

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ВЫРАЩИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОРОШКА АЛЮМИНИЯ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

И.И. Бинков

crockinline@yandex.ru

SPIN-код: 8872-9979

Д.В. Повалюхин

dan2103@mail.ru

SPIN-код: 3871-0727

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

В настоящее время аддитивные технологии обладают хорошими перспективами применения. Повышение качества деталей, полученных методом селективного лазерного плавления, является на данный момент актуальным направлением деятельности в области аддитивных технологий. В частности, такой показатель, как пористость, оказывает существенное влияние на прочностные характеристики конечной детали. Рассмотрен метод оценки значений пористости образцов, выращенных из алюминиевого порошка, альтернативный применяемым на кафедре МТ-12 методам. Сделаны выводы о влиянии подводимой удельной энергии на образование пор, их количество и микротвердость в различных зонах образцов.

Ключевые слова

Аддитивные технологии, пористость, микротвердость, алюминиевый порошок, селективное лазерное плавление, метод исследования, режимы выращивания, оптимизация

Поступила в редакцию 07.05.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. Одним из основных недостатков деталей, полученных методом селективного лазерного плавления, как и другими методами аддитивных технологий, являются пониженные прочностные характеристики по сравнению с характеристиками, полученными традиционными методами производства для целого ряда материалов. В частности, почти неизбежное наличие пор оказывает отрицательное влияние на микротвердость и прочность. Вариация режимов, при которых происходит изготовление деталей, является, пожалуй, главным инструментом влияния на конечное качество образцов.

Очевидно, что для отработки технологии выращивания необходимо проводить замеры пористости, что может быть крайне трудо- и времезатратно при большом числе исследуемых образцов. Поиск более простых способов измерения заметно облегчит проведение экспериментов.

Условия эксперимента и оборудование. Для этой работы была использована установка СЛП-110, имеющая иттербиевый волоконный лазер ($\lambda = 1,07$ мкм) мощностью 100 Вт и размером рабочей области в $110 \times 110 \times 110$ мм. Профиль пучка имел Гауссову форму (рис. 1), диаметр пятна составлял 50 мкм.

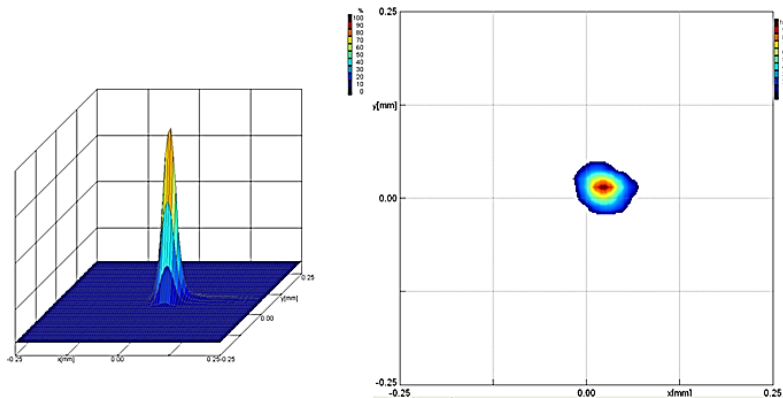


Рис. 1. Профиль и диаметр пучка

Процесс проводили в герметичной камере, заполненной инертным газом аргоном для предотвращения образования оксидов материала выращивания. Схема установки представлена на рис. 2.

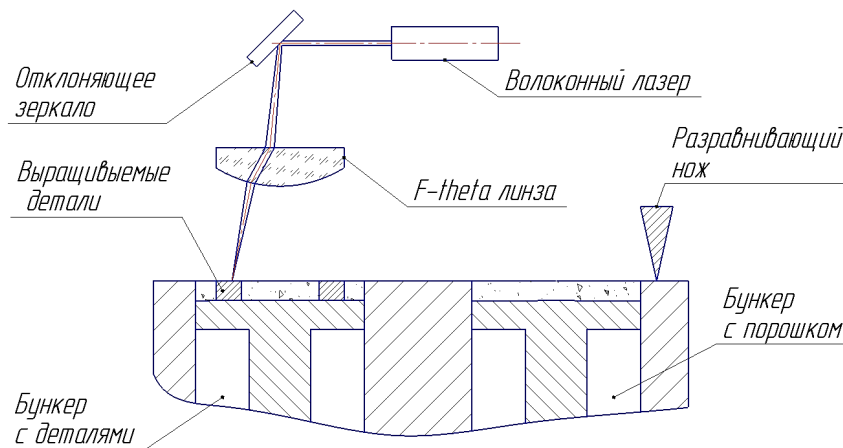


Рис. 2. Схема установки СЛП-110

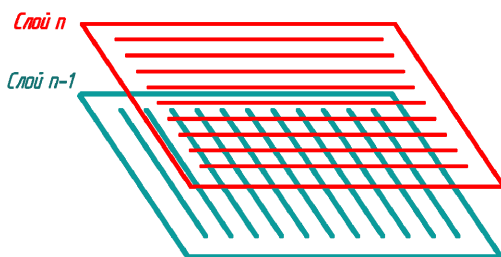


Рис. 3. Схема движения лазерного луча

Траектория движения луча — прямые параллельные линии с постоянным шагом, заполняющие площадь сечения выращиваемого изделия. В каждом втором слое осуществляется поворот направления движения на 90° [1]. Схема движения показана на рис. 3.

Для проведения металлографических исследований на пластине из стали Ст 10 длиной 110 мм, шириной 110 мм и толщиной 2,5 мм были выращены 9 кубических образцов размерами $9 \times 9 \times 9$ мм из алюминиевого порошка марки

АСП27-0.5Cr [2] со средним размером фракции $D_{50} = 27$ мкм [3]. В ходе выращивания варьировались следующие параметры: скорость сканирования V , мощность излучения P , расстояние между штрихами h ; высота слоя была постоянной. Для обобщения результатов и для возможности составления сравнительных выводов по работе, был введен показатель удельной энергии E_y , Вт/мм³, показывающий количество энергии, подведенной к единице объема. Удельная энергия рассчитывалась по формуле

$$E_{уд} = \frac{P}{VHh},$$

где P — мощность, Вт; V — скорость сканирования, м/с; H — высота слоя, мм; h — расстояние между штрихами, мм.

Параметры режимов для каждого из образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы выращивания

№ п/п	V , м/с	P , Вт	H , мкм	h , мкм	E_y , Дж/мм ³
1	800	100	25	40	125
2	800	80	25	40	100
3	800	80	25	30	133
4	900	100	25	40	111
5	900	80	25	40	89
6	900	80	25	30	119
7	1000	100	25	40	100
8	1000	80	25	40	80
9	1000	80	25	30	107

Далее были сделаны шлифы образцов с последующим травлением поверхности, которая была изучена на микроскопе Olympus SZ-61 при увеличении $\times 100$ с цифровым выводом изображения на экран. Каждый шлиф изучали в шести различных областях среза (рис. 4). После замеров площади пор к общей площади единичного изображения составлены выводы о порообразовании.

Микротвердость металла деталей измеряли с применением универсального твердомера Виккерса EmcoTest DuraScan 20, использовали нагрузку на инденторе 25 г, что соответствует силе 2,453 Н (соответствующие измерения обозначены $HV_{0,025}$). Измерения отпечатков осуществляли вручную, увеличение объектива составляло $\times 1000$. Измерения проводили по трем точкам в каждой из шести зон.

Результаты экспериментов. Пористость. После измерений пористости были получены результаты, по которым составлены графики, наглядно отображающие зависимость средней пористости от удельной энергии (рис. 5, 6).

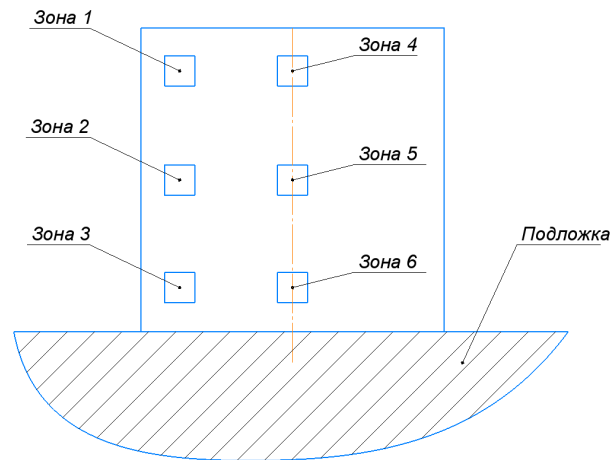


Рис. 4. Зоны измерения пористости и микротвердости

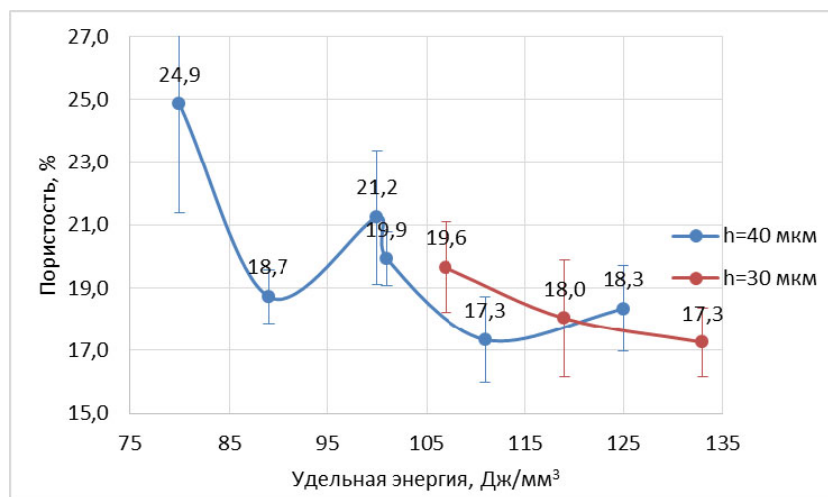


Рис. 5. Зависимость средней пористости всех зон каждого образца от удельной энергии

На рис. 6 также приведена зависимость пористости от удельной энергии, однако в этот раз были исключены значения пористости в зонах 3 и 6 (см. рис. 4), которые находятся вблизи подложки. Данное решение обоснованно тем, что, как правило, при выращивании деталей вблизи подложки создаются вспомогательные подпорки, возвышающие деталь и препятствующие ее короблению. Подпорки по завершении процесса удаляют, поэтому рассмотрение проблем порообразования в них не является приоритетом. Как будет показано позже, от этих зон наблюдается повышенный теплоотвод в подложку, что довольно сильно влияет на порообразование [4, 5].

В табл. 2 представлены результаты, условно отформатированные в цветовой диаграмме и расположенные в порядке возрастания удельной энергии. Видно, что внизу образца наблюдается сильное увеличение пористости почти во всех образцах, как и было сказано ранее.

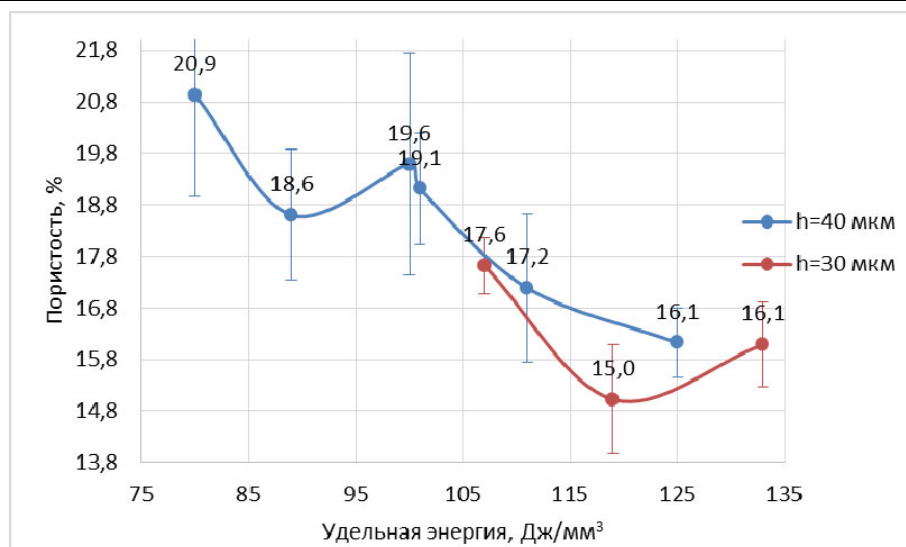


Рис. 6. Зависимость средней пористости всех зон (за исключением 3 и 6) каждого образца от удельной энергии

Таблица 2

Средние результаты пористости образцов 1-9, отформатированные в цвете

Номер образца	Номер зоны						Удельная энергия
	1	2	3	4	5	6	
1	23,6	16,37	23,16	20,62	35,16	30,23	80
2	20,18	14,5	18,36	21,37	18,31	19,62	89
3	13,46	18,85	18,64	27,41	24,46	24,64	100
4	19,48	19,71	19,05	18,21	23,11	20	100
5	17,76	17,04	17,79	17,89	27,05	20,35	107
6	16,61	13,46	23,69	14,98	15,79	19,51	111
7	17,94	11,33	17,52	13,3	23,86	24,24	119
8	13,13	16,19	18,46	16,72	22,06	23,5	125
9	13,65	14,09	19,19	17,44	18,25	20,93	133

Микротвердость. Микротвердость является одним из главных показателем механических свойств. Были исследованы зависимости твердости ($HV_{0,025}$) в различных зонах образцов от таких параметров, как мощность, скорость сканирования, расстояние между штрихами, пористость (рис. 7).

Результаты показывают, что при увеличении удельной энергии от 80 до 135 Дж/мм³ микротвердость заметно уменьшается вдоль направления Z. Теоретически:

- при увеличении скорости сканирования V_s средняя микротвердость образцов должна увеличиваться вследствие высокой скорости затвердевания (табл. 3);
- при уменьшении мощности излучения получают образцы с более высокими характеристиками твердости (рис. 8).

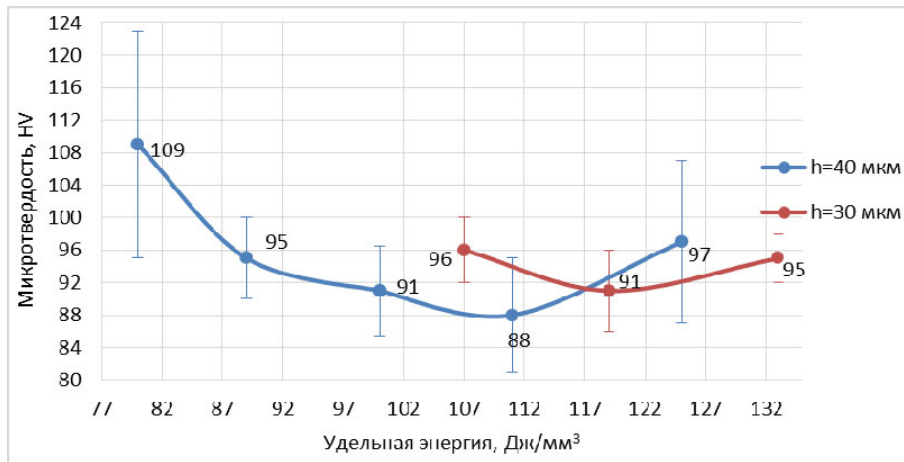


Рис. 7. Зависимость средней микротвердости зон каждого образца от удельной энергии

Однако отдельное рассмотрение данных зависимостей мощности (80...100 Вт) и скорости сканирования (800...1000 мм/с) от средней микротвердости образцов в плоскости YZ не дает четкого понимания механизма взаимодействия [6, 7].

Таблица 3

Пример прослеживания зависимости средней микротвердости от скорости сканирования, отформатировано в цвете

Параметр	Номер образца		
	2	5	8
Средняя микротвердость в образце, HV _{0,025}	90,8	94,7	108,7
Скорость сканирования, мм/с	800	900	1000

Средняя пористость в пределах полученных результатов (15...25 %) практически не оказывает влияния на микротвердость образцов.

Изменение расстояния между штрихами, находящееся в диапазоне 30...40 мкм, также не выявлено как механизм влияния на данный механический параметр, однако теоретически данная зависимость прослеживается и выявляется в некоторых ранних исследованиях [8].

Метод измерения. На данный момент на кафедре МТ-12, где проводились исследования, используется оптический микроскоп с предлагающимся к нему программным обеспечением, которое позволяет с высокой точностью измерять различную геометрию на фотографиях. Однако этот метод полностью ручной и требует большого вложения времени, что отрицательно сказывается на сроках проводимых работ, так и на точности измерений, если учитывать человеческий фактор.

Для подобных изысканий было предложено использовать сторонний софт — Adobe Photoshop CC. Благодаря широкому спектру настроек можно с хорошей долей уверенности автоматизировать вычисление пористости, и не только. Это

позволяет сэкономить немало времени и, соответственно, обрабатывать больший массив данных. Особенно хорошо этот метод показал себя на алюминиевых образцах благодаря контрастности пор и основного металла. Суть этого метода демонстрируется на рис. 9.

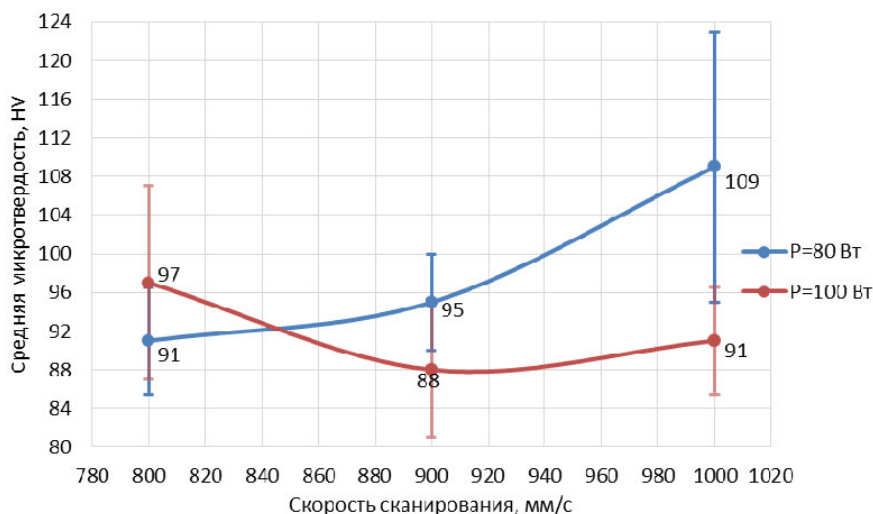
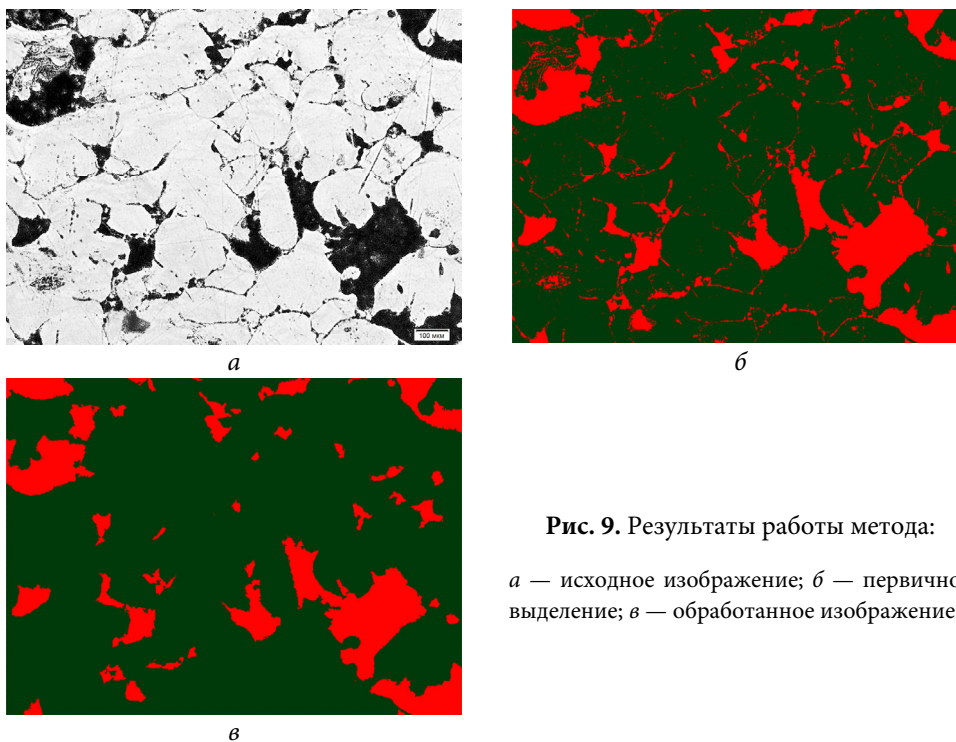


Рис. 8. Зависимость средней микротвердости всех зон образцов 2, 5 и 8 от скорости сканирования. Режим выращивания: $P = 80$ Вт; $h = 40$ мкм



Программа автоматически подсчитывает количество красных и зеленых пикселей, которые потом сравниваются вручную, и выводит процентное соотношение пористости (рис. 9).

Среди недостатков метода можно отметить не полную автоматизацию процесса: зачастую необходим индивидуальный подход к некоторым снимкам как во время выделения дефектов, так и при регулировании постобработки изображений. Также наблюдается небольшое расхождение результатов в несколько (как правило, 5–7) процентов по сравнению с ручным способом. Несмотря на свое несовершенство метод все же является полезным инструментом в подобных проектах.

Заключение. По результатам измерений видно, что пористость образцов напрямую зависит от вкладываемой энергии на единицу объема; тенденция увеличения сплошности кубиков видна на обоих графиках.

Общая пористость деталей — неудовлетворительная [9, 10]. Следуя графикам, показанным на рис. 6, необходимо повышать количество подводимой энергии для получения образцов лучшего качества. В частности, желательно увеличивать мощность излучения для сохранения производительности на том же уровне. Можно уменьшить скорость сканирования, однако это приведет к дополнительным затратам времени.

Средняя пористость в пределах полученных результатов (15...25 %) практически не оказывает влияние на микротвердость образцов.

Выводы. В ходе проведения работы были сделаны выводы о влиянии удельной энергии на порообразование и микротвердость выращенных деталей. Сделаны заключения о причинах появления пор в нижних слоях. Сформированы рекомендации по дальнейшей оптимизации технологических параметров для получения изделий лучшего качества. Найден альтернативный метод проведения измерений по снимкам поверхности образцов.

Литература

- [1] Eleftherios L., Fox P., Christopher J.S. Selective laser melting of aluminium components. *J. Mater. Process. Technol.*, 2011, vol. 211, no. 2, pp. 275–284.
DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.09.019
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013610003018>
- [2] EOS Aluminium AlSi10Mg. Material data sheet – FlexLine. *eos.info: веб-сайт*.
URL: https://cdn0.scrvt.com/eos/f3f4bf485d78f2dd/b010c05abe97/AlSi10Mg-090-M400_Flexline_Material_data_sheet_09-15_en.pdf (дата обращения: 12.04.2019).
- [3] Konrad B., Sven U., Thomas F., et al. New developments of laser processing aluminum alloys via additive manufacturing technique. *Phys. Procedia*, 2011, vol. 12, p. A, pp. 393–401.
DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.050
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389211001295>
- [4] Yagi S., Kuni D. Studies on effective thermal conductivities in packed beds. *AIChE J.*, 1957, vol. 3, no. 3, pp. 373–381. DOI: 10.1002/aic.690030317
URL: <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/aic.690030317>

- [5] Gusarov A.V., Kruth J.-P. Modelling of radiation transfer in metallic powders at laser treatment. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2005, vol. 48, no. 16, pp. 3423–3434.
DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.01.044
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931005002012>
- [6] Buchbinder D., Schleifenbaum H., Heidrich S., et al. High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts. *Phys. Procedia*, 2011, vol. 12, p. A, pp. 271–278.
DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.035
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389211001143>
- [7] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
- [8] Li Y., Gu D. Parametric analysis of thermal behavior during selective laser melting additive manufacturing of aluminum alloy powder. *Mater. Des.*, 2014, vol. 63, pp. 856–867.
DOI: 10.1016/j.matdes.2014.07.006
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306914005330>
- [9] Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М., Машгиз, 1951.
- [10] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. Лазерная сварка металлов. М., Высшая школа, 1988.

Бинков Иван Игоревич — студент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Повалюхин Даниил Васильевич — студент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Колчанов Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**OPTIMIZATION OF THE MODES OF GROWING DETAILS
FROM ALUMINUM POWDER BY THE SELECTIVE
LASER MELTING METHOD**

I.I. Binkov

crockinline@yandex.ru

SPIN-code: 8872-9979

D.V. Povalyuhin

dan2103@mail.ru

SPIN-code: 3871-0727

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Currently, additive technologies have good prospects for use. Improving the quality of parts obtained by the selective laser melting method is currently an important area of activity in the field of additive technologies. In particular, such an indicator as porosity has a significant impact on the strength characteristics of the final part. This article reviews the method of estimating the porosity values of samples grown from aluminum powder, an alternative to the methods used at the department MT-12. Conclusions are drawn about the effect of the input specific energy on the formation of pores, their number and microhardness in various zones of the samples.

Keywords

Additive technologies, porosity, microhardness, aluminum powder, selective laser melting, research method, growing modes, optimization

Received 07.05.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Eleftherios L., Fox P., Christopher J.S. Selective laser melting of aluminium components. *J. Mater. Process. Technol.*, 2011, vol. 211, no. 2, pp. 275–284.
DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.09.019
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013610003018>
- [2] EOS Aluminium AlSi10Mg. Material data sheet – FlexLine. *eos.info: website*.
URL: https://cdn0.scrvt.com/eos/f3f4bf485d78f2dd/b010c05abe97/AlSi10Mg-090-M400_Flexline_Material_data_sheet_09-15_en.pdf (accessed: 12.04.2019).
- [3] Konrad B., Sven U., Thomas F., et al. New developments of laser processing aluminum alloys via additive manufacturing technique. *Phys. Procedia*, 2011, vol. 12, p. A, pp. 393–401.
DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.050
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389211001295>
- [4] Yagi S., Kuni D. Studies on effective thermal conductivities in packed beds. *AIChE J.*, 1957, vol. 3, no. 3, pp. 373–381. DOI: 10.1002/aic.690030317
URL: <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/aic.690030317>
- [5] Gusarov A.V., Kruth J.–P. Modelling of radiation transfer in metallic powders at laser treatment. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2005, vol. 48, no. 16, pp. 3423–3434.
DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.01.044
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931005002012>
- [6] Buchbinder D., Schleifenbaum H., Heidrich S., et al. High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts. *Phys. Procedia*, 2011, vol. 12, p. A, pp. 271–278.
DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.035
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389211001143>

- [7] Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. Tekhnologicheskie protsessy lazernoy obrabotki [Technological processes of laser processing]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006 (in Russ.).
- [8] Li Y., Gu D. Parametric analysis of thermal behavior during selective laser melting additive manufacturing of aluminum alloy powder. *Mater. Des.*, 2014, vol. 63, pp. 856–867. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.07.006
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306914005330>
- [9] Rykalin N.N. Raschety teplovykh protsessov pri svarke [Heat calculations at the welding process]. Moscow, Mashgiz Publ., 1951 (in Russ.).
- [10] Grigor'yants A.G., Shiganov I.N. Lazernaya svarka metallov [Laser welding of metals]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988 (in Russ.).

Binkov I.I. — Student, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Povalyuhin D.V. — Student, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Kolchanov D.S., Cand. Sc. (Eng.), Assis. Professor, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.