



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ВЫРАЩИВАНИЯ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ НА ПОРИСТОСТЬ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ МЕДНЫХ СПЛАВОВ

Д. С. Колчанов¹, kolchanovdmitry@gmail.com;
А. А. Дренин¹, drenin@inbox.ru;
А. О. Денежкин², denezhkin.anton95@gmail.com;
А. П. Симонов², simonovleshka@yandex.ru
¹ООО «Московский Центр Лазерных Технологий»,
Москва, Россия
²МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Приведены результаты исследования зависимости пористости изделий, выращенных методом селективного лазерного плавления из порошков медных сплавов, от рабочих параметров процесса: скорости сканирования лазерного луча и удельной энергии. Определены границы режимов, обеспечивающих минимальную пористость при формировании стабильной единичной сплавленной дорожки.

Статья поступила в редакцию 17.12.2018
Статья принята к публикации 18.01.2019

ВВЕДЕНИЕ

Процесс селективного лазерного плавления (СЛП) используется для создания сложных структур и компонентов на основе трехмерных CAD-моделей. Технология СЛП, во-первых, позволяет напрямую создавать готовые детали, во-вторых, она экономически выгодна для производства единичных или мелкосерийных партий изделий. Медь и сплавы на ее основе представляют большой интерес для производителей благодаря своей высокой теплопроводности и электропроводности. Но из-за низкого коэффициента поглощения этими материалами лазерного излучения и их высокой теплопроводности на практике оказывается, что для получения стабильной и плотной структуры требуется использовать мощные лазерные источники на длинах волн $\Delta\lambda=1-10$ мкм и применять низкую скорость сканирования луча. При создании изделий возникают проблемы при

STUDY OF THE EFFECT OF GROWING MODES BY SELECTIVE LASER MELTING METHOD ON POROSITY IN COPPER ALLOY PRODUCTS

D. S. Kolchanov¹, kolchanovdmitry@gmail.com;
A. A. Drenin¹, drenin@inbox.ru;
A. O. Denezhkin², denezhkin.anton95@gmail.com;
A. P. Simonov², cimonovleshka@yandex.ru
¹LLC "Moscow Center of Laser Technology", Moscow,
Russia
²N. E. Bauman MGTU, Moscow, Russia

The results of the study of the dependence of the porosity of products grown from copper alloy powders by selective laser melting method on the process operating parameters: laser beam scanning speed and the specific energy are presented. The boundaries of the modes that provide the minimum porosity during the formation of a stable single fused path are determined.

Article was received on 03.12.2018
Article accepted for publication on 24.12.2018

INTRODUCTION

The process of selective laser melting (SLM) is used to create complex structures and components based on three-dimensional CAD models. The SLM technology, firstly, allows you to directly create finished parts, and secondly, it is cost-efficient for the production of single or small-scale batches of products. Copper and copper-based alloys are of great interest to manufacturers due to their high thermal conductivity and electrical conductivity. But due to the low absorption of laser radiation by these materials and their high thermal conductivity, it turns out in practice that to obtain a stable and dense structure, it is necessary to use high-power laser sources at wavelengths $\Delta\lambda=1-10$ μm and to use a low beam scanning speed. When creating products, problems arise in the formation of single fused paths, and this often limits the ability to grow quality products.

The analysis of the results of foreign studies showed that selective laser melting of copper is carried out using laser sources with a power of 800–1200 W [1]. Therefore, industrial complexes for the SLM process require the setting of high-power laser sources up to 1500 watts. In some cases, even two lasers with a power of 400 and 1000 W are installed. This set-up leads to a multiple increase in the price of the final product. The works are known, where the process of solid phase [2–4]

формировании единичных сплавленных дорожек, и это зачастую ограничивает возможности выращивания качественного изделия.

Анализ результатов зарубежных исследований показал, что селективное лазерное плавление меди осуществляется с использованием лазерных источников мощностью 800–1200 Вт [1]. Поэтому промышленные комплексы для СЛП-процесса требуют установки лазерных источников высокой мощности до 1500 Вт. В ряде случаев устанавливают даже два лазера мощностью 400 и 1000 Вт. Такая компоновка приводит к многократному возрастанию цены конечного изделия. Известны работы, где процесс твердофазного [2–4] и жидкофазного спекания медных порошковых композиций, в том числе с добавлением легкоплавких элементов [5–7], проведен с использованием лазерного излучения низкой мощности. В работах [8, 9] проанализировано влияние параметров СЛП-процесса на формирование микроstructures и плотность образцов из меди (C184000). При использовании двух лазеров 400 и 1500 Вт в процессе селективного лазерного плавления были получены образцы с плотностью 96%. Обнаружено, что лазерный источник с пучком, имеющим равномерное распределение плотности энергии в сечении, обеспечивает создание изделий с более высокой относительной плотностью, чем источник, распределение плотности энергии в сечении которого подчиняется нормальному закону Гаусса. Эксперименты, проведенные под руководством З.Мао [10], показали, что мощность лазерного излучения оказывает сильное влияние на относительную плотность образцов Cu-4Sn и их твердость по Виккерсу. В работе [11] для селективного лазерного плавления меди авторы использовали CO₂-лазер мощностью 200 Вт и газораспыленный чистый медный порошок со средним размером диаметра 35,52 мкм. При варьировании режимов выращивания исследователи получили образец с относительной плотностью материала более 88%.

Однако серийные установки для СЛП нередко оснащены не CO₂-, а твердотельными лазерными излучателями, у которых максимальная мощность не превышает 100 Вт. Такие промышленные установки предназначены для выращивания изделий из алюминия, кобальта-хрома, титана и различных сталей. Но из-за более низкого поглощения лазерного излучения и большой теплопроводности меди и медных сплавов требуется подбор и определение оптимальных параметров процесса СЛП для выращивания из меди и медных сплавов при максимальной мощности лазерного источника менее 100 Вт.

Целью исследования стало изучение зависимости пористости образцов от параметров процесса

and liquid phase sintering of the copper powder compositions, including with the addition of the fusible element [5–7], was conducted using low power laser light. In [8, 9], the influence of the parameters of the SLM process on the formation of the microstructure and the density of samples from copper (C184000) was analyzed. When using two 400 and 1500 W lasers in the process of selective laser melting, the samples with a density of 96% were obtained. It was found that a laser source with a beam having a uniform cross-section distribution of energy density provides for the creation of products with a higher relative density than the source, the distribution of the energy density in the cross section of which obeys the normal Gauss law. The experiments headed by Z. Mao [10] showed that the laser power has a strong influence on the relative density of Cu-4Sn samples and their Vickers hardness. In [11], the authors used a CO₂ laser with a power of 200 W and gas-sprayed pure copper powder with an average diameter of 35.52 μm for selective laser melting of copper. By varying the growing modes, the researches received a sample with a relative density of the material over 88%.

However, serial installations for SLM are often equipped not with CO₂ lasers, but with solid-state laser emitters where the maximum power does not exceed 100 W. Such industrial installations are designed for growing products from aluminum, cobalt-chromium, titanium and various steels. But because of the lower absorption of laser radiation and the high thermal conductivity of copper and copper alloys, it is necessary to select and determine the optimal parameters of the SLM process for growing from copper and copper alloys with a maximum laser source power less than 100 W.

The goal of the study was to examine the dependence and porosity of the samples on the parameters of the growing process from various materials based on copper. It was decided, on the basis of the results obtained, to identify the limits of variation of parameters on the SLM set-up with a laser power not exceeding 100 W to create the samples with high relative density

EQUIPMENT

Growth experiments were carried out on the installation for selective laser melting SLP-110 [12]. The set-up is equipped with a continuous fiber ytterbium laser with a maximum power of 100 W, the spot diameter at the focus is 50 μm , the treatment field is 110 × 110 mm (Fig. 1). The growing process was carried out in a chamber with a controlled atmosphere, from which air was preliminarily evacuated and then protective gas (argon) was pumped in. Pre-evacuation allows for clearing not only the working volume of the chamber, but also the space between the metal powders in the feed hopper. The movement of the growing bunker and the feeding bunker was implemented using a ball screw with a stepper motor (5 μm pitch).

выращивания из различных материалов на основе меди. Было принято решение, на основе полученных результатов выявить границы варьирования параметров на СЛП-установке с лазером мощностью не более 100 Вт для создания образцов с высокой относительной плотностью

ОБОРУДОВАНИЕ

Эксперименты по выращиванию были проведены на установке для селективного лазерного плавления СЛП-110 [12]. Установка оснащена непрерывным волоконным иттербиевым лазером с максимальной мощностью 100 Вт, диаметр пятна в фокусе 50 мкм, поле обработки 110×110 мм (рис. 1). Процесс выращивания проводился в камере с контролируемой атмосферой, из которой предварительно откачивается воздух и затем закачивается защитный газ (аргон). Предварительная откачка позволяет очистить не только рабочий объем камеры, но и пространство между металлическими порошинками в бункере-питателе. Перемещение бункера выращивания и бункера подачи реализовано с помощью шарико-винтовой передачи с шаговым двигателем (шаг 5 мкм).

Гранулометрический анализ порошков 99,7% Cu и ПР-BrX был проведен с помощью анализатора размера частиц HORIBALA-350. Диапазон измерения частиц простирается от 100 нм до 1000 мкм. В основе работы анализатора лежит метод лазерной дифрактометрии, вычислительный алгоритм построен в соответствии с теорией рассеяния Ми. Источник излучения – лазерный диод ($\lambda=605$ нм, $P=5$ мВт), детектор – 64 фотодиода, расположенные на логарифмической спирали, 6 кремниевых фотодиодов используются для анализа обратного рассеяния.



Рис. 1. Установка селективного лазерного плавления СЛП-110

Fig. 1. SLP-110 Selective laser melting installation

The granulometric analysis of the powders 99.7% Cu and PR-BrH was carried out using a particle size analyzer (HORIBALA-350). The measurement range of particles extends from 100 nm to 1000 μ m. The analyzer is based on the laser diffraction method; the computational algorithm is designed in accordance with the Mie scattering theory. The radiation source is a laser diode ($\lambda=605$ nm, $P=5$ mW), the detector is 64 photodiodes located on a logarithmic spiral, 6 silicon photodiodes are used for backscatter analysis.

Microstructure studies were performed using metallographic analysis of transverse thin sections, for which a combined machine for automatic and manual cutting



Рис. 2. Оборудование для подготовки металлографических образцов

Fig. 2. Equipment for preparing metallographic samples

Таблица 1. Химический состав порошка ПР-БрХ, %
Table 1. Chemical composition of PR-BrH powder, %

| Fe | Cr | Cu | Zn |
|-------|-------|-----------|-------|
| <0,08 | 0,4–1 | 98,5–99,6 | < 0,3 |

Исследования микроструктуры выполняли с помощью металлографического анализа поперечных шлифов, для получения которых использовали комбинированный станок для автоматической и ручной резки StruersDiscotom-6 (рис. 2b). Для горячей запрессовки полученных образцов использовали автоматический электрогидравлический пресс StruersCitoPress-20 (рис. 2a). Шлифовка и полировка образцов осуществлялись на автоматической шлифовально-полировальной системе StruersTegramin-30 (рис. 2c).

Морфологический анализ порошков ПР-БрХ из чистой меди проводили на металлургическом инвертированном микроскопе OlympusGX-51. Микроскоп оснащен цифровой камерой Altra 20 (разрешение 2 МП; глубина цвета 10 бит), обработка изображений проводилась в системе автоматизированного анализа изображений «SIAMSPhotolab».

Для создания плотных образцов в установке с лазером мощностью 100 Вт проводили подогрев подложки построения, что позволяло компенсировать влияние высокой теплопроводности и снижало термические напряжения. Специалистам известно, что повышение температуры материала приводит к увеличению его коэффициента поглощения. Поэтому подогрев подложки выращивания проводили до 250 °С с помощью плоского керамического нагревателя. Температура подогрева контролировалась с помощью термодатчика хромель-алюмель с чувствительностью 41 мВ/°С.

МАТЕРИАЛ

В исследовании использовали относительно чистый медный порошок (99,7% Cu) и порошок жаропрочной бронзы ПР-БрХ (химический состав порошков приведен в табл. 1 и 2). Порошки различались средним диаметром частиц: ПР-БрХ имел диаметр 31,84 мкм; порошок 99,7% Cu – 48,67 мкм. Распределения частиц порошка 99,7%Cu и ПР-БрХ по среднему размеру диаметра представлены на рис. 4.

Морфологический анализ показал, что гранулы порошков ПР-БрХ из чистой меди имеют сферическую форму (рис. 5 и 6).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В ходе эксперимента из двух типов порошков были получены кубические образцы 8×8×8 мм на режимах,

Таблица 2. Химический состав порошка 99,7% Cu, %
Table 2. Chemical composition of the powder 99.7% Cu, %

| Cu | Fe | Pb | S | Zn | Sn |
|------|-----|------|------|------|------|
| 99,7 | 0,1 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,06 |

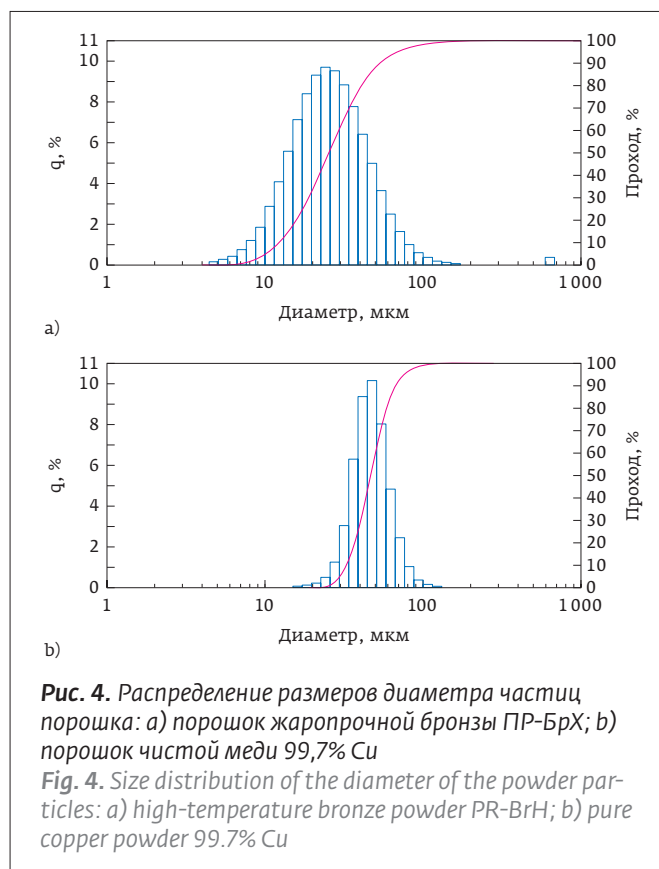
(StruersDiscotom-6) was used (Fig. 2b). An automatic electro-hydraulic press (StruersCitoPress-20) was used for hot pressing of the obtained samples (Fig. 2a). Grinding and polishing of the samples was carried out on an automatic grinding and polishing system (StruersTegramin-30) (Fig. 2c).

The morphological analysis of PR-BrH powders of pure copper were performed on an inverted metallurgical microscope (OlympusGX-51). The microscope is equipped with a digital camera Altra 20 (2 MP resolution; 10 bits color depth), image processing was carried out using the system of automated image analysis (SIAMSPhotolab).

To create dense samples in an installation with a 100 W laser, heating of the substrate was carried out, which made it possible to compensate for the effect of high thermal conductivity and reduced thermal stresses. It is obvious to those skilled in the art that increase in the temperature of the material leads to an increase in its absorption coefficient. Therefore, heating of the growth substrate was carried out up to 250 °C using a flat ceramic heater. The heating temperature was controlled using a chromel/alumel thermocouple with a sensitivity of 41 mV/°C.



Рис. 3. Микроскоп OlympusGX-51
Fig. 3. Microscope OlympusGX-51



отличающихся значениями скорости сканирования (рис. 7).

Для построения образцов с высокой относительной плотностью важно, чтобы ванна расплава формировала стабильную единичную дорожку – без капель и оголенных участков. В проведенных экспериментах диаметр пятна, расстояние между дорожками

MATERIAL

A relatively pure copper powder (99.7% Cu) and high-temperature bronze powder PR-BrH (the chemical composition of the powders is given in Tables 1 and 2) were used in the study. The powders differed in average particle diameter: PR-BrH had a diameter of 31.84 microns; 99.7% Cu powder – 48.67 microns. The distribution of powder particles of 99.7% Cu and PR-BrH by the average size of the diameter is shown in Fig. 4.

The morphological analysis showed that the granules of PR-BrH powders with respect to pure copper have a spherical shape (Fig. 5 and 6).

EXPERIMENTAL METHOD

In the course of the experiment, cubic samples of $8 \times 8 \times 8$ mm were obtained from the two types of powders in modes differing in scan rate values (Fig. 7).

In order to build samples with high relative density it is important that the bath melt formed a stable single path – without drops and bare spots. In the experiments, the spot diameter, the distance between the paths and the power were left unchanged. The results of the experiments were brought to a single parameter of specific energy E , which summarizes the main parameters of laser processing. This parameter is convenient for comparing the results of experiments conducted on various types of equipment with different operating parameters characterizing a particular installation:

$$E = P / v \cdot l \cdot h,$$

where P is the laser emission power, v is the scanning speed, l is the distance between the paths, h is the height of the layer.

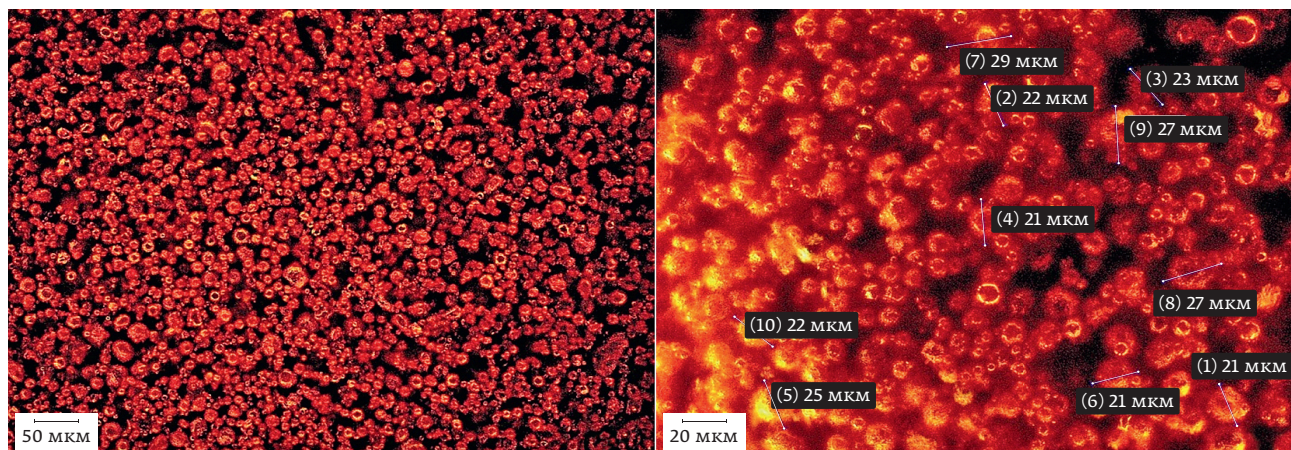


Рис. 5. Гранулы порошка ПР-БрХ, единица измерения шкалы микроскопа 50 мкм (слева) и 20 мкм (справа)

Fig. 5. PR-BrH powder granules, microscope measuring scale unit 50 μ m (left) and 20 μ m (right)

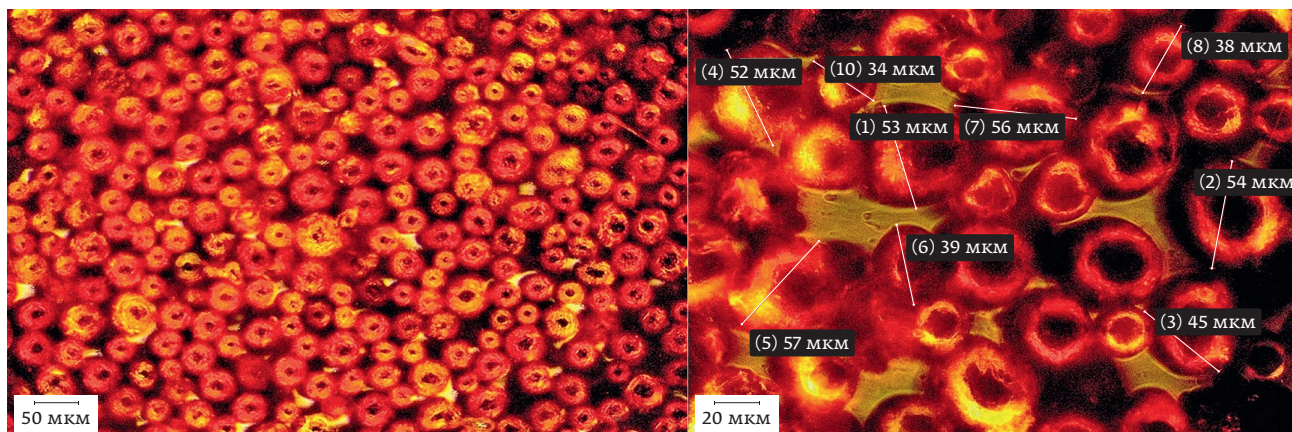


Рис. 6. Гранулы порошка относительно чистой меди, единица измерения шкалы микроскопа 50 мкм (слева) и 20 мкм (справа)
Fig. 6. Relatively pure copper powder granules, microscope measuring scale unit 50 μm (left) and 20 μm (right)

и мощность оставляли неизменными. Результаты экспериментов были приведены к единому параметру удельной энергии E , который обобщает основные параметры лазерной обработки. Такой параметр удобен для сравнения результатов экспериментов, проведенных на различных видах оборудования с отличающимися рабочими параметрами, характеризующими конкретную установку:

$$E = P / v \cdot l \cdot h,$$

где P – мощность лазерного излучения, v – скорость сканирования, l – расстояние между дорожками, h – высота слоя.

С одной стороны, удельная энергия уменьшается с увеличением скорости сканирования. С другой стороны, скорость сканирования определяет производительность процесса выращивания. Однако увеличение мощности лазерного излучения при неизменном диаметре пятна в фокусе увеличивает плотность мощности, что приводит к перегреву и выплескиванию материала из зоны обработки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В эксперименте не удалось вырастить все образцы на выбранных значениях скорости. В случае использования порошка чистой меди на скорости сканирования 100 мм/сек на высоте около 2 мм формирующиеся слои утрачи-

On the one hand, the specific energy decreases with increasing the scanning speed. On the other hand, the scanning speed determines the performance of the growing process. However, an increase in laser power with a constant spot diameter at the focus increases the power density, which leads to overheating and splashing out of the material from the treatment area.

RESULTS AND DISCUSSION

It was not possible to grow all the samples at the selected speed values during the experiment. In the case of using pure copper powder at a scanning speed of 100 mm/s at a height of about 2 mm, the forming layers lost their stability. This led to the cessation of further growth. High values of specific energy led to overheating of the material, which violated the stability of the layer formation process.

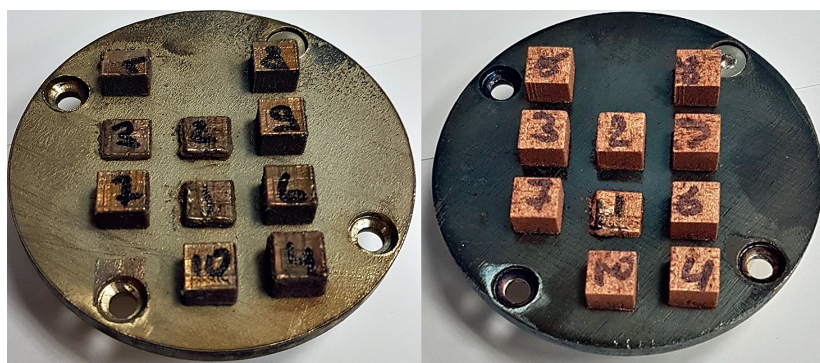


Рис. 7. Образцы, полученные СЛП-технологией: а) из порошка жаропрочной бронзы Пр-БрХ; б) из порошка меди 99,7% Cu
Fig. 7. Samples obtained by SLM technology: а) from the powder of heat-resistant bronze Pr-BrH; б) from copper powder 99.7% Cu

вали стабильность. Это приводило к прекращению дальнейшего роста. Высокие значения удельной энергии привели к перегреву материала, что нарушило стабильность процесса формирования слоев. Нарушение процесса выращивания также было вызвано и значительным уровнем появления концентраторов напряжений в образце. Они приводили к образованию трещин у основания образца (рис. 8). Возникшие коробления и деформации создали чрезмерный контакт ножа с образцом (нож является элементом конструкции установки СЛП 110, который служит для укладывания ровным слоем заданной толщины порошка, поступающего из бункера, на платформу выращивания). Поэтому процесс выращивания на данных режимах был остановлен досрочно. Такая же картина наблюдалась у образцов из ПР-БрХ на скоростях в диапазоне значений от 100 до 300 мм/сек. Наличие легирующих элементов повысило КПД процесса, что привело к перегреву материала на меньших значениях скорости в сравнении с чистой медью. У данных образцов была измерена пористость, что повысило степень достоверности при металлографическом анализе результатов.

Поперечные шлифы выращенных образцов исследованы на микроскопе на наличие пор. Результаты исследования зависимости пористости от удельной энергии приведены на графике (рис. 9).

Результаты исследований процессов для двух типов порошков показали значительное отличие на данном участке погонной мощности. Пористость чистой меди оказалась выше по сравнению с ПР-БрХ на участках с низким значением удельной энергии. Определенное влияние на рост пористости оказывает сравнительно больший диаметр частиц порошка чистой бронзы. Однако у обоих видов порошков наблюдался различный характер зависимости пористости от удельной энергии.

Рассмотрев полученные значения пористости чистой меди, можно отметить участок от 100 до 140 Дж/мм³, на котором происходит рост пористости (рис. 10а). Далее происходит плавное снижение значений пористости при увеличении удельной энергии (рис. 10б). Снижение пористости связано с ростом удельной энергии. Причина кроется в том, что большее количество подводимой энергии позволяет переплавить больший объем порошка и уве-

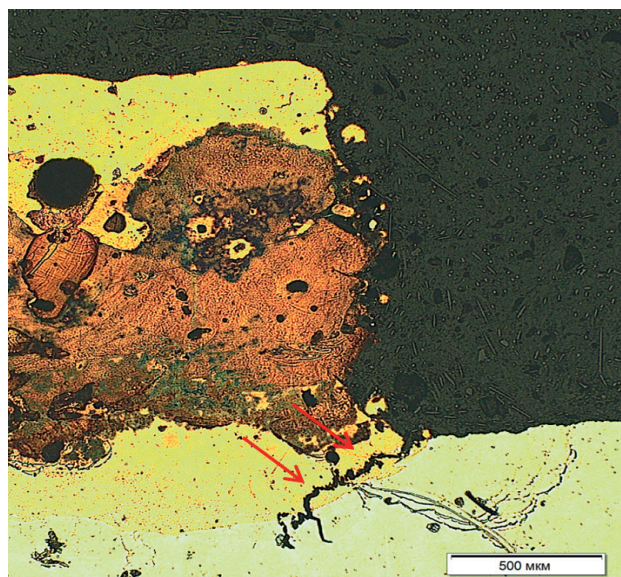


Рис. 8. Микрошлиф участка образца, выращенного из порошка ПР-БрХ, с трещиной, после травления, удельная энергия $E=950$ Дж/мм³

Fig. 8. Microsection of the sample area grown from PR-BrH powder, with a crack, after etching, specific energy $E=950$ J/mm³

Disturbance of the growing process was also caused by a significant level of appearance of stress concentrators in the sample. They led to the formation of cracks at the sample base (Fig. 8). The resulting distortions and deformations created an excessive contact between the powder application knife and the sample. Growing in these modes was stopped ahead of schedule. The same pattern was observed in PR-BrH samples at speeds in the range of values from 100 to 300 mm/sec. The presence of alloying elements increased the efficiency of the process, which led to overheating of the material at lower values of speed in comparison with pure copper. The porosity of these

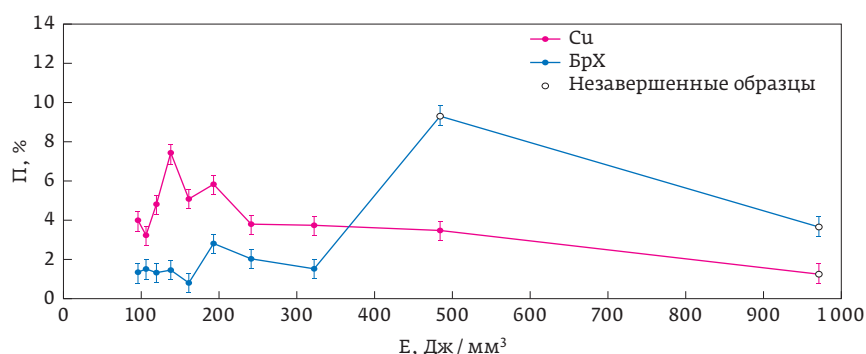


Рис. 9. Экспериментальные результаты зависимости пористости от удельной энергии

Fig. 9. Experimental results of specific energy dependence and porosity

личивает время существования ванны расплава на фиксированном участке, что позволяет жидкому металлу заполнить пустоты.

Значения пористости образцов из ПР-БрХ на участке от 100 до 160 Дж/мм³ падают, что вполне соответствует ранее сделанным предположениям. Уменьшение пористости при значениях удельной энергии на уровне 200 Дж/мм³ можно увязать с достижением значения температуры кипения цинка ($t_{\text{zn}} = 907^\circ\text{C}$), пары которого нарушают сплошность жидкой ванны, формируя пустоты при остывании (рис. 11а).

Дальнейший рост удельной энергии позволяет увеличить время существования жидкой ванны, которая заполняет пустоты, образованные парами цинка. До уровня удельной энергии в 320 Дж/мм³ наблюдается снижение пористости (рис. 11б). Превышение данного значения удельной энергии приводит к перегреву материала и невозможности выращивания образцов. Количество пор на данных образцах растет, что можно увязать с перегревом меди и хрома (рис. 11с). Так как на данном участке у чистой меди перегрева не наблюдается и пористость снижается, то при создании образцов по методу СЛП из порошка чистой меди следует работать в диапазоне погонной энергии 500–700 Дж/мм³. При выращивании изделий из порошка жаропрочной меди ПР-БрХ следует учитывать риски испарения части легирующих элементов и изменение химического состава изделия. Для предотвращения таких процессов необходимо ограничить диапазон работы значениями удельной энергии 150–180 Дж/мм³. Полученные результаты дают все основания для вывода о том, что установки с лазерным источником мощностью 100 Вт могут обеспечить создание изделий с низкой пористостью

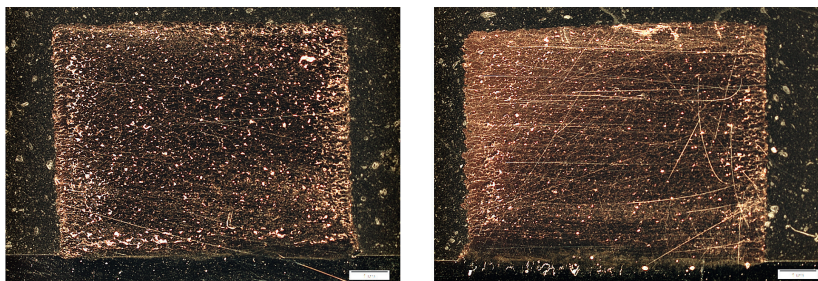


Рис. 10. Микрошлифы образцов, полученных при разных значениях удельной энергии из порошка чистой меди, без травления (увеличение $12\times$): а) $E = 140 \text{ Дж/мм}^3$; б) $E = 500 \text{ Дж/мм}^3$

Fig. 10. Microsections of samples obtained at different specific energy values from pure copper powder, without etching ($12\times$ magnification): а) $E = 140 \text{ J/mm}^3$; б) $E = 500 \text{ J/mm}^3$

samples was measured, which increased the degree of reliability in the metallographic analysis of the results.

The transverse thin sections of the grown samples were examined under a microscope for the presence of pores. The results of the study of the dependence of porosity on the specific energy are shown in the graph (Fig. 9).

The results of the research processes for the two types of powders showed a significant difference in this area of heat output. The porosity of pure copper was higher compared with PR-BrH in the areas with low specific energy values. A relatively large particle diameter of pure bronze powder has a definite effect on the growth of porosity. However, in both types of powders, a different character of the dependence of porosity on the specific energy was observed.

Having considered the obtained porosity values of pure copper, we can note the section from 100 to 140 J/mm³ where the porosity increases (Fig. 10a), then there is a gradual decrease in the porosity values with an increase in the specific energy (Fig. 10 b). The decrease in porosity is associated with an increase in specific energy. The reason lies in the fact that larger energy input allows for melting of larger powder volume and increases the lifetime of the melt bath at a fixed area, which allows the liquid metal to fill the pores.

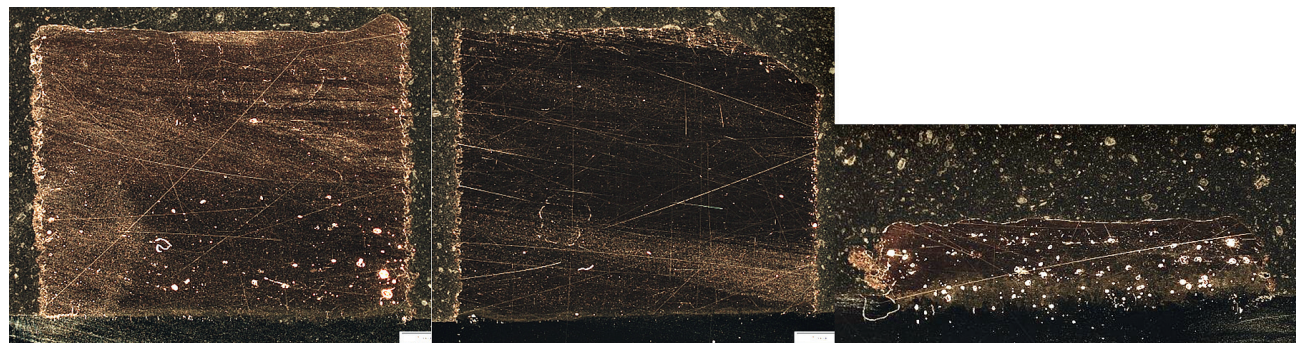


Рис. 11. Микрошлифы образцов, полученные при разных значениях удельной энергии из порошка жаропрочной бронзы ПР-БрХ, без травления (увеличение 12×): а) $E = 160 \text{ Дж/мм}^3$, б) $E = 200 \text{ Дж/мм}^3$, в) $E = 360 \text{ Дж/мм}^3$

Fig. 11. Microsections of samples obtained at different specific energy values from heat-resistant bronze powder PR-BrH, without etching (12× magnification): а) $E = 160 \text{ J/mm}^3$, б) $E = 200 \text{ J/mm}^3$, в) $E = 360 \text{ J/mm}^3$

(менее 5%). Это приемлемый результат для изделий, полученных в ходе аддитивного выращивания. Необходимые плотности мощности и уровни погонной энергии достигаются за счет использования малого диаметра лазерного пятна в фокусе и дополнительного подогрева зоны обработки.

Авторы признательны Российскому фонду фундаментальных исследований, при финансовой поддержке которого в рамках научного проекта РФФИ № 18-38-00940 были проведены данные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Toshi-Taka Ikeshoji, Kazuya Nakamura, Makiko Yonehara, Ken Imai, Hideki Kyogoku. Selective laser melting of pure copper. The Minerals, Metals and Materials Society. 2017.
2. Manriquez-Frayre J. A., Bourell D. L. Selective laser sintering of Cu-Pb / Sn solder powders. *Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin. 1991; 236–244.
3. Badrinarayan B., Barlow J. W. Selective Laser Sintering of a Copper-PMMA System. *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 1991; 245–250.
4. Zong G. et al. Direct Selective Laser Sintering of High Temperature Materials. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2015; 10(4): 509–525.
5. Zhu H. H., Lu L., Fuh J. Y. H. Development and characterization of direct laser sintering of Cu-based metal powder. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003; 140: 314–317.
6. Patent US005156697 Selective laser sintering of parts by compound formation of precursor powders / Bourell D. L., Marcus H. L., Weiss W. L., 1992.
7. Kruth J. P. et al. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*. 2005; 11 (1): 26–36.
8. Zhang D. Q., Liu Z. H., Chua C. K. Investigation on forming process of copper alloys via Selective Laser Melting. Nanyang Technological University, Singapore. 2005.
9. Meiners W. Fabrication Selective Laser Melting – Additive Manufacturing for series production of the future. *Proceedings of INTERMAT Conference, Materials Science Forum*. 2011; 843: 287.
10. Mao Z., Zhang D. Z.; Wei P.; Zhang K. Manufacturing Feasibility and Forming Properties of Cu-4Sn in Selective Laser Melting. *Materials*. 2017; 10: 333.
11. Lykov P. A., Safonov E. V., Akhmedjanov A. Selective laser melting copper. *Materials Science Forum*. 2017; 843: 284–288.
12. Григорьянц А. Г., Колчанов Д. С., Дренин А. А. Установка для селективного лазерного плавления металлических порошков. *Материалы IV Международной конференции «Аддитивные технологии: настоящее и будущее»*. ФГУП «ВИАМ». 2018; 221–234.
13. Grigor'yanc A. G., Kolchanov D. S., Drenin A. A. Ustanovka dlya selektivnogo lazernogo plavleniya metallicheskih poroshkov. *Materialy IV Mezhdunarodnoj konferencii «Additivnye tekhnologii: nastoyashchee i budushchee»*. FGUP «VIAM». 2018; 221–234.

The values of porosity of samples from PR-BrH at the area from 100 to 160 J/mm³ decrease, which is consistent with previously made assumptions. Porosity reduction at specific energy values of 200 J/mm³ can be associated with the achievement of values of the zinc boiling temperature ($t_{Zn} = 907 \text{ }^\circ\text{C}$), which fumes disrupt the continuity of the liquid bath, creating voids during cooling (Fig. 11a). A further increase in the specific energy allows to increase the lifetime of the liquid bath, which fills the voids formed by zinc fumes. To a level of specific energy of 320 J/mm³, a decrease in porosity is observed (Fig. 11 b). Exceeding this specific energy value leads to overheating of the material and the impossibility of growing the samples. The number of pores on these samples is growing, which can be associated with overheating of copper and chromium (Fig. 11c). Since there is no overheating in pure copper in this area, and the porosity decreases, it is necessary to work in the heat input energy range of 500–700 J/mm³ when creating samples using the SLM method from pure copper powder. When growing products from heat-resistant PR-BrH copper, the risks of evaporation of a part of alloying elements and the chemical composition of the product should be taken into account. To prevent such processes, it is necessary to limit the range of operation to specific energy values of 150–180 J/mm³. The results obtained give all grounds for concluding that installations with a 100 W laser source can ensure the creation of products with low porosity (less than 5%). This is an acceptable result for the products obtained during additive growth. The required power densities and heat input levels are achieved by using a small diameter of the laser spot in focus and additional heating of the treatment area.

The authors are grateful to the Russian Foundation for Basic Research, the financial support of which helped to carry out the study as a part of the research project of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) No. 18-38-00940.