УДК 672

**подходы к технологическому обеспечению селективного лазерного сплавления с использованием лазерной технологической установки**

**А. В. Сахарова, А. А. Никонов**

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова*

Метод селективного лазерного сплавления (SLM) наиболее активно развивается на рынке аддитивных технологий (АдТ) в России на данный момент. Этому свидетельствует рост числа отечественных промышленных установок сплавления металлических порошков, основанных именно на этом методе.

Технология SLM, а также ряд других технологий (SLS – селективное лазерное спекание, SLA – лазерная стереолитография и пр.) относится к технологии, при которой подвод отверждающей энергии идет на заготовленный заранее слой материала, называющейся «Bed Deposition». При использовании технологии «Direct Deposition», в отличие от предыдущей, подвод энергии осуществляется одновременно с подачей строительного материала в определенную точку. Оба способа подачи строительного материала имеют свои преимущества и недостатки, «Direct Deposition» получила меньшее распространение в связи со сложностями в реализации, в частности, дополнительно необходимо контролировать струю материала, чтобы в точку подвода тепла всегда подавалось одинаковое количество металлопорошка для формирования равных по толщине слоев.

В качестве строительного материала технология SLM предусматривает металлический порошок. Наиболее часто используется нержавеющая сталь, так как является наименее требовательным к особым условиям наплавки материалом, а также получаемые изделия имеют высокие прочностные характеристики. Особых условий построения требуют такие материалы как алюминий, титан, медь. Высокие восстановительные свойства этих металлов вынуждают использовать в качестве газовой среды инертные газы (аргон, азот) или вакуум, тем самым значительно удорожая установку. Например, использование аргона в качестве рабочей среды подразумевает дополнительную закупку самого газа особой чистоты, проектирование герметичной рабочей камеры, закупку вакуумно-пневматической системы и прочие недешевые в денежном эквиваленте вещи.

Основным требованием к используемому сырью – металлопорошку – является его сферичность. Такая форма частиц позволяет обеспечить «текучесть» всей композиции, это свойство очень важно при формировании однородного тонкого слоя. Более того, определенная масса порошка в форме шариков уложится в меньший объем, нежели та же самая масса порошка в любой другой изготавливаемой форме. Металлопорошок в мире, во многих случаях, производят компании, занимающиеся разработкой и изготовлением 3D-принтеров. Стоимость порошка напрямую зависит от способа его изготовления (электролитическое осаждение, механическое измельчение, восстановление руды и др.), порошок сферичной формы в объеме 2–2.5 л обойдется в 300–1200$ за упаковку. Некоторые фирмы, реализующие собственные принтеры, могут обязывать покупателя использовать порошок только их изготовления, но продавать его уже по более низкой цене.

Высокая стоимость также обуславливается и размером частиц порошка. Селективное лазерное сплавление предусматривает использование порошка фракцией 1-100 мкм, такой диаметр получить достаточно сложно. На рисунке 1 представлены фотографии порошка под микроскопом (а). Размер частиц сопоставим с размером пор (б) на напечатанном из этого сырья металлическом образце.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а | б |

Рисунок 1 – Металлопорошок (а); поры на получившемся образце под микроскопом (б)

В качестве источника энергии применительно для технологии SLM применяются одна или две лазерные установки, в основном, иттербиевые волоконные. Использование второго лазера преследует сразу несколько целей:

* увеличивается производительность SLM-машины за счет работы сразу в двух областях;
* граничные области изделия и сердцевина имеют разные термические условия плавления, есть возможность установить на лазеры два различных по параметрам режима излучения;
* прогревание области сканирования одним лазером до определенной температуры и последующее плавление другим для улучшения сплавляемости с подложкой или предыдущим слоем;
* повторная проплавка, если это необходимо.

За то, каким будет на выходе изделие по качеству, как будет производиться наплавка, отвечает большое множество параметров (Рисунок 2). Среди них параметры лазерного луча, система фокусировки, режимы плавления, характеристики порошка и подложки.

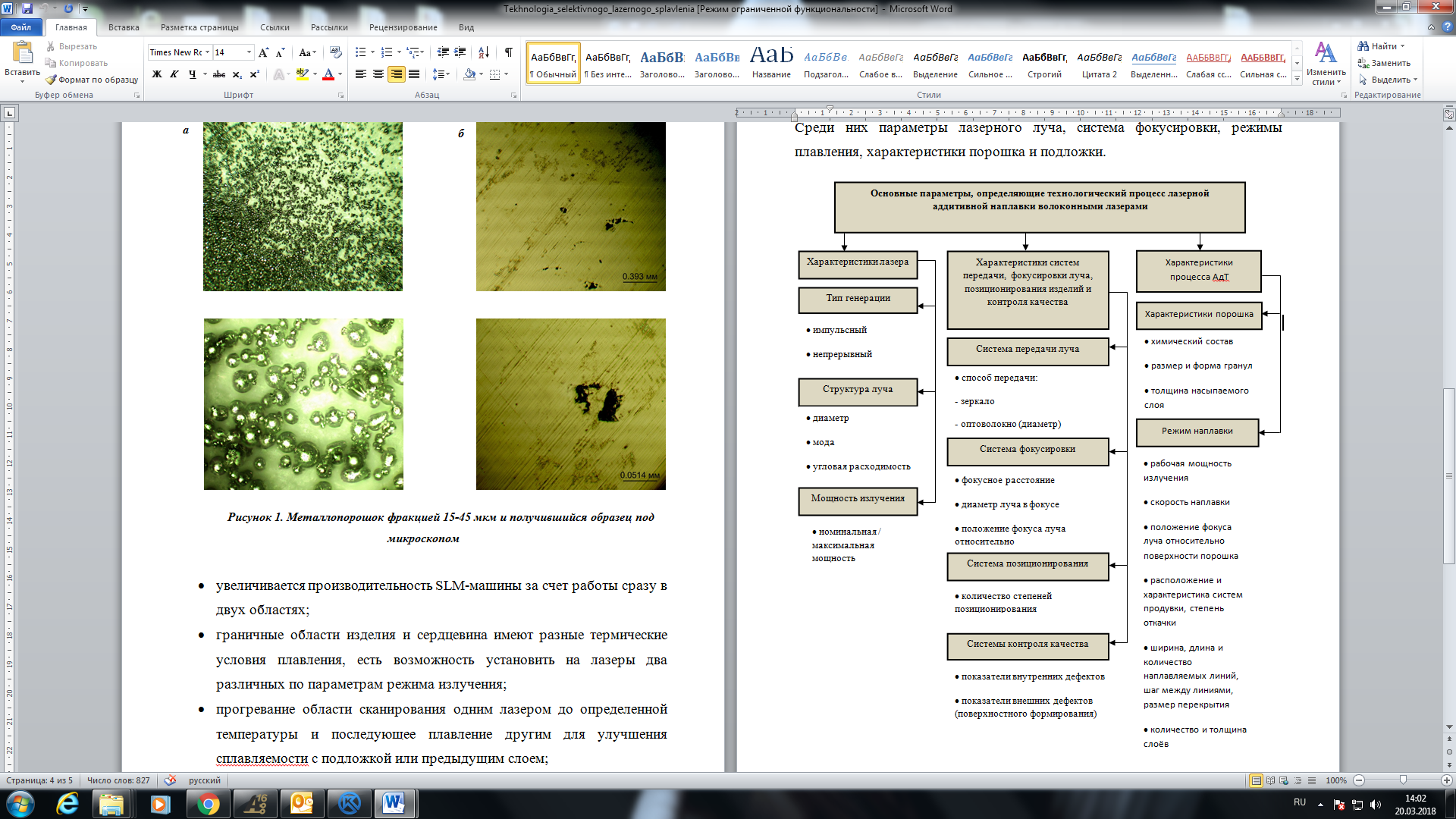


Рисунок 2 – Основные параметры АдТ, определяющие качество процесса, и, соответственно, «выращенного» изделия

Отдельным предметом для рассмотрения является стратегия печати. Она отвечает за то, по какой траектории лазерный луч будет сплавлять металлические частицы между собой. Для разработки рациональной стратегии хода луча для печати определенного изделия необходимо использование сложных математических моделей термических условий, которые возникают в процессе печати.

Аддитивные технологии постепенно проникают в различные области человеческой деятельности: авиа- и ракетостроение, медицина, оборонная промышленность и др. Метод селективного лазерного сплавления позволяет создавать изделия из металлов и сплавов недостижимой ранее формы с уникальной внутренней структурой, которую невозможно достичь традиционными методами металлообработки.

*Поверхность металлических образцов*

Для производства изделий использовался стальной порошок марки 316L производства компании LPW Technology. Фотографии получены на металлографическом микроскопе Альтами МЕТ 5С и на цифровом – eScope DP-M01. Рассмотрим, влияние различных режимов работы на поверхность получившихся образцов. Какой получится структура поверхности, зависит от нескольких параметров. Напрямую влияет количество слоев в напечатанном изделии: чем больше слоев металлопорошка, тем более ребристая получится поверхность. Данную закономерность можно проследить по фотографиям металлических образцов в форме квадрата со стороной 10 мм на рисунках 3 и 4. Это происходит из-за усадки детали в процессе плавления, а, конкретно, из-за образования усадочных раковин. Данный параметр можно регулировать, заранее задавая размеры изделия. Отношение получившегося размера детали к заданному называется коэффициентом усадки (линейный и объемный). Зная его, можно просчитать, насколько изделие получится меньше по какой-либо координате, и избежать непредвиденных результатов.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| а | б | в |

Рисунок 3 – Наружная поверхность образцов: а – 3 слоя порошка; б – 12 слоев порошка; в – 27 слоев порошка

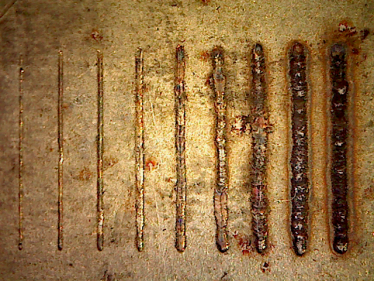
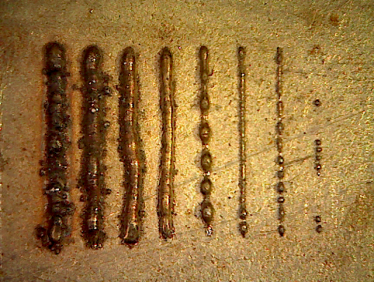
Неровность поверхности получившихся объясняется вовлечением соседних частиц в ванну плавления, возникающая во время прохождения лазера создается более широкая, ребристая полоса (неровность полосы наглядно видно на рисунке 4). Устраняется неровность с помощью последующей механической обработки шлифованием и полированием.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Рисунок 4 – Торцевая поверхность образцов

Важным параметром является мощность лазера, чем выше мощность, тем более мощными будут микровзрывы, что приведет, в свою очередь, к увеличению расстояния отлета частиц. Скорость сканирования непосредственно влияет на внешний вид линии (Рисунок 5): высокая скорость приведет к печати за один проход лазера тонких треков, менее высокая скорость обеспечит создание треков большей толщины.

|  |  |
| --- | --- |
| Тонкий слой порошка | Толстый слой порошка |



2 мм

2 мм

Уменьшение скорости сканирования

Уменьшение скорости сканирования

|  |  |
| --- | --- |
| а | б |

Рисунок 5 – Фотографии треков, полученных за одно прохождение лазерного луча по металлопорошку с разными скоростями

Порошок, уложенный толстым слоем (Рисунок 5 (б)), имеет свойство собираться в «шарики» (называемое «сфероидизацией»), потому что не успевает за короткое время сканирования лазера приплавляться к подложке, в отличие от треков на рисунке 5 (а) а силы поверхностного натяжения жидкости заставляют принимать именно такую форму.

*Металлографический анализ структуры образцов*

Анализ изменения структуры изделий в зависимости от различных параметров произведен на пяти образцах. Основной характеристикой образцов, обуславливающих их качество и пригодность для изготовления металлических изделий, является пористость. Для выявления соотношения объема пор к объему металла в исследуемом образце, сначала необходимо измерить массу на специальных точных весах. Образец из стали марки 316L в форме прямоугольного параллелепипеда со стороной квадрата в основании 10 мм и высотой 4 мм весит 3,2 г, плотность – 8 г/см3 (табличное значение). Плотность определяется специальным прибором – пикнометром, представляющим собой сосуд, заполненный водой, с проградуированной в единицах объема шкалой. Образец помещается в сосуд и по разнице начального и конечного объемов определяется объем образца, а далее по известному соотношению определяется плотность. Величина отклонения плотности от табличной в меньшую сторону, в полученных методом SLM образцах, будет свидетельствовать об увеличении их пористости.

Рассмотрим изменение структуры металлических изделий в зависимости от изменения режимов наплавки на конкретных примерах. Все образцы были получены методом селективного лазерного сплавления, (сканирование производилось с одинаковой скоростью), далее были разрезаны поперек линий наплавки, произведена обработка на шлифовальной машине; полирование и травление не проводились. Образец №1, как видно по рисунку 6, обладает очень высокой пористостью порядка 40%, по типу она открытая. Открытый характер пор позволяет газам и жидкостям проникать внутрь изделия. Полученная структура неприемлема в большинстве изделий. Высокая пористость обуславливается малой мощностью излучения, недостаточной для полного расплавления частиц.



Рисунок 6 – Фотография шлифа образца №1

Пористость образца №2 (Рисунок 7) значительно ниже. Результат был достигнут, благодаря увеличению мощности в 1,7 раза по сравнению с первым образцом.



Рисунок 7 – Фотография шлифа образца №2

Образец №3 (Рисунок 8) является лучшим среди представленных. Обладает высокой сплошностью: с левой части пористость порядка 1%, что является хорошим показателем, справа – имеется несколько крупных пор, мелкие поры, сопоставимые с размером одной частицы металлопорошка, присутствуют во всем объеме детали. Темные крупные пятна дефектами структуры не являются, возможно, это следы засохшей жидкости.

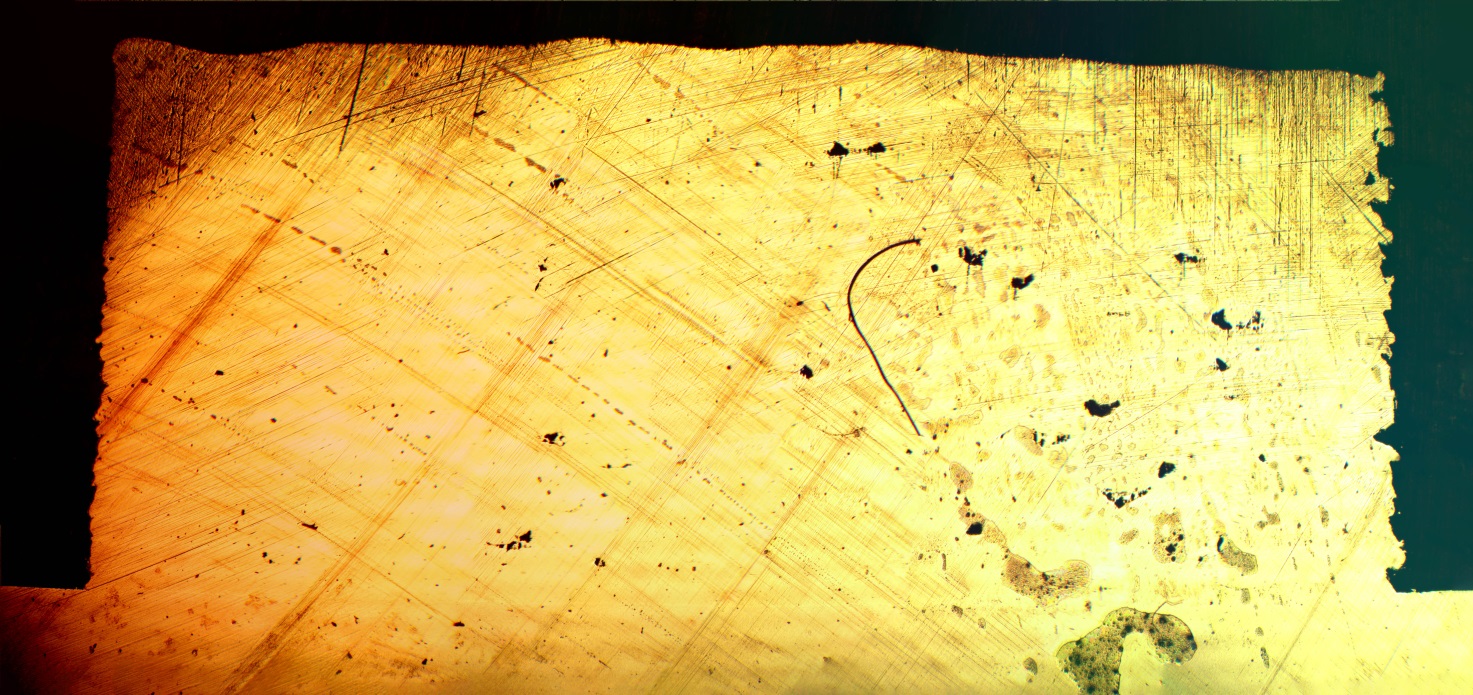


Рисунок 8 – Фотография шлифа образца №3

Образец №4 (Рисунок 9) был получен на двух разных режимах: мощность лазера, на которой была получена нижняя часть образца, значительно ниже, чем та, на которой были получены верхние слои.

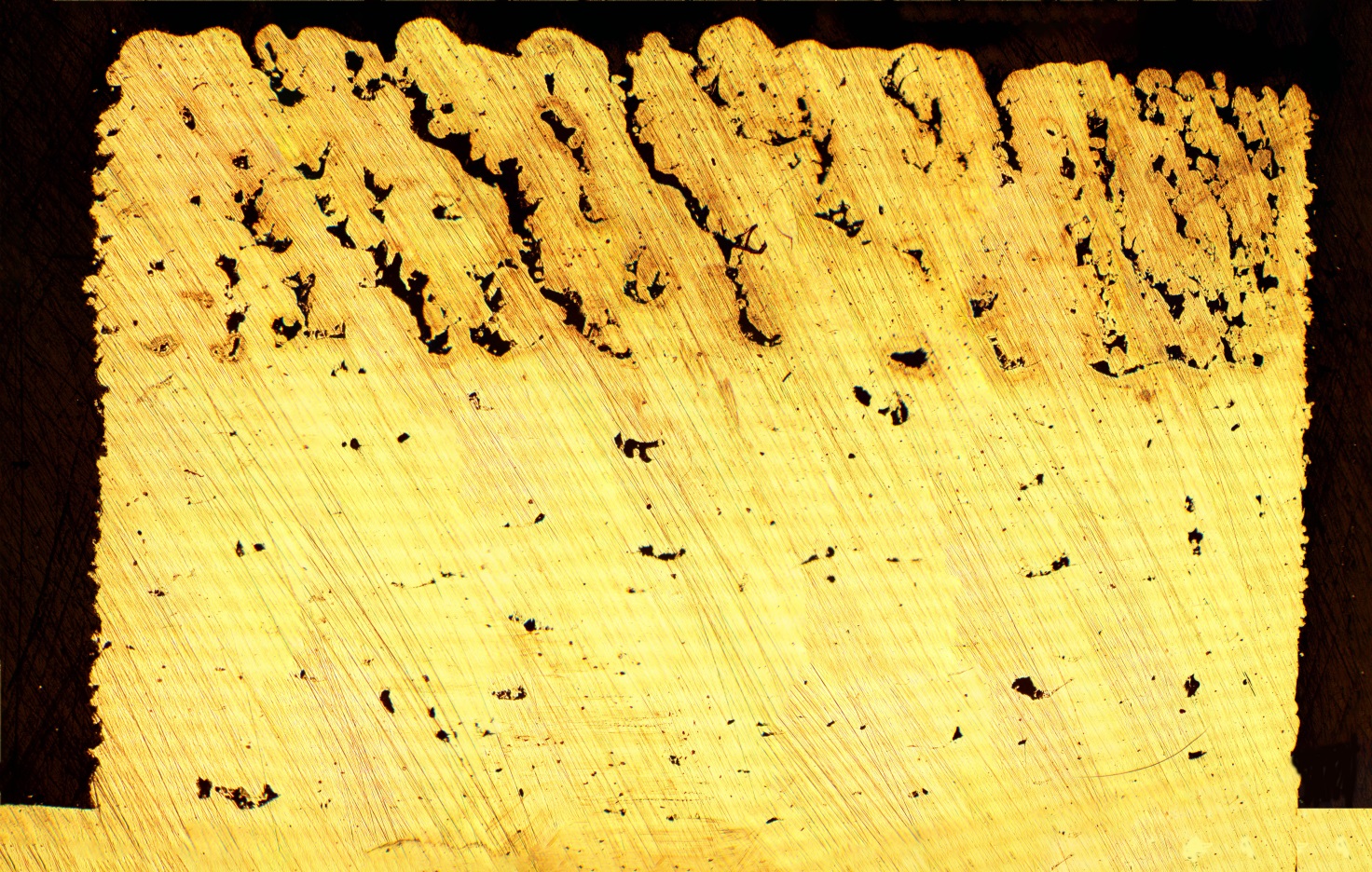


Рисунок 9 – Фотография шлифа образца №4

Образец №5 (Рисунок 10) имеет несколько десятков крупных пор в верхних слоях, характер пористости – закрытый (в поперечном разрезе). Фотография поры в сильном увеличении представлена на рисунке 11. Пора имеет острые кромки и округлые части, являющиеся недоплавленными частицами порошка. Появление их связано с процессами образования газа при сплавлении.

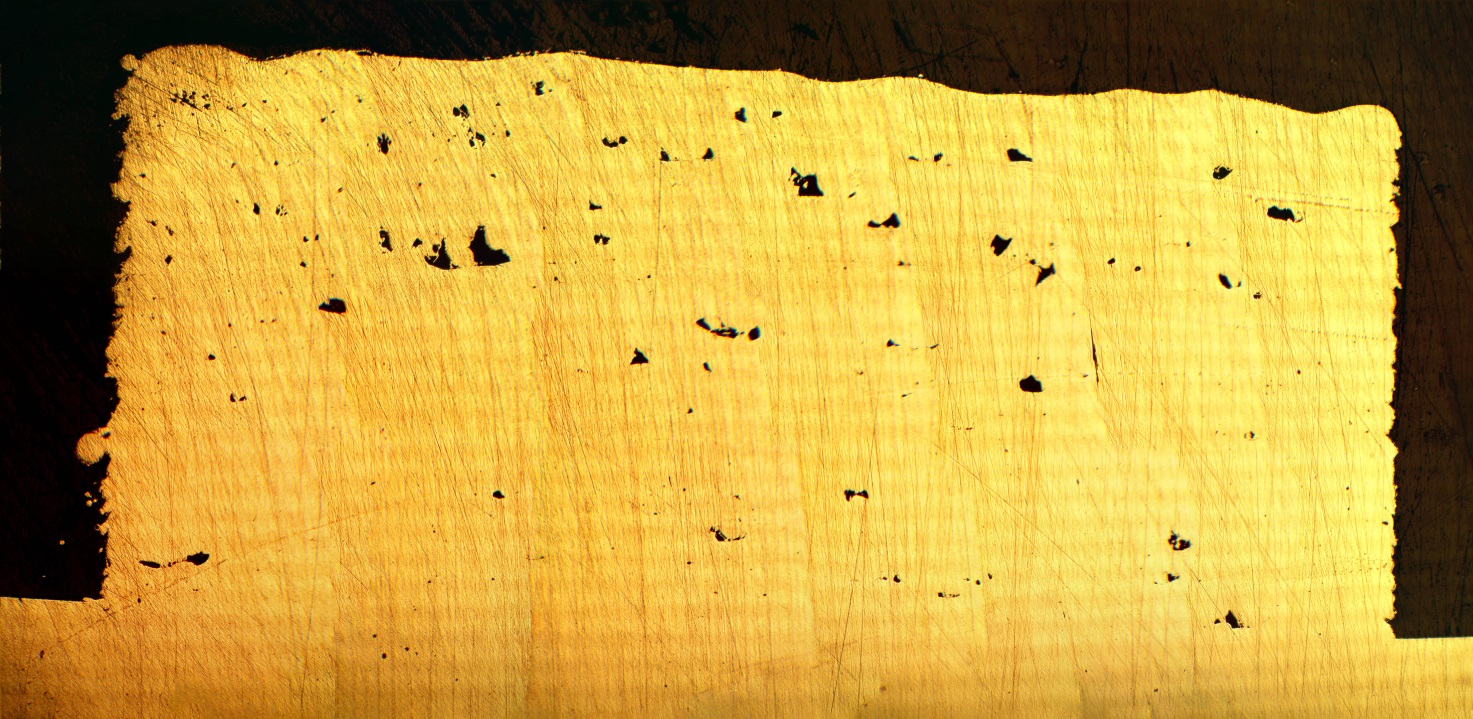


Рисунок 10 – Фотография шлифа образца №5

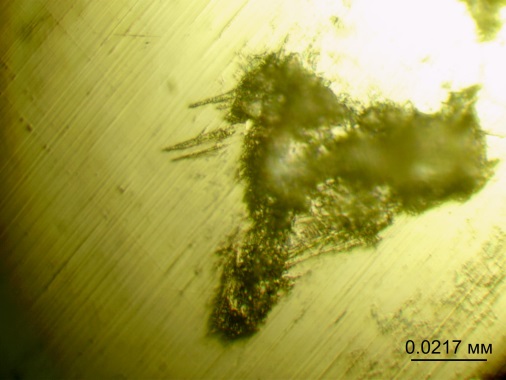


Рисунок 11 – Фотография поры в увеличении

Анализируя данные изображения можно сделать вывод, что решающими параметрами, обуславливающими пористость в металле, являются мощность лазерного излучения, скорость сканирования и толщина слоя. Для достижения наименьшей пористости в образце необходимо подобрать такой режим, который бы обеспечивал количество теплоты, достаточное для плавления металлопорошка, при условии, что луч постоянно движется. Необходимо предпринять множество попыток, варьируя тремя основными параметрами сплавления, прежде чем найти оптимальный режим. Для удобной классификации множества режимов вводится параметр α, характеризующий величину мощности на единицу скорости (погонная мощность) размерностью ; получить его можно разделив мощность излучения на скорость сканирования. Тонкий слой порошка требует меньшей удельной мощности лазера для полного расплавления. Для расплавления более толстых слоев необходимо увеличивать мощность лазера, либо снижать скорость сканирования при неизменной мощности, тем самым жертвуя производительностью.

**Библиографический список**

1. М.А. Зленко. Аддитивные технологии в машиностроении. Пособие для инженеров/ М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. // – М: НАМИ, 2016. – 218 с.
2. Панов Д.О. Металлографический анализ поверхности стали 65г после электроэрозионной обработки / Панов Д.О., Абляз Т. Р., Абросимова А.А. // – Пермь: ПНИПУ, 2016. – 6 с.
3. Килина П.Н., Морозов Е.А., Порозова С.Е., Солнышков И.В. Исследование металлического порошка на основе титана для селективного лазерного плавления // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-2.;

URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22870 (дата обращения: 21.02.2018).