

УДК 621.791.725

doi: 10.18698/0536-1044-2019-6-20-29

Влияние основных параметров процесса селективного лазерного плавления на стабильность формирования единичных дорожек при выращивании изделий из медных сплавов^{*}

А.Г. Григорьянц, Д.С. Колчанов, А.А. Дренин, А.О. Денежкин

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Influence of the Main Parameters of Selective Laser Melting on Stability of Single Track Formation when 'Growing' Parts from Copper Alloys

A.G. Grigoryants, D.S. Kolchanov, A.A. Drenin, A.O. Denezhkin

Bauman Moscow State Technical University

Технология селективного лазерного плавления, позволяющая напрямую производить готовые детали, экономически выгодна для производства единичных или мелкосерийных партий изделий. Использование меди и ее сплавов, обладающих высокими тепло- и электропроводностью, в качестве сплавляемого материала представляет большой научный интерес. В связи с этим исследовано влияние параметров процесса выращивания структур — скорости сканирования лазерного луча и толщины слоя — на стабильность образования единичных дорожек из жаропрочного медного сплава ПР-БрХ. Изучен механизм формирования единичных дорожек. Установлены закономерности формирования стабильной единичной дорожки, найдены верхняя и нижняя границы режимов выращивания. Результаты исследования дают возможность глубже понять процесс селективного лазерного плавления медных сплавов и могут послужить основой для определения окна оптимальных режимов выращивания сплошных структур.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, СЛП, медный порошок, медный сплав, единичная дорожка

Selective laser melting technology has the ability to directly produce finished parts, and is economically efficient for single or small batch production. Copper and its alloys are of great interest due to their high thermal and electrical conductivity. The influence of build process parameters, such as scanning speed and layer thickness on the stability of single track formation using a heat-resistant copper alloy PR-BrKh was investigated in this paper. The mechanism of single track formation was studied. As a result, patterns of formation of a stable single track were established, the upper and lower limits of the build parameters were determined. The results of the study provide a deeper understanding of the copper alloys selective laser melting process and may serve as a basis for determining the optimal parameters' range for 'growing' solid structures.

Keywords: selective laser melting, SLM, copper powder, copper alloy, single track

^{*} Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00940.

Селективное лазерное плавление (СЛП) относится к группе технологий послойного изготовления детали из трехмерной CAD-модели [1]. Это позволяет обойти ограничение традиционных методов производства и изготавливать детали сложной геометрии (которые зачастую невозможно выполнить другими способами) за короткий срок и с высокой экономией материала.

Медь и ее сплавы широко используют в промышленности благодаря низкому удельному сопротивлению и высокой теплопроводности, делающей этот материал незаменимым в области теплообмена. Изготовление теплообменников из чистой меди методом СЛП становится все более востребованным в мире.

Это связано с тем, что теплообменники нередко имеют сложную геометрию и замкнутые полости для уменьшения тепловых потерь и повышения их коэффициента полезного действия [2]. Медь же обладает относительно высокой стоимостью, поэтому после обработки детали с помощью технологий с удалением материала из массива заготовки [3] (например, после механообработки) оставшиеся отходы необходимо переработать для дальнейшего применения, что приводит к существенным денежным и временным затратам. Низкое удельное сопротивление позволяет использовать медь для изготовления трехмерных печатных плат и миниатюризации электроники [4].

Одними из главных трудностей обработки меди с помощью лазерного излучения являются ее высокая отражательная способность в ближнем инфракрасном диапазоне [5] и очень большая теплопроводность ($400 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) [6]. Вследствие этого при выращивании детали из медного порошка путем лазерного излучения достаточно трудно создать необходимую концентрацию энергии для расплавления порошкового слоя (ПС) из-за быстрого рассеивания теплоты в объем материала. Таким образом, для получения стабильной и плотной структуры следует применять лазерное излучение большой мощности с высокой плотностью.

Мировые исследования показывают, что для изготовления детали с относительной плотностью не менее 96 % следует использовать лазерное излучение мощностью 800...1200 Вт [7, 8], причем иногда задействуют два лазерных источника мощностью 400 и 1000 Вт.

Так, в работе [9] для определения влияния параметров СЛП на формирование микроструктуры, а также плотность образцов из меди

С184000 применена установка SLM 250 HL, оснащенная двумя лазерами. Первый из них с гауссовым профилем пучка и диаметром пятна 80 мкм обеспечивает мощность 400 Вт, второй с равномерным профилем пучка и диаметром пятна 730 мкм — 1000 Вт. Использование двух лазеров в процессе СЛП позволило получить образцы плотностью 96 %.

Кроме того, выявлено, что лазерный источник с равномерным распределением излучения может достичь более высокой относительной плотности, чем источник с распределением Гаусса. При этом для компенсации высокой теплопроводности меди и снижения тепловых напряжений подложку следует нагревать до температуры 100 °С.

Однако многие установки для СЛП оснащены твердотельными лазерными излучателями, у которых длина волны лазерного излучения составляет 1,064 мкм, а максимальная мощность лазера не превышает 100 Вт. Эти установки успешно выращивают изделия из сплавов алюминия, кобальта-хрома, титана и различных сталей с относительной плотностью, близкой к 100 %.

Вследствие таких специфических особенностей меди и ее сплавов, как низкое поглощение лазерного излучения и высокая теплопроводность, важно изучить механизм формирования единичных дорожек (ЕД) на основе параметров обработки. Это позволит глубже понять процесс СЛП медных сплавов и может помочь в нахождении окна оптимальных режимов выращивания.

Цель работы — определение влияния параметров СЛП на стабильное формирование ванны расплава ЕД из медного порошка ПР-BrX и исследование механизма формирования ЕД путем изменения параметров обработки — скорости сканирования лазерного луча и толщины ПС.

Оборудование. Для проведения экспериментов использовали установку СЛП-110 (рис. 1) [10], оснащенную непрерывным иттербиевым лазером с максимальной мощностью 100 Вт, диаметром пятна в фокусе 50 мкм и полем обработки 110×110 мм. Процесс выращивания проводили в камере с контролируемой атмосферой, из которой предварительно откачали воздух, а затем закачали в нее защитный газ (аргон). Бункеры выращивания и подачи перемещали с помощью шарико-винтовой передачи с шаговым двигателем (шаг составлял 5 мкм).



Рис. 1. Внешний вид установки СЛП-110

Гранулометрический анализ порошка ПР-БрХ проводили с помощью анализатора размера частиц HORIBA LA-350 с диапазоном измерения от 100 нм до 1000 мкм. В основу работы лазера положен такой метод измерения, как лазерная дифракция, базирующаяся на теории Ми. Источником излучения служит лазерный диод с длиной волны 605 нм и мощностью 5 мВт. В качестве детектора использованы 64 фотодиода, расположенных на логарифмической спирали, а для анализа обратного рассеяния — 6 кремниевых фотодиодов.

Для морфологического анализа порошка ПР-БрХ применяли металлургический инвентаризированный микроскоп Olympus GX-51, оснащенный цифровой камерой Altra 20 (с разрешением 2 Мп и глубиной цвета 10 бит). Обработку изображений выполняли в системе автоматизированного анализа изображений SIAMS Photolab.

Измерения высоты и ширины сплавленных ЕД проводили с помощью видеоизмерительной

машины с ЧПУ серии Quick Vision ACTIVE производства компании Mitutoyo. Диапазон измерений такой машины составляет 400×400×200 мм, разрешение — 0,1 мкм, погрешности измерений оптической системы (проверено согласно стандарту Mitutoyo):

$$E1(x, y) = (2 + 3L/100);$$

$$E1(z) = (3 + 5L/1000);$$

$$E2(XY) = (2,5 + 4L/1000),$$

где $E1(x, y)$ — погрешность перемещения по горизонтальным осям x и y , мкм; L — измеряемая длина, мм; $E1(z)$ — погрешность перемещения по вертикальной оси z , мкм; $E2(XY)$ — погрешность фокусировки измерительного объектива, мкм.

Материал для СЛП. В исследовании использован жаропрочный медный порошок ПР-БрХ, имеющий следующий химический состав, %: Fe — до 0,08; Cr — 0,4...1,0; Cu — 98,5...99,6; Zn — до 0,3. Средний диаметр частиц порошка равен 31,86 мкм. На рис. 2 показаны результаты измерения гранулометрического состава в виде интегральной кривой распределения q и гистограммы дифференциального распределения P частиц порошка ПР-БрХ по диаметру d .

Морфологический анализ показал, что гранулы порошка ПР-БрХ имеют сферическую форму (рис. 3, *a* и *б*), на поверхности присутствуют редкие выступы и неровности. На рис. 3, *a* показаны размеры некоторых частиц порошка ПР-БрХ, на рис. 3, *б* — их плотность.

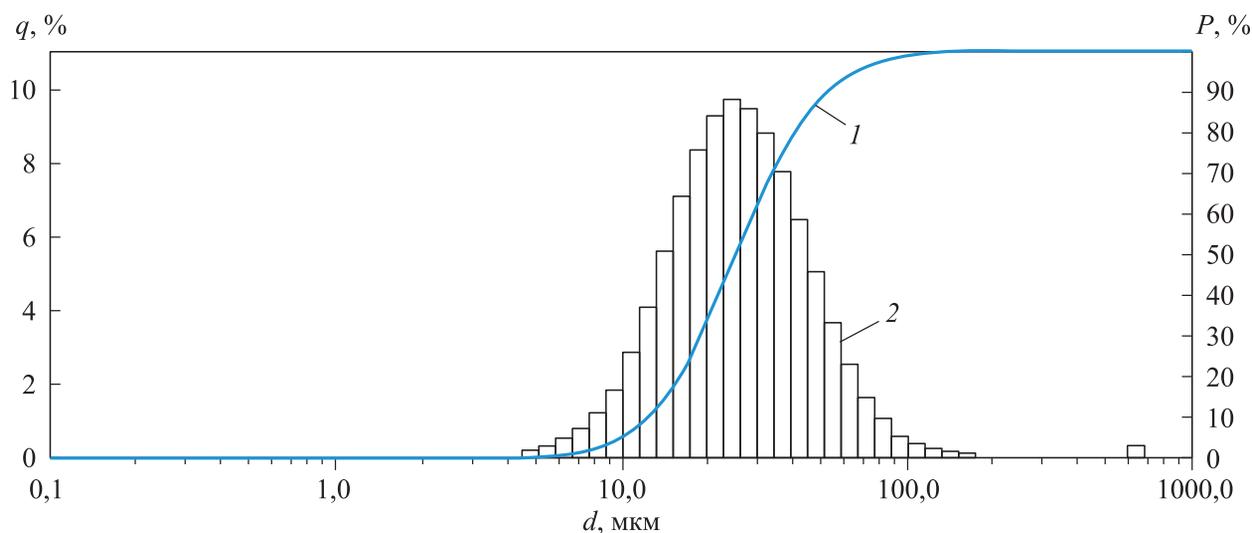
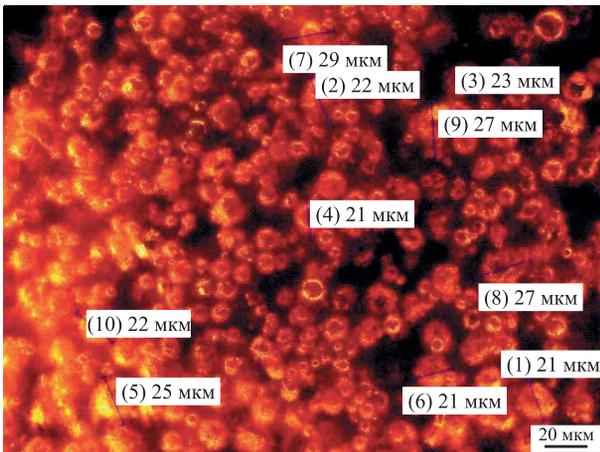


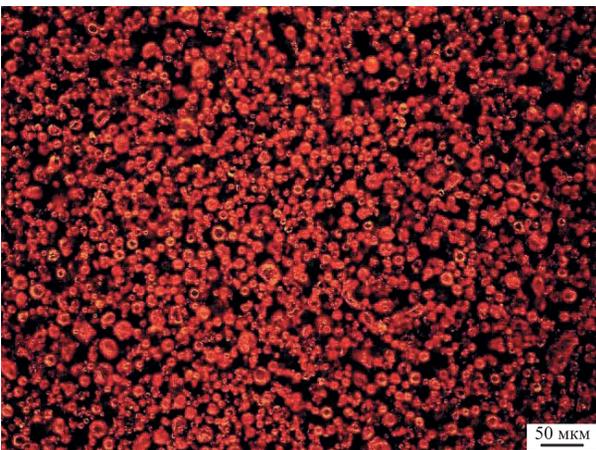
Рис. 2. Интегральное q (1) и дифференциальное P (2) распределения частиц порошка ПР-БрХ по диаметру d

Методика эксперимента. Исследование стабильности формирования ЕД из порошка ПР-БрХ проводили на подложке из нержавеющей стали. Предварительно на подложке сделали 18 ячеек размерами 10×10 мм (рис. 4) различной глубины (от 10 до 95 мкм). При нанесении ПС в этих ячейках образовывался ПС необходимой толщины, имитировавший различную толщину насыпанного слоя порошка. В каждой из 18 ячеек сделали по 15 дорожек с различной скоростью сканирования v , значения которой приведены в табл. 1.

Как известно, повышение температуры материала приводит к увеличению коэффициента поглощения. Подогрев подложки выращивания до 250 °С осуществляли с помощью плоского керамического нагревателя. Температуру подогрева измеряли термопарой хромель–алюмель, имеющей чувствительность 41 мВ/°С. Мощность лазерного излучения была постоянно



а



б

Рис. 3. Вид гранул порошка ПР-БрХ под микроскопом в масштабе 20 (а) и 50 мкм (б)

Таблица 1

Значения скорости сканирования для ЕД

Номер ЕД	v , мм/с	Номер ЕД	v , мм/с
1	3	9	160
2	10	10	190
3	20	11	220
4	40	12	270
5	60	13	320
6	80	14	370
7	100	15	420
8	130	–	–

равной 100 Вт. Материал подложки — нержавеющая сталь AISI 316L.

Для достоверности результатов формирования слоя заданной толщины t проведены измерения глубины h и профиля шероховатости Ra ячеек, значения которых приведены в табл. 2.

Затем в каждой ячейке создавали по 15 сплавленных ЕД, варьируя скорость сканирования в диапазоне 3...420 мм/с. Далее с помощью машины Quick Vision ACTIVE измеряли геометрические размеры сделанных дорожек в 15 точках по их длине с шагом 0,66 мм.

Результаты исследования и их обсуждение. Проведенный эксперимент позволил получить ЕД из порошка ПР-БрХ (рис. 5).

Установлено, что при постоянной мощности лазерного излучения, равной 100 Вт, и скорости сканирования $v = 420$ и 370 мм/с дорожки прерываются и становятся нестабильными, что вызывает их фрагментацию, причем для всех толщин слоя. Это связано с недостаточным вводом энергии лазерного излучения, требуемой для расплавления порошка за заданное время. При низкой скорости сканирования

Таблица 2

Значения глубины и профиля шероховатости ячеек

t , мкм	h , мм	Ra , мкм	t , мкм	h , мм	Ra , мкм
10	0,0071	0,1537	55	0,0534	0,1165
15	0,0094	0,1486	60	0,0598	0,5415
20	0,0162	0,1443	65	0,0690	0,1056
25	0,0230	0,1242	70	0,0722	0,1795
30	0,0294	0,1109	75	0,0728	0,1666
35	0,0386	0,1047	80	0,0787	0,1236
40	0,0368	0,1811	85	0,0858	0,2119
45	0,0419	1,1721	90	0,0913	0,1659
50	0,0469	0,1376	95	0,1001	0,1189

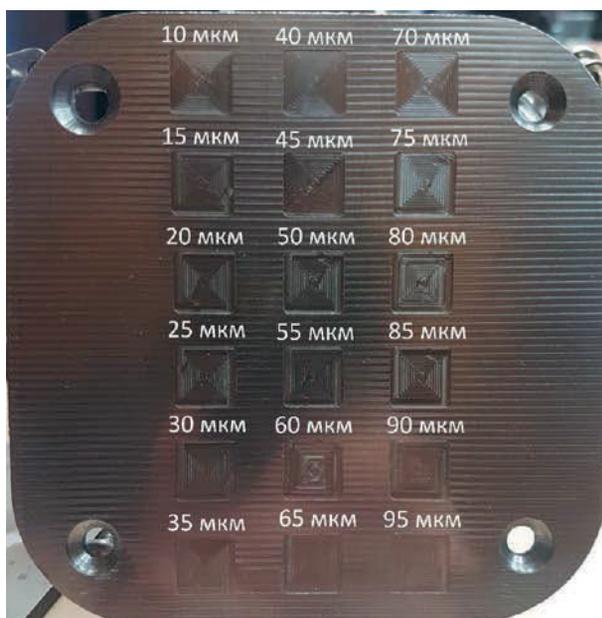


Рис. 4. Внешний вид подложки выращивания с ячейками различной глубины

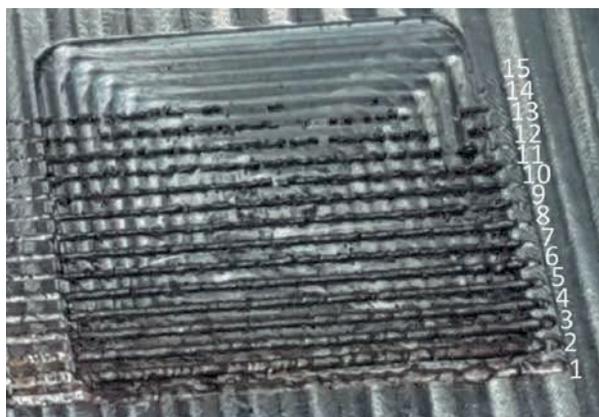


Рис. 5. Внешний вид углубления подложки выращивания с ЕД

(3...100 мм/с) наблюдалось нестабильное формирование ЕД. Поверхность имела волнообразный характер.

Также при некоторых толщинах слоя проявлялся ярко выраженный эффект сфероидизации [11, 12], представляющей собой разделение ванны расплава на отдельные капли (рис. 6, а), каждая из которых под действием сил поверхностного натяжения затягивает в себя близлежащие частицы порошка. Это вызывает образование ямки вокруг капли, а в итоге увеличение пористости выращиваемых кубических структур или нестабильное формирование кубиков.

В предельном случае такой эффект приводит к невозможности формирования плотной структуры и недопустимому механическому

контакту устройства нанесения порошка со сплавленными каплями. При этом объем жидкой капли зависит от температуры плавления, на которую влияют два основных параметра — мощность лазера и скорость сканирования.

При высокой скорости сканирования и низкой мощности лазера происходит уменьшение образования объема жидкой ванны. Следовательно, вязкость жидкотвердой смеси возрастает, что затрудняет течение расплава и перегруппировку частиц. Это, в свою очередь, снижает общие реологические характеристики жидкости с твердыми частицами [13]. Расплавленный порошок в зоне воздействия лазера имеет тенденцию собираться в отдельную каплю.

В этом случае соседние капли не соединяются между собой, так как ограниченное количество расплавленного порошка препятствует образованию шеек между ними. В то же время возникает значительный градиент температур в жидкой ванне, обеспечивающий приток материала к формирующимся каплям.

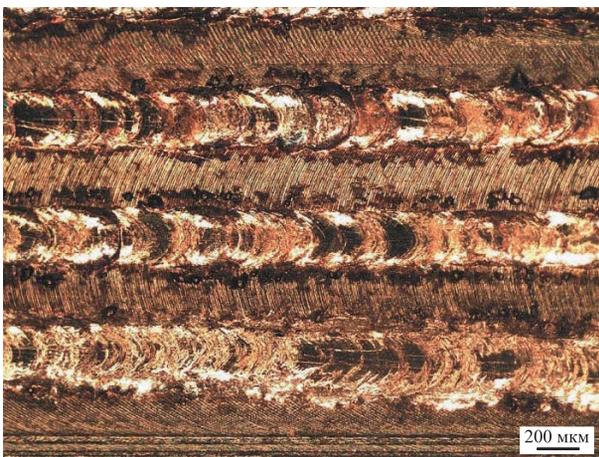
При более низкой скорости сканирования расплавляется достаточное для формирования шейки количество порошка и градиент температур имеет меньшее значение, что не приводит к разрыву жидкой ванны.

При низкой скорости сканирования погонная энергия больше, чем при высокой, вследствие чего возникает перегрев ПС, местами он испаряется, и происходит разбрызгивание расплавленного порошка (рис. 6, б).

Для дорожек № 2–8 проведены измерения геометрических размеров. У явно нестабильных ЕД размеры не измеряли. Стабильные ЕД характеризуются образованием устойчивой расплавленной ванны и непрерывностью по всей длине, нестабильные ЕД — резким перепадом геометрических размеров, соизмеримых с высотой слоя, выбросами расплавленного порошка, прерыванием сплошности по длине ЕД и появлением эффекта сфероидизации.

При скорости сканирования $v = 40$ мм/с наиболее стабильное формирование дорожки наблюдалось для толщин ПС, равных 45 и 50 мкм, максимальный перепад высот составлял 5,6 мкм. При $t = 40$ и 35 мкм возникал перегрев ПС и имелись участки с кипящим металлом. При толщине слоя 55 мкм происходило нестабильное формирование ЕД.

Ширина дорожек, выращенных с толщиной ПС $t = 45$ и 50 мкм, также оставалась стабильной по всей длине. Увеличение ПС до 55 мкм

*a**б*

привело к образованию нестабильных зон проплавления, что связано с эффектом сфероидизации [13, 14]. При остальных толщинах ПС и скорости сканирования $v = 40$ мм/с наблюдалось нестабильное формирование ЕД.

При скорости сканирования $v = 10$ мм/с самая стабильная ЕД получена для толщины ПС $t = 45$ мкм. Также при этой скорости имело место более стабильное изменение ширины по длине ЕД, чем было для дорожки № 4. Это связано с вводом более высокой мощности в ПС и, соответственно, с более длительным временем существования жидкой ванны расплава.

Увеличение скорости сканирования приводит к ухудшению стабильности образования ЕД. Следует отметить, что у ПС толщиной 10 мкм при $v = 13$ мм/с высота дорожки была относительно стабильной по всей ее длине, а максимальный перепад высот составлял 6 мкм. Однако ширина ЕД оказалась нестабильной по всей длине.

Вследствие более высокой скорости в ПС вводится недостаточно энергии для расплавления

*в*

Рис. 6. Результаты исследования:

a — проявление эффекта сфероидизации при толщине ПС $t = 10$ мкм и скорости сканирования $v = 410$ мм/с; *б* — вид дорожек с эффектом разбрызгивания расплавленного порошка; *в* — вид дорожек, изготовленных при $t = 55$ мкм и $v = 420$ (1), 370 (2), 320 (3) и 270 мм/с (4)

подложки и создания совместного расплавленного бассейна с ПС. Расплавленный порошок образует округлую свободную поверхность (цилиндр) и имеет небольшую зону контакта с подложкой, что приводит к образованию прерывистой дорожки (рис. 6, *в*).

Это можно объяснить изменением тепловых условий сплавления дорожек: из-за теплопроводности и конвекции ПС уменьшается взаимодействие с подложкой, следовательно, снижается количество порошка, участвующего в процессе образования дорожек, и практически отсутствует проникновение в подложку.

Общее влияние параметров процесса на стабильность формирования ЕД приведено на рис. 7. Зеленым цветом показана область режимов, при которых получены ЕД со стабильными геометрическими размерами (высотой и шириной). Как видно из рисунка, при скорости сканирования $v = 40$ мм/с и толщине ПС $t = 45$ и 50 мкм достигнуты наилучшие показатели стабильности формирования ЕД.

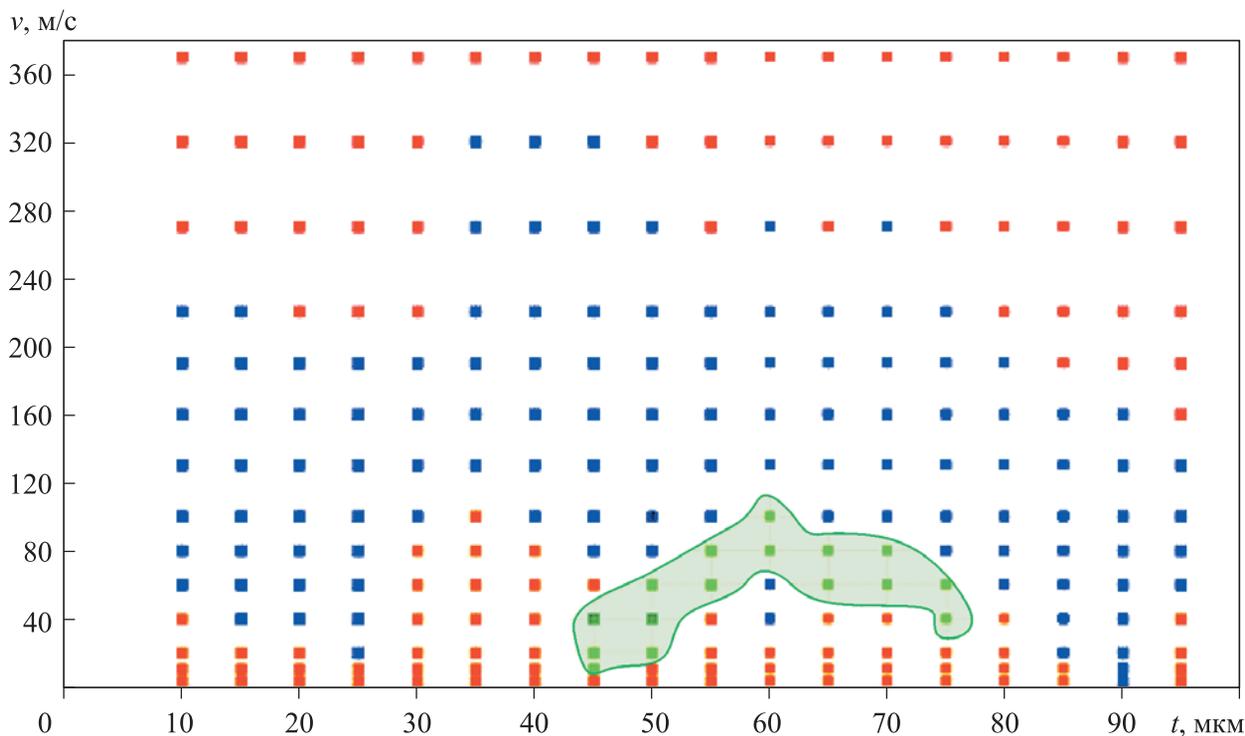


Рис. 7. Влияние скорости сканирования v и толщины ПС t на формирование дорожек:

■ и ■ — со стабильными и нестабильными геометрическими размерами; ■ — с наиболее стабильными размерами;
 ■ — с эффектом сфероидизации; ■ — с пережогами и испарениями

Выводы

1. Проведено исследование влияния двух параметров выращивания — скорости сканирования лазерного луча и толщины ПС — на стабильность формирования ЕД из жаропрочного медного сплава ПР-БрХ.

2. Полученные результаты показали, что использование относительно высокой скорости сканирования $v = 420$ и 370 мм/с приводит к

появлению эффекта сфероидизации и образованию несвязанных капель расплава. При скорости сканирования $v < 10$ мм/с наблюдается разбрызгивание расплавленного порошка, вследствие чего происходит нарушение стабильности формирования ЕД. Наилучшие показатели стабильности формирования ЕД с применением лазера мощностью 100 Вт достигнуты при скорости сканирования $v = 40$ мм/с и толщине ПС $t = 45$ и 50 мкм.

Литература

- [1] Zapico P., Giganto S., Martínez-Pellitero S., Fernández-Abia A.I., Castro-Sastre M.Á. Influence of laser energy in the surface quality of parts manufactured by selective laser melting. *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 2018, vol. 29, iss. 1, pp. 0279–0286, doi: 10.2507/29th.daaam.proceedings.040
- [2] Jafari D., Wits W.W. The utilization of selective laser melting technology on heat transfer devices for thermal energy conversion applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 91, pp. 420–442, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.109
- [3] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисуров А.И., Третьяков Р.С. *Лазерные аддитивные технологии в машиностроении*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 280 с.
- [4] Hou S., Qi S., Hutt D.A., Tyrer J.R., Mu M., Zhou Z. Three dimensional printed electronic devices realised by selective laser melting of copper/high-density-polyethylene powder mixtures. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, vol. 254, pp. 310–324, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.11.020

- [5] Joseph G., Kundig K.J.A. *Copper: 1st Trade, Manufacture, Use and Environmental Status*. United States of America, ASM International, 1999, pp. 49–55.
- [6] Yoshida K., Morigami H. Thermal properties of diamond/copper composite material. *Microelectronics Reliability*, 2004, vol. 44(2), pp. 303–308, doi: 10.1016/S0026-2714(03)00215-4
- [7] Ikeshoji T.-T., Nakamura K., Yonehara M., Imai K., Kyogoku H. Selective laser melting of pure copper. *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2017, vol. 70, iss. 3, pp. 396–400.
- [8] Kaden L., Matthaus G., Ullsperger T., Seyfarth B., Nolte S. Selective laser melting of copper using ultrashort laser pulses at different wavelengths. *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*, 2018, vol. 10523, no. art. 1052312, doi: 10.1117/12.2289959
- [9] Zhang D.Q., Liu Z.H., Chua C.K. Investigation on forming process of copper alloys via Selective Laser Melting. *Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research and Rapid Prototyping*, 2014, pp. 285–289.
- [10] Григорьянц А.Г., Колчанов Д.С., Дренин А.А. Установка для селективного лазерного плавления металлических порошков. *Аддитивные технологии: настоящее и будущее. В сб. мат. IV Международной конференции*, 30 марта 2018, Москва, ВИАМ, 2018, с. 221–234.
- [11] Tolochko N.K., Laoui T., Khlopkov Y.V., Mozzharov S.E., Titov V.I., Ignatiev M.B. Absorbance of powder materials suitable for laser sintering. *Rapid Prototyping Journal*, 2000, vol. 6(3), pp. 155–160, doi: 10.1108/13552540010337029
- [12] Григорьянц А.Г., Колчанов Д.С., Третьяков Р.С., Малов И.Е. Селективное лазерное плавление металлических порошков, выращивание тонкостенных и сетчатых структур. *Технология машиностроения*, 2015, № 10, с. 6–11.
- [13] 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
- [14] Anam M., Dilip J.J.S., Pal D., Stucker B. A short study on the fabrication of single track deposits in SLM and characterization. *Paper 27th Solid freeform fabrication symposium*, Austin, Texas, 2016, pp. 1644–1659.

References

- [1] Zapico P., Giganto S., Martínez-Pellitero S., Fernández-Abia A.I., Castro-Sastre M.Á. Influence of laser energy in the surface quality of parts manufactured by selective laser melting. *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 2018, vol. 29, iss. 1, pp. 0279–0286, doi: 10.2507/29th.daaam.proceedings.040
- [2] Jafari D., Wits W.W. The utilization of selective laser melting technology on heat transfer devices for thermal energy conversion applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 91, pp. 420–442, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.109
- [3] Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I., Tret'yakov R.S. *Lazernye additivnye tekhnologii v mashinostroenii* [Laser additive technologies in mechanical engineering]. Moscow, Bauman Press, 2018. 280 p.
- [4] Hou S., Qi S., Hutt D.A., Tyrer J.R., Mu M., Zhou Z. Three dimensional printed electronic devices realised by selective laser melting of copper/high-density-polyethylene powder mixtures. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, vol. 254, pp. 310–324, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.11.020
- [5] Joseph G., Kundig K.J.A. *Copper: 1st Trade, Manufacture, Use and Environmental Status*. United States of America, ASM International, 1999, pp. 49–55.
- [6] Yoshida K., Morigami H. Thermal properties of diamond/copper composite material. *Microelectronics Reliability*, 2004, vol. 44(2), pp. 303–308, doi: 10.1016/S0026-2714(03)00215-4
- [7] Ikeshoji T.-T., Nakamura K., Yonehara M., Imai K., Kyogoku H. Selective laser melting of pure copper. *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2017, vol. 70, iss. 3, pp. 396–400.

- [8] Kaden L., Matthaus G., Ullsperger T., Seyfarth B., Nolte S. Selective laser melting of copper using ultrashort laser pulses at different wavelengths. *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*, 2018, vol. 10523, no. art. 1052312, doi: 10.1117/12.2289959
- [9] Zhang D.Q., Liu Z.H., Chua C.K. *Investigation on forming process of copper alloys via Selective Laser Melting*. Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research and Rapid Prototyping, 2014, pp. 285–289.
- [10] Grigor'yants A.G., Kolchanov D.S., Drenin A.A. Installation for selective laser melting of metal powders. *Additivnye tekhnologii: nastoyashchee i budushchee. V sb. mat. IV Mezhdunarodnoy konferentsii* [Additive technologies: present and future. Proceedings of the IV International Conference]. 30 March 2018, Moscow, VIAM publ., 2018, pp. 221–234.
- [11] Tolochko N.K., Laoui T., Khlopkov Y.V., Mozzharov S.E., Titov V.I., Ignatiev M.B. Absorbance of powder materials suitable for laser sintering. *Rapid Prototyping Journal*, 2000, vol. 6(3), pp. 155–160, doi: 10.1108/13552540010337029
- [12] Grigor'yants A.G., Kolchanov D.S., Tret'yakov R.S., Malov I.E. Selective laser melting of metallic powders, growing thin-walled and mesh structures. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2015, no. 10, pp. 6–11 (in Russ.).
- [13] 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
- [14] Anam M., Dilip J.J.S., Pal D., Stucker B. A short study on the fabrication of single track deposits in SLM and characterization. *Paper 27th Solid freeform fabrication symposium*, Austin, Texas, 2016, pp. 1644–1659.

Статья поступила в редакцию 13.03.2019

Информация об авторах

ГРИГОРЬЯНЦ Александр Григорьевич — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Лазерные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: mcltlaser@gmail.com).

КОЛЧАНОВ Дмитрий Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: kolchanovdmitry@gmail.com).

ДРЕНИН Алексей Анатольевич — аспирант кафедры «Лазерные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: drenin@inbox.ru).

ДЕНЕЖКИН Антон Олегович — инженер-технолог, ООО «НПЦ Технологии инъекционного литья МГТУ им. Н.Э. Баумана» (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: denezhkin.anton95@gmail.com).

Information about the authors

GRIGORYANTS Aleksandr Grigorievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department, Laser Technologies in Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: mclt-laser@gmail.com).

KOLCHANOV Dmitriy Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: kolchanovdmitry@gmail.com).

DRENIN Aleksey Anatolievich — Postgraduate, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: drenin@inbox.ru).

DENEZHKIN Anton Olegovich — Manufacturing Process Engineer, ООО Research and Production Center for Technologies of Injection Molding, Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: denezhkin.anton95@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Григорьянц А.Г., Колчанов Д.С., Дренин А.А., Денежкин А.О. Влияние основных параметров процесса селективного лазерного плавления на стабильность формирования единичных дорожек при выращивании изделий из медных сплавов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 6, с. 20–29, doi: 10.18698/0536-1044-2019-6-20-29

Please cite this article in English as:

Grigoryants A.G., Kolchanov D.S., Drenin A.A., Denezhkin A.O. Influence of the Main Parameters of Selective Laser Melting on Stability of Single Track Formation when 'Growing' Parts from Copper Alloys. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 6, pp. 20–29, doi: 10.18698/0536-1044-2019-6-20-29



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие
Ю.М. Астапова, В.А. Велданова, С.А. Люшнина

**«Системы наведения и управления
высокоточных боеприпасов»**

Издание содержит анализ основных особенностей функционирования систем управления высокоточных боеприпасов на этапах баллистического полета и наведения на цель. Рассмотрены вопросы проектирования систем управления высокоточных боеприпасов, в том числе систем непрерывного и импульсного наведения, а также методы математического моделирования их функционирования. Особое внимание уделено оптическим, радиолокационным, телевизионным и инфракрасным головкам самонаведения.

В основу учебного пособия положен курс лекций, который был прочитан проф. Ю.М. Астаповым на кафедре «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов, обучающихся по специальности 17.05.01 «Боеприпасы и взрыватели», и аспирантов, обучающихся по направлению подготовки 17.06.01 «Оружие и системы вооружения». Пособие может быть использовано студентами для проработки лекционных курсов и выполнения другой самостоятельной работы, предусмотренной учебным планом.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru