

УДК 621.373.826

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ТРУДОЕМКОСТИ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ВЫРАЩИВАНИЯ ИЗ МОЛИБДЕНОВОГО СПЛАВА

Григоров Максим Романович⁽¹⁾, Денежкин Антон Олегович⁽²⁾, Колесов Петр Владимирович⁽³⁾

*Студент 5 курса⁽¹⁾, аспирант 4 года⁽²⁾, студент 6 курса⁽¹⁾
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»*

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

*Научный руководитель: Д.С. Колчанов,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в
машиностроении»*

Поиск оптимальных режимов выращивания в селективном лазерном плавлении (СЛП) является сложной задачей из-за высоких скоростей протекания процессов и взаимосвязи большого количества параметров. В настоящее время существуют три основных метода борьбы с образованием дефектов в процессе СЛП, а именно: экспериментальный подбор оптимальных параметров, численное моделирование процесса и устранение дефектов с помощью постобработки [1, 2].

Каждый из перечисленных методов имеет свои недостатки. При реализации экспериментального метода для получения бездефектной структуры может потребоваться проведение большого количества дорогостоящих и трудоемких серий экспериментов с последующими металлографическими исследованиями образцов. Стоит также отметить, что нарушение условий эксперимента может привести к получению недостоверных результатов. Целесообразно использовать экспериментальный метод исследования для оценки пористости и механических свойств полученных образцов.

Численное моделирование имеет похожие минусы. Создание достоверной численной модели процесса СЛП, а также ее экспериментальное подтверждение являются крайне трудоемким, а также ограниченным имеющимися на сегодняшний день знаниями о протекающих физических процессах [3]. Специализированные программные комплексы для моделирования физических процессов обычно сконцентрированы на какой-то определенной области. Расчёт модели с приемлемой точностью требует высоких вычислительных и временных затрат, что также ограничивает применение данного метода. При этом программные пакеты для проведения моделирования достаточно дороги и требуют подготовки высококвалифицированных специалистов. Применение численного моделирования целесообразно для оценки окна оптимальных режимов выращивания и исследования скоротечных процессов формирования и затвердевания ванны расплава [4].

Эффективным решением на сегодняшний день является объединение всех методов борьбы с дефектами с целью систематического изучения причин их образования и получения бездефектной детали.

Подтверждение результатов построенной модели процесса СЛП молибденового сплава проводилось на отечественном комплексе СЛП-250Б, разработанном в МГТУ им. Н. Э. Баумана, путем выращивания единичных дорожек и объёмных образцов со значениями удельной энергии, используемыми в численной модели.

В численной модели для формирования порошкового слоя была сгенерирована трехмерная расчетная область $1000 \times 600 \times 200$ мкм, имитирующая зону построения, а также разравнивающее устройство для формирования слоя необходимой толщины. Для моделирования механического поведения твердых частиц порошка при формировании порошкового слоя применялся метод дискретных элементов, в котором каждая частица порошка представлена в виде упругой сферы, имеющей три компонента скорости по трем осям декартовой системы координат. Для каждой частицы известны масса, скорость, ускорение и координаты центра тяжести. Кроме того, к каждой частице по отдельности прикладывается сила F_i , как равнодействующая сил тяжести, упругой реакции, вязкого и кулоновского трения, отражающих текущее механическое состояние массива в рассматриваемый момент времени. Ввиду ограниченности слоя порошка по ширине стенками контейнера учитывается два вида взаимодействия: частица – частица и частица – стенка.

Моделирование процесса СЛП выполнялось на основе уравнения массы, уравнения сохранения импульса и энергии.

Для отслеживания и определения фазовых переходов между твердой и жидкой фазой используется метод контрольных объемов жидкости (МКО), который ставит своей целью определение функции дополнительного объема жидкости, располагающегося в центре сетки. Для описания проникновения лазерного излучения в материал используется модель Бера-Ламберта, в которой предполагается, что интенсивность экспоненциально уменьшается в зависимости от глубины проникновения.

В качестве основной характеристики единичной дорожки был выбран коэффициент проплавления (K_i), который представляет собой отношение глубины проплавления единичной дорожки к ее ширине. Режим проплавления характеризовался средним значением коэффициента проплавления (K_{cp}) по десяти точкам измерения (n) по длине дорожки. После определения режима проплавления был рассчитан коэффициент стабильности:

$$R_{\text{стаб}} = \sqrt{\frac{\sum (K_i - K_{cp})^2}{n}}$$

Единичная дорожка считалась равномерной при $R_{\text{стаб}} \leq 0.05$, что свидетельствует об отсутствии резких перепадов по ширине и глубине единичной дорожки на всей ее длине.

В результате проведенного моделирования процесса СЛП молибденового сплава при толщине порошкового слоя 40 мкм были получены единичные дорожки, удовлетворяющие критерию стабильности при значениях удельной энергии выше 156 Дж/мм^3 . Дальнейшее увеличение удельной энергии вплоть до 208 Дж/мм^3 приводило к снижению коэффициента стабильности. При 250 Дж/мм^3 коэффициент стабильности начинал расти, что свидетельствует о начале нестабильного формирования дорожки, вызванного переизбытком плотности мощности, вводимой в слой, и наличием интенсивного испарения в ванне расплава. При значениях удельной энергии ниже 156 Дж/мм^3 по длине единичной дорожки наблюдались перепады высот, достигающие 20 мкм и более. Таким образом, при нанесении последующих слоев будут возникать участки с толщиной слоя меньше заданной, повторно переплавляющие нижележащий слой. Также будут образовываться участки с толщиной слоя, превышающей заданную, что может вызвать образование пор с нерасплавленными частицами порошка из-за недостаточной глубины проплавления.

Уменьшение толщины слоя до 30 мкм увеличивает вводимую удельную энергию в слой, что позволяет применять источники лазерного излучения меньшей мощности. В диапазоне значений удельной энергии от 178 Дж/мм^3 до 250 Дж/мм^3 были получены

единичные дорожки, удовлетворяющие коэффициенту стабильности. При достижении удельной энергией значения 277 Дж/мм^3 , коэффициент стабильности превысил допустимые значения, что говорит о начале интенсивного процесса испарения, который нарушает стабильность формирования единичной дорожки.

Режимы, на которых были получены стабильные единичные дорожки, были использованы для выращивания объемных образцов $10 \times 10 \times 10 \text{ мм}$, которые в последствии исследовались на пористость с помощью компьютерной томографии (Рисунок 1).

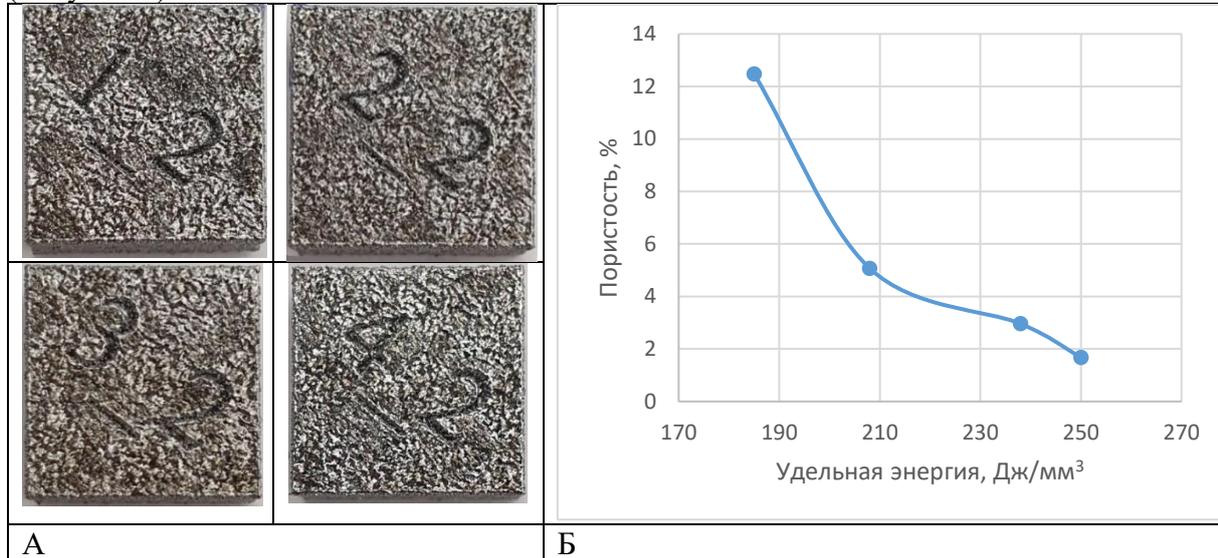


Рис. 1. А – Внешний вид объемных образцов из молибденового сплава; б – Зависимость пористости объемных образцов от удельной энергии

Полученные результаты показали, что с увеличением удельной энергии, вводимой в порошок слой, значение пористости уменьшается. Большое количество вводимой энергии в порошок слой позволяет увеличить время жизни ванны расплава и переплавить большее количество частиц порошка, в том числе частицы, захваченные ванной расплава с помощью механизмов денудации. Таким образом, дальнейшее увеличение удельной энергии приводило к снижению значений объемной пористости образцов ниже целевых 3% для аддитивных технологий [5].

Таким образом, в данной работе было рассмотрено применение предварительного моделирования процесса СЛП для сужения окна параметров процесса выращивания. Значения удельной энергии, полученные в результате численного моделирования, позволили получить объемные образцы с пористостью менее 3%. Такой подход позволяет уменьшить необходимое число экспериментов для определения параметров выращивания с низкой пористостью и, как следствие, снизить трудоемкость.

Литература

1. *Christoph V. G.* Study of physical phenomena of selective laser melting towards increased productivity: Ph.D, Lausanne, 2015. - 117 p.
2. *Grasso M., Colosimo B.M.* Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion // Measurement Science and Technology. - 2017. - №4. - pp. 1-25.
3. *Chiument M., Neiva E., Salsi E. et al.* Numerical modelling and experimental validation in Selective Laser Melting // Additive Manufacturing. - 2017. - №18. - pp. 171-185.
4. *Alaa O., Xi Z.* Simulation of Layer-by-Layer Selective Laser Melting Process with an Efficient Remeshing Technique // Procedia Manufacturing. - 2019. - №34. - pp. 613-618.

5. *S.V. Adjamskyi, G.A. Kononenko, R.V. Podolsky*. Influence of technological parameters of slm-process on porosity of metal products // Scientific and technical. - 2020. - №10. - pp. 13-18.