykin, D.A. Arkhipova, I.F. Borovikov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 142, N 1. – P. 012089. – doi: 10.1088/1757-899X/142/1/012089.
15. *Спиридонов А.А.* Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

© 2017 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Analysis, Modeling and Prediction of Surface Roughness of Copper, Obtained by Selective Laser Melting

Natalia Saprykina^{1, a,*}

¹Yurga Institute of Technology, TPU Affiliate, 26 Leningradskaya st., Yurga, 652055, Russian Federation

^a  <http://orcid.org/0000-0002-5874-8287>,  nat_anat_sapr@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 27 April 2017

Revised: 25 July 2017

Accepted: 02 August 2017

Available online: 15 September 2017

Keywords:

Selective laser melting

Melting

Coagulation

Surface roughness

Powder material

Surface quality

Quality of interior volume

ABSTRACT

Unlike traditional methods of material removal, rapid prototyping technologies are aimed at creating complex products by sequentially adding material (materials). By now, a large number of rapid prototyping methods, which differ in the material used and in the method for shaping the article, are known. Innovative is the method of selective laser melting of physical copies of various objects from metals, alloys and metal-matrix composite materials to meet the requirements of the Aerospace, Defense, Automotive and Biomedical Industries. An important direction in the development of selective laser melting technology is improving the quality of the product being formed. This is a complex multi-parameter process, in which it is possible to isolate about 130 parameters that affect the final result. The paper presents the results of experimental studies of the influence of argon shielding gas, mechanical activation of powder and the effect of technological melting modes: laser radiation power, laser beam travel speed, scanning step, preheating temperature of the powder material on the surface roughness obtained from copper powder material by selective laser melting. Melting experiments of copper powder are implemented in a layer-by-layer laser melting unit of the original design, which allows regulating all technological melting modes. The surface roughness is determined by the Olympus LEXT OLS4100 digital non-contact microscope. A mathematical dependence of the roughness of the surface layer from copper powder on the technological melting regimes is obtained on the basis of the theory of experimental planning and static processing of the results. Significant parameters of the regime are determined: laser radiation power, laser beam moving speed, scanning step, affecting the layer roughness. As well as the range of its change from 480 to 725 microns with an increase in power from 14 to 30 watts, the laser beam travel speed is 1400 mm/min, the powder heating temperature is 114 °C, the scanning step is 0.2 mm. From 750 to 480 µm with an increase in the speed of the laser beam from 200 to 3000 mm/min, power 22 W, powder heating temperature 114 °C, scanning step 0.2 mm. An increase in the scanning step from 0.1 to 0.3 mm leads to a decrease in the roughness from 740 to 525 µm with a laser beam moving speed of 3000 mm/min, a power of 30 W, a powder preheating temperature of 200 °C. The positive influence of the protective atmosphere and mechanical activation of the powder material on the quality of the surface layer is shown.

For citation: Saprykina N.A. Analysis, modeling and prediction of surface roughness of copper, obtained by selective laser melting. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2017. no. 3 (76), pp. 6–16. doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-6-16. (in Russian).

References

1. Beaman J.J., Deckard C.R. *Selective laser sintering with assisted powder handling*. Patent US, no. 4938816, 1990.

* Corresponding author

Saprykina Natalia A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Yurga Institute of Technology,
26 Leningradskaya st.,
652055, Yurga, Russian Federation
E-mail: nat_anat_sapr@mail.ru

2. Shishkovskii I.B. *Selektivnoe lazernoe spekanie i sintez funktsional'nykh struktur*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Selective laser sintering and synthesis of functional structures. Dr. phys.-math. sci. diss.]. Samara, 2006. 390 p.
3. Agarwala M., Bourell D., Beaman J., Marcus H., Barlow J. Direct selective laser sintering of metals. *Rapid Prototyping Journal*, 1995, vol. 1, iss. 1, pp. 26–36. doi: 10.1108/13552549510078113.
4. Mumtaz K., Hopkinson N. Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 2009, vol. 15, iss. 2, pp. 96–103. doi: 10.1108/13552540910943397.
5. Brecher C., ed. *Integrative production technology for high-wage countries*. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. 1096 p. ISBN 978-3-642-21066-2. doi: 10.1007/978-3-642-21067-9.
6. Gibson I.B., Rosen D.W., Stucker B. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York, USA, Springer, 2009. 459 p. ISBN-10: 1441911197. ISBN-13: 9781441911193.
7. Wang D., Liu Y., Yang Y., Xiao D. Theoretical and experimental study on surface roughness of 316L stainless steel metal parts obtained through selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 2016, vol. 22, iss. 4, pp. 706–716. doi: 10.1108/RPJ-06-2015-0078.
8. Cheng B., Shrestha S., Chou K. Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 2016, vol. 12, pt. B, pp. 240–251. doi: /10.1016/j.addma.2016.05.007.
9. Tian Y., Tomus D., Rometsch P., Wu X. Influences of processing parameters on surface roughness of Hastelloy X produced by selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 2017, vol. 13, pp. 103–112. doi: 10.1016/j.addma.2016.10.010.
10. Kruth J., Wang X., Laoui T., Froyen L. Lasers and materials in selective laser sintering. *Assembly Automation*, 2003, vol. 23, iss. 4, pp. 357–371. doi: 10.1108/01445150310698652.
11. Jhabvala J., Boillat E., Glardon R. Study of the inter-particle necks in selective laser sintering. *Rapid Prototyping Journal*, 2013, vol. 19, iss. 2, pp. 111–117. doi: 10.1108/13552541311302969.
12. Kruth J.P., Froyen L., Vaerenbergh J. Van, Mercelis P., Rombouts M., Lauwers B. Selective laser melting of iron-based powder. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 149, iss. 1–3, pp. 616–622. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.051.
13. Saprykin A.A., Saprykina N.A. Engineering support for improving quality of layer-by-layer laser sintering. *Proceedings – 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012*, Tomsk, 18–21 September 2012, p. 6357719. doi: 10.1109/IFOST.2012.6357719.
14. Saprykina N.A., Saprykin A.A., Arkhipova D.A., Borovikov I.F. Improvement of the sintered surface and bulk of the product via differentiating laser sintering (melting) modes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 142, no. 1, p. 012089. doi: 10.1088/1757-899X/142/1/012089.
15. Spiridonov A.A. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov* [Experiment planning in the study of technological processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 184 p.