## Таблица 2

Параметры	Значения для варианта компоновки			
	Nº 1	Nº 2	<u>№</u> 3	<u>№</u> 4
Масса материала коробки скоростей, кг	89,136	82,774	82,284	-
Масса материала шпиндельной бабки, кг	108,637	108,637	85,915	103,720
Объем материала коробки скоростей, мм <sup>3</sup>	11276522	10462942	10390815	-
Объем материала шпиндельной бабки, мм <sup>3</sup>	13514395	13514395	10602097	12885566
Итого масса материала, кг	197,773	191,411	168,199	103,720
Итого объем материала, мм <sup>3</sup>	24790917	23977337	20992912	12885566

Параметры материалоемкости для вариантов конструкций ПГД

Сравнительная диаграмма четырех вариантов конструкций ПГД по массе материала представлена на рис. 6.



Рис. 6. Сравнительная диаграмма вариантов конструкций ПГД по массе материала

Из диаграммы, представленной на рис. 6 можно сделать следующие выводы: компоновка № 4 обладает наименьшей, а компоновки № 1 и № 2 наибольшей металлоемкостью.

Предварительно, оптимальной с точки зрения габаритов и металлоемкости можно считать ПГД с компоновкой № 3 (АДЧР – муфта – коробка скоростей – зубчатая передача – шпиндель).

## Список использованных источников:

1. Денисенко А.Ф. Проектирование и расчет шпиндельных узлов металлорежущих станков на опорах качения: учебн. пособ. / А.Ф. Денисенко, Л.Б. Гаспарова. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т., 2005. – 101 с.

2. Блинов Н.С. Оценка оптимальности конструкции ЭМП по различным критериям / Н.С. Блинов, А.В. Мешков // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2012. – № 3 (4). – С. 125–131.

## ВЛИЯНИЕ СТРАТЕГИИ СКАНИРОВАНИЯ НА СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ СПЛАВА ALSIMG МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Н.А. Сапрыкина<sup>а</sup>, к.т.н., доц., А.А. Сапрыкин, к.т.н., доц., Е.А. Ибрагимов, к.т.н., доц. Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского Томского политехнического университета 652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26 E-mail: <sup>a</sup>saprikina@tpu.ru

Аннотация: Аддитивные технологии стремительно развиваются, став важнейшим направлением современной промышленной революции. Одним из ключевых направлений развития этих технологий является разработка новых порошковых материалов и изучение влияния различных параметров процесса селективного лазерного плавления (Selective Laser Melting, SLM) на стабильность качества получаемых изделий. В работе представлены исследования по изучению влияния различных стратегий сканирования лазерного луча на конечные свойства формируемых изделий, полученных из алюминиевого сплава на пористость и плотность. Изготовлены четыре серии образцов с различными стратегиями сканирования. Показано, что выбор схемы перемещения лазерного луча оказывает значительное влияние на итоговые механические характеристики изделия.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление (СЛП); аддитивное производство; пористость, стратегия сканирования, режимы селективного лазерного плавления, микротвердость, энерговклад, сплав системы алюминий-кремний-магний.

**Abstract:** Additive technologies are rapidly developing, becoming the most important direction of the modern industrial revolution. One of the key areas of development of these technologies is the development of new powder materials and the study of the influence of various parameters of the Selective Laser Melting (SLM) process on the stability of the quality of the products obtained. The paper presents studies on the effect of various laser beam scanning strategies on the final properties of molded aluminum alloy products on porosity and density. Four series of samples with different scanning strategies were produced. It is shown that the choice of the laser beam displacement scheme has a significant impact on the final mechanical characteristics of the product.

**Keywords:** selective laser melting (SLM); additive manufacturing; porosity, scanning strategy, selective laser melting modes, microhardness, energy storage, aluminum-silicon-magnesium alloy system.

Селективное лазерное плавление (СЛП) представляет собой одну из прогрессивных технологий аддитивного производства, основанную на послойном плавлении металлического порошка с использованием высокоточного лазерного луча. Этот метод позволяет создавать изделия сложной геометрии с высокой точностью и эффективностью, сокращая сроки производственного цикла и снижая затраты на разработку и изготовление опытных образцов. Развитие технологии направлено на разработку новых порошковых композиций и изучение воздействия различных параметров на качество, и устойчивость производимых изделий [1].

Алюминиевые порошки остаются одними из самых популярных материалов в машиностроении и авиации, а их адаптация к технологиям аддитивного производства открывает новые горизонты для индустриальной индустрии [2]. Этот метод не только ускоряет процесс проектирования и изготовления, но и позволяет получить уникальный сплав с особой структурой благодаря быстрому расплавлению и последующему остыванию металлического порошка [3].

Цель настоящей работы заключается в исследовании того, как выбранная стратегия сканирования влияет на пористость и плотность образцов, изготовленных методом селективного лазерного плавления из предварительно подготовленных порошков алюмосиликатного состава (алюминия – 91 % по массе, кремния – 8 %, магния – 1 %). Такая специальная предварительная обработка была подробно описана в предыдущей публикации [4], и целью настоящего исследования является установление оптимальных условий проведения селективного лазерного плавления.

Экспериментальные исследования проводились на специализированном оборудовании – 3D-принтере ВАРИСКАФ-100МВС, разработанном сотрудниками Юргинского технологического института Томского политехнического университета. Аппарат оснащен иттербиевым волоконным лазером с выходной мощностью 100 Вт и рабочей длиной волны 1070 нм. Ранее в публикациях [4, 5] детально описан процесс формирования и методика исследования порошковой смеси AlSiMg, полученной смешиванием порошков алюминия, кремния и магния. Чтобы изучить влияние стратегии сканирования на микроструктуру, химический состав, пористость и плотность образцов, авторы провели серию поисковых экспериментов, основываясь на результатах которых были установлены соответствующие режимы. Размеры образцов составляли 10 × 10 × 3 мм, и они были получены при следующих условиях: скорость сканирования V = 225 мм/с, шаг сканирования S = 0.08 мм, мощность лазера P = 90 Вт, толщина слоя порошка h = 0.025 мм. Начальная температура платформы поддерживалась на уровне +25 °C, а сам процесс велся в атмосфере аргона, защищающей поверхность от окислительных реакций. Выбранная плотность энергии (200 Дж/мм<sup>3</sup>) обеспечила достаточную температуру для плавления порошка и эффективного плавления предыдущего слоя, гарантируя качественное соединение соседних дорожек расплава. Далее образцы были обработаны: верхние слои толщиной около 400 мкм удалялись посредством шлифовки и полировки алмазными пастами. Затем измерялась средняя пористость образцов по результатам анализа девяти изображений микроскопических срезов.

Для детального изучения влияния выбранной стратегии сканирования на микроархитектуру и пористость образцов были использованы четыре разные схемы перемещения лазерного луча.

Первая схема (∠ 90): при каждой смене слоя направление лазерного луча изменяется на угол 90°, что обеспечивает перпендикулярное изменение направления сканирования.

Вторая схема (∠ 45): здесь направление движения лазера меняется на угол 45° при переходе от одного слоя к другому, что создаёт диагональную траекторию сканирования.

Третья схема (∠ 90S/2): движение лазера осуществляется с изменением угла на 90° на каждом нечётном слое (n, n+2 и далее), тогда как чётные слои (n+1, n+3 и последующие) сканируются параллельно направлению предыдущего слоя, однако с небольшим сдвигом трека на половину шага S/2.

Четвёртая схема (∠90п.п.): данная стратегия предполагает двойное прохождение лазерного луча по каждому слою, причём второй проход выполняется с перемещением трассы на половину шага S/2, а угол поворота направления луча составляет 90° при переходе от слоя к слою.

В результате повторного переплава на поверхности слоя образовались большие капли расплава диаметром от 0,2 до 0,5 мм, что нарушило равномерность укладки следующего слоя порошка и вызвало наличие непроплавленных участков. Вследствие этого не удалось завершить выращивание образца нужной толщины, и оценку пористости для данного экземпляра не проводили ввиду отсутствия смысла.

График зависимости средней величины пористости от использованной стратегии сканирования наглядно демонстрирует, что минимальное значение пористости, составляющее всего 0,03 %, характерно для образца, полученного с применением третьей стратегии сканирования (рисунок 1).



Рис. 1. Зависимость среднего значения пористости образца от стратегии сканирования

Плотность является ключевым критерием оценки качества изделий. Габаритные размеры образцов, измеренные штангенциркулем, составили 10×10×3 мм (длина × ширина × высота). Массу образцов определили с помощью аналитических весов ВСТ-600/10, получив следующее значение: первый и второй образцы имели массу 0,748 г, третий образец – 0,75 г. Расчеты показали, что плотность первых двух образцов равна 2,49 г/см<sup>3</sup>, а образец, созданный с использованием третьей схемы сканирования, достиг плотности 2,5 г/см<sup>3</sup>, что сопоставимо с плотностью традиционного силумина.

В ходе проведенных исследований рассмотрено влияние различных стратегий сканирования на пористость и относительную плотность образцов. Образец из порошковой композиции AlSi8Mg с высокой относительной плотностью (99,97 %) был получен методом селективного лазерного плавления. Качество поверхности оказалось чувствительным к величине плотности энергии. Среди рассмотренных вариантов лучшими условиями оказались плотность энергии 200 Дж/мм<sup>3</sup> и третья схема сканирования (III): направление движения лазерного луча изменяли на угол 90° при обработке каждого нечётного слоя (n, n+2 и т.д.), а в чётных слоях (n+1, n+3 и т.д.) луч двигался параллельно предыдущему слою, при этом линия прохождения («трек») сдвигалась на половину шага S/2 (обозначаемая как  $\angle$ 90S/2). Именно эта комбинация позволила достичь наивысшей относительной плотности. Экспериментально подтверждено, что плотность получаемого сплава AlSiMg определяется выбранной стратегией сканирования. Рассчитанная плотность образца составила 2,49 г/см<sup>3</sup> для первой и второй партии образцов и достигла 2,5 г/см<sup>3</sup> для образца, выполненного по третьему варианту сканирования (III), что совпадает с плотностью силумина.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01491, https://rscf.ru/project/22-29-01491

Список использованных источников:

1. Oliveira J.P. Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing / J.P. Oliveira, A.D. LaLonde, J. Ma // Materials and Design. – 2020. – Vol. 193. – 108762. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108762.

2. Fabrication of titanium alloy frameworks for complete dentures by selective laser melting / M. Kanazawa, M. Iwaki, S. Minakuchi, N. Naoyuki // Journal of Prosthetic Dentistry. – 2014. – Vol. 112 (6). – 1441-7. – DOI: https:10.1016/j.prosdent.2014.06.017.

3. A review of laser powder bed fusion additive manufacturing of aluminium alloys: Microstructure and properties / H.R. Kotadia, G. Gibbons, A. Das, P.D. Howes // Additive Manufacturing. – 2021. – Vol. 46. – 102155. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102155. 4. Synthesis of a three-component aluminum-based alloy by selective laser melting / N. Saprykina, V. Chebodaeva, A. Saprykin [and et.] // Obrabotka Metallov. – 2022. – 24 (4). – P. 151–164. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-151-164.

5. Optimization of selective laser melting modes of powder composition of the AlSiMg system / N. Saprykina, V. Chebodaeva, A. Saprykin [and et.] // Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. -2024. - 26 (1). -P. 22-37. - DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.1-22-37.

## РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОРИСТОЙ КЕРАМИКИ

А.И. Дмитриев<sup>а</sup>, д.ф.-м.н., г.н.с., Е.В. Шилько, д.ф.-м.н., г.н.с. <sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН 634055, Томская обл., г. Томск, пр. Академический, 2/4 E-mails: <sup>a</sup>dmitr@ispms.ru

Аннотация: В работе на основе комплекса экспериментальных данных разработана компьютерная модель огнеупорного материала, синтезированного из порошка диоксида кремния. Модель базируется на представлении огнеупора как дисперсно-упрочненного композита и учитывает две составляющие внутренней структуры: мелкозернистые области («матрица»), с которыми связана пористость материала, и упрочняющие крупные зерна («включения»). Результаты испытаний показывают хорошее согласие с экспериментальными данными.

Ключевые слова: огнеупор SiO<sub>2</sub>, пористая структура, компьютерное моделирование.

**Abstract:** In this paper, a computer model of a refractory material synthesized from  $SiO_2$  powder was developed. The model is based on the representation of the refractory as a dispersion-hardened composite and takes into account two components of the internal structure: fine-grained areas («matrix»), which are associated with the porosity of the material, and strengthening large grains («inclusions»). The test results show good agreement with the experimental data.

Keywords: SiO<sub>2</sub>-based refractory, porous structure, computer simulation.

Введение. Керамические материалы широко применяются в современной промышленности благодаря уникальному сочетанию свойств: высокой термостойкости (до  $2000^{\circ}$ С), химической инертности, износостойкости и прочности при сохранении низкой теплопроводности. Они незаменимы в металлургии (футеровка печей), энергетике (теплоизоляция), машиностроении (износостойкие детали) и электронике (диэлектрики). Особое значение имеют огнеупорные керамики на основе SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и MgO, способные выдерживать экстремальные термические и механические нагрузки в агрессивных средах, что делает их критически незаменимыми для высокотемпературных производственных процессов. В ходе эксплуатации такие материалы подвергаются интенсивным термическим нагрузкам, которые приводят к высоким деформациям, напряжениям и их градиентам в объеме изделий. Кроме того, поскольку огнеупорные изделия футеровочных слоев находятся в механически стесненных условиях, то термическое расширение может приводить к формированию сжимающих, растягивающих или касательных напряжений, а также их комбинаций. Огнеупорные изделия также могут подвергаться эпизодическим механическим воздействиям при перемещениях или поворотах агрегатов (например, ковшей), загрузке лома, сервисном обслуживании т. д. Поэтому современные огнеупорные керамических характеристик.

К ключевым механическим характеристикам керамик обычно относят прочность на сжатие, асимметрию прочности (отношение прочности на сжатие к прочности на растяжение) и вязкость разрушения (комплексный параметр, связанный с работой разрушения и способностью материала тормозить рост внутренних трещин и разрушаться квазихрупко). Данные характеристики определяются не только фазовым составом материала, но и в значительной степени особенностями внутренней структуры. Действительно, даже однофазные огнеупоры имеют сложную и многомасштабную структуру, которая к тому же претерпевает изменения в процессе эксплуатации [1]. Ее ключевыми элементами являются: зерна (керамические частицы, из которых спекается огнеупор), межзеренные интерфейсы, поры, а также плоскостные несплошности (термические микротрещины, возникшие на стадии охлаждения спеченного изделия, зазоры субмикронной или наномасштабной апертуры между неплотно прилегающими зернами и т. д.). Особое влияние на механические свойства оказывает поровая структура, которая варьируется в зависимости от размера, формы и распределения пор. Даже при одинаковой общей пористо изменение этих параметров может качественно и количественно менять поведение материала.

Для осознанного управления структурой в огнеупорном материале необходимо понимание влияния каждого из перечисленных факторов на механические свойства, а также их возможного взаимовлияния. Эффективным подходом к проведению такого анализа является компьютерное моделирование с применением низкоуров-