

Благодаря такому расположению пластин, в объеме насадки происходит самораспределение жидкости, а количество форсунок можно заметно сократить. Так же преимуществом данной конструкции является то, что каждая пластина, располагающаяся на ступень выше предыдущей, выступает в роли каплеуловителей, позволяя отказаться от дополнительной установки сепарационных устройств.

Таким образом, научно обоснованное управление структурой потоков воды и воздуха в предлагаемых бесконтактных испарительных градирнях позволит обеспечить интенсификацию процессов тепломассопереноса, существенно снизить потери воды из-за капельного уноса, и, тем самым, улучшить экологическую обстановку вблизи промышленных предприятий. Кроме того, применение разработанной трехпоточной схемы охлаждения оборотной воды позволит значительно сократить объемы используемых химических реагентов для сдерживания развития бактериальных отложений.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-417.2019.8.

Список литературы:

1. Chichirova, N. D. Methods to reduce bacterial contamination of recycling cooling systems of a CHPP / N. D. Chichirova, A. A. Chichirov, S. M. Vlasov, A. Yu. Vlasova // Thermal Engineering. – 2015. – Vol. 62 (7). – P. 520-525.
2. Al-Bloushi, M. Performance assessment of oxidants as a biocide for biofouling control in industrial seawater cooling towers / M. Al-Bloushi, J. Saththasivam, S. Al-Sayeghc, S. Jeong, K. C. Ng, G. L. Amy, T. Leiknes // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2018. – Vol. 59. – P. 127-133.
3. Dmitrieva, O. S. Determination of the Heat and Mass Transfer Efficiency at the Contact Stage of a Jet-Film Facility / O. S. Dmitrieva, I. N. Madyshev, A. V. Dmitriev // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2017. – Vol. 90 (3). – P. 651-656.
4. Лесухин, М. С. Экспериментальное изучение тепло и массообмена при конденсации водяного пара из паровоздушной смеси в аппарате с вертикальными контактными решетками / М. С. Лесухин, Д. А. Крючков, Л. Г. Григорян // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2015. – № 3. – С. 180-187.

СЕЛЕКТИВНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ПЛАВЛЕНИЕ МАГНИЯ

*Н.А. Сапрыкина, к.т.н., доц., А.А. Сапрыкин, к.т.н., доц., Е.А. Ибрагимов, к.т.н., ст. препод.
Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета,
652055, Кемеровская область, г.Юрга, Ул. Ленинградская, 26, тел. (38451) 7-77-61
e-mail: saprikina@tpu.ru*

Аннотация: материалы на основе магния применяются преимущественно при разработке облегченных конструкций за счет его низкой плотности в автомобильной, аэрокосмической промышленности и биомедицине. В данной статье представлен обзор по внедрению магния в технологии SLM и описаны поисковые эксперименты по получению образцов из порошка магния МПФ-4 (ГОСТ 6001-79) в лаборатории аддитивных технологий отделения промышленных технологий Юргинского технологического института.

Abstract: magnesium-based materials are mainly used in the development of lightweight structures due to its low density in the automotive, aerospace and Biomedicine industries. This article provides an overview of the implementation of magnesium in SLM technology and describes the search experiments to obtain samples from magnesium powder MPF-4 (GOST 6001-79) in the laboratory of additive technologies of the Department of industrial technologies of the Yurga technological Institute.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление (SLM); магний; аддитивное производство; микроструктура; механические свойства.

Keywords: selective laser melting (SLM); magnesium; additive manufacturing; microstructure; mechanical properties.

Магний (Mg) является самым распространенным элементом земной коры. Материалы на основе магния являются самыми легкими конструкционными материалами, с плотностью всего 1,74 г/см³, это ~33%, ~61% и ~77% ниже, чем у алюминия, титана и железа, соответственно [1]. Материалы на основе магния также обладают хорошими литейными свойствами, отличной обрабатываемостью, высокими демпфирующими свойствами, высокой тепло- и электропроводностью, устойчивостью

к электромагнитному излучению [2]. Однако области применения магния ограничено из-за низкой коррозионной стойкости и относительно плохими механическими свойствами, такими, как низкий модуль упругости, низкая прочность. Но эти недостатки магния превратились в его достоинства при использовании магния в качестве биоматериала. Сочетание превосходной биосовместимости, биоразлагаемости, низкого модуля упругости, близкого к модулю упругости человеческой кости делают магний одним из самых востребованных материалов в ортопедии для изготовления имплантатов и фиксирующих устройств. Материалы на основе магния имеют низкий модуль Юнга (41-45 ГПа), по сравнению с другими биосовместимыми металлическими материалами, такими как титан и его сплавы (55-110 ГПа), нержавеющая сталь 316L (210 ГПа), кобальтохромовые сплавы (240 ГПа) [3, 4]. Хотя магний имеет много преимуществ, его использование все еще ограничено в клинических применениях. Поэтому исследователи разрабатывают все новые сплавы, со специальными свойствами, на основе магния для в биомедицинского применения. Изделия на основе магния обычно изготавливаются литьём или порошковой металлургией. Однако эти методы не позволяют изготавливать изделия сложных геометрических форм с внутренней конфигурацией и уникальной микроструктурой. [5].

В последние годы для изготовления индивидуальных изделий и персонализированных имплантатов с улучшенными механическими и физическими свойствами применяют методы аддитивных технологий. Среди аддитивных технологий, для получения изделий из металлических порошковых материалов с высокой плотностью, огромный потенциал имеет метод селективного лазерного плавления (selective laser melting – SLM). Последовательность процесса SLM включают в себя: проектирование 3D-модели изделия; разбиения модели на слои, толщиной (20-100 мкм), с помощью специального программного обеспечения; подачу защитного газа (аргона или азота) в камеру для предотвращения окисления; подачу тонкого слоя металлического порошка с помощью каретки или разравнивающих роликов; сканирование (плавление) слоя порошка по заданной траектории на основе 3D модели; опускание платформы на величину, равную толщине следующего слоя. Последние три этапа повторяются до полного построения изделия.

Из-за интенсивного теплового воздействия лазера, частицы порошка быстро нагреваются, плавятся и образуется бассейн расплава в течение нескольких миллисекунд (обычно от 0,5 до 25 мс). Под действием поверхностного натяжения расплава образуются коагулированные частицы [6]. Быстрое воздействие лазера на порошковый материал приводит к образованию переходного температурного поля с эффектом быстрой закалки при очень высоких скоростях охлаждения до 10^6 °C/c [7]. Быстрое затвердевание может вызвать развитие неравновесных металлургических явлений, таких как микроструктурные упрочнения, закалки и формирования метастабильных фаз, которые существенно влияют на улучшение механических свойств и коррозионную стойкость [8]. Также SLM имеет возможность для изготовления изделий сложных геометрических форм с градиентной структурой [9].

При использовании в SLM металлических порошковых материалов требуется тщательный подбор технологических параметров обработки для устранения окисления, коагуляции, низкой плотности, нестабильности треков, образования трещин и расслоения изделия, контролируется до 170 параметров [10]. Переменные процесса SLM можно разделить на две основные группы, а именно, параметры режима и параметры исходного материала. Среди этих параметров первостепенное значение имеют взаимосвязанные факторы контроля атмосферы (т.е. параметры, связанные с процессом) и склонность к окислению сырья (то есть параметры, связанные с сырьем), когда речь идет о минимизации окисления.

Было установлено, что среди параметров SLM: мощность лазера (P) и скорость лазерного сканирования (V) и толщина слоя (S) оказывают наибольшее влияние на микроструктуру и механические свойства сплавленных лазером деталей. Соотношение между параметрами можно объединить в термин, называемый линейной плотностью энергии. Линейная плотность энергии определяет количество мощности лазера, воздействующего на слой порошка, на единицу площади и скорости сканирования [11]:

$$E = \frac{P}{V \cdot S}, \text{ Дж} / \text{мм}^2.$$

Многие исследователи показали [12], что улучшение механических свойств поверхности и получение новых микроструктур в процессе лазерного воздействия и быстрого затвердевания может быть достигнуто путем изменения параметров процесса плавления. Zheng [13] написал, что осажденный лазером материал испытывает эффект быстрой закалки в последствии высокой скорости охлаж-

дения. Было обнаружено, что уменьшение размеров зерна приводит к увеличению твердости поверхности. В [14] указано, что плавление магния происходит между значениями плотности энергии $1,27 \times 10^9$ Дж / м² и $7,84 \times 10^9$ Дж / м². Значения плотности энергии ниже $1,27 \times 10^9$ Дж / м² недостаточно для расплавления порошка [14]. Возможно, это связано с тем, что температура плавления магния (650°C) не была достигнута. Образцы, полученные из расплавленного лазером магния, не имеют пор или трещин. Высокие скорости затвердевания препятствуют распределению оксидных элементов между зернами α -Mg [15].

Как и ожидалось, изменение различных параметров SLM приводят к различным скоростям затвердевания расплавленной ванны и термическим циклам, что влияло на микроструктуру расплавленной зоны. Изображения, полученные сканирующей электронной микроскопией, подтверждают, что все расплавленные зоны состоят только из равноосных α -Mg с высокой плотностью межзеренных границ. Средние размеры зерен составляют около 2,30 мкм, 2,82 мкм, 3,65 мкм, 4,10 мкм и 4,87 мкм соответственно. Очевидно, что средний размер зерна α -Mg увеличивается при более высоких значениях плотности энергии лазера. Следовательно, в зоне плавления образуется более крупное зерно при более низкой скорости охлаждения. Эту тенденцию можно объяснить взаимосвязью между размером зерна и плотностью энергии лазерного излучения в расплавленной зоне.

Анализ литературы показывает, что в последнее время растет количество исследований по получению материалов на основе магния для изготовления изделий сложной геометрической формы в автомобильной, аэрокосмической промышленности и индивидуальных имплантатов с уникальными функциональными свойствами. Изменение микроструктуры в зоне плавления поверхности магниевых порошков в значительной степени контролируется плотностью энергии. Однако, по сравнению с железом, титаном, никелем и алюминиевыми сплавами, исследования по внедрению магния в SLM все еще находятся в начальном состоянии и необходимо провести значительный объем исследований, прежде чем магний будут широко применять в промышленности. Также необходимо отметить сложность повторяемости экспериментов на разных установках, с разным порошковым материалом.

В лаборатории «Аддитивных технологий» отделения промышленных технологий Юргинского технологического института проводятся исследования по определению оптимальных режимов селективного лазерного плавления порошка магния МПФ-4 (ГОСТ 6001-79) на установке ВАРИСКАФ-100МВС, позволяющей изменять основные технологические параметры плавления, рис. 1.

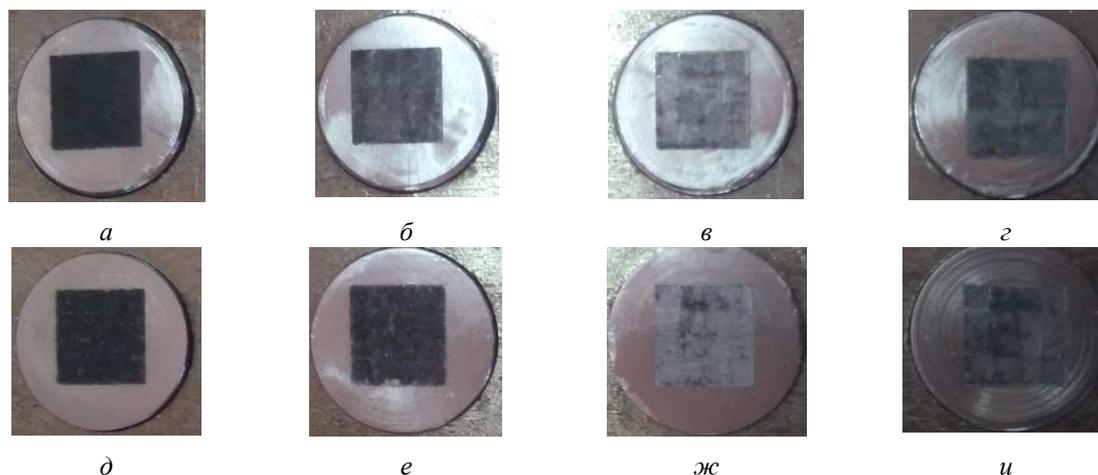


Рис. 1. Фотографии образцов, полученных методом SLM из магния на разных режимах (x2):
а – $P=20$ Вт, $V=10$ мм/с, $E=40$ Дж/мм²; б – $P=30$ Вт, $V=20$ мм/с, $E=30$ Дж/мм²; в – $P=50$ Вт, $V=30$ мм/с, $E=33,3$ Дж/мм²; г – $P=60$ Вт, $V=40$ мм/с, $E=30$ Дж/мм²; д – $P=20$ Вт, $V=20$ мм/с, $E=20$ Дж/мм²; е – $P=30$ Вт, $V=30$ мм/с, $E=20$ Дж/мм²; ж – $P=50$ Вт, $V=40$ мм/с, $E=25$ Дж/мм²; з – $P=60$ Вт, $V=50$ мм/с, $E=24$ Дж/мм²

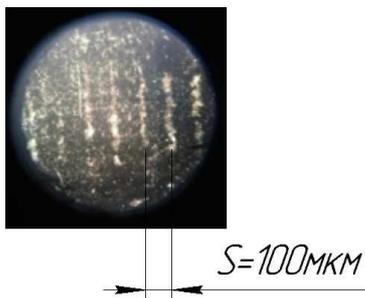


Рис. 2. Оптическое изображение поверхности из порошка магния,
 $P=50 \text{ Вт}$, $V=30 \text{ мм/с}$, $E=33,3 \text{ Дж/мм}^2$, $s=100 \text{ мкм}$

Был проведен двухфакторный эксперимент по нахождению требуемой мощности лазера (P изменялась от 20 до 60 Вт) и скорости перемещения лазера (изменялась от 10 до 50 мм/с), диаметр частиц порошка 50 мкм, частота следования импульсов лазера составляла 300Гц, толщина слоя порошка 50 мкм, шаг 100 мкм, материал подложки-титан. Процесс проводился в защитной среде аргона (Марка 5.0) В результате были получены восемь образцов 10x10 мм на разных технологических режимах SLM. На рис. 2 показано оптическое изображение поверхности, полученной из магниевго порошка. На рисунке отчетливо видны треки расплавленного порошка с шагом 100 мкм.

Полученные результаты показывают, что при одинаковой плотности энергии расплавленная поверхность имеет разное качество. Равномерно расплавленный слой, с включениями коагулированных частиц, был получен при небольшой мощности P до 30 Вт и скорости перемещения лазера V до 30 мм/с

(рис. 1, а, б, д, е). При увеличении мощности до 50 Вт наблюдается равномерное формирование треков на расстоянии, равном шагу сканирования. Поверхность образцов окислена, что указывает на необходимость увеличения концентрации аргона и предварительной подготовки порошкового материала. Изменяя режимы лазерного плавления можно управлять структурой поверхности.

Список литературы:

1. Mordike, B.; Ebert, T. Magnesium: Properties–Applications–Potential. *Mater. Sci. Eng. A* 2001, 302, 37–45.
2. Froes, F.; Eliezer, D.; Aghion, E. The science, technology, and applications of magnesium. *JOM* 1998, 50, 30–34.
3. Sietsema, W. Animal models of cortical porosity. *Bone* 1995, 17, S297–S305.
4. Ковалевская Ж. Г. , Шаркеев Ю. П. , Корчагин М. А. , Химич М. А. , Ибрагимов Е. А. , Сапрыкин А. А., Батаев В. А. Исследование строения порошкового сплава Ti-40Nb, полученного механической активацией // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. - 2016 - Т. 4 (73) . - С. 34-42.
5. Tandon, R.; Madan, D. Emerging applications for magnesium alloy powders. *Powder Metall.* 2014, 57,236–241.
6. Сапрыкина Н. А. , Сапрыкин А. А. , Шигаев Д. А. Исследование факторов, влияющих на качество поверхности, полученной лазерным спеканием // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. - 2011 - №. 4(53) - С. 78-82.
7. Li, Y.; Gu, D. Parametric analysis of thermal behavior during selective laser melting additive manufacturing of aluminum alloy powder. *Mater. Des.* 2014, 63, 856–867.
8. Zhang, H.; Zhang, D.; Ma, C.; Guo, S. Improving mechanical properties and corrosion resistance of Mg-6Zn-Mn magnesium alloy by rapid solidification. *Mater. Lett.* 2013, 92, 45–48.
9. Sing, S.L.; An, J.; Yeong, W.Y.; Wiria, F.E. Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs. *J. Orthop. Res.* 2016, 34, 369–385.
10. Olakanmi, E.; Cochrane, R.; Dalgarno, K. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Prog. Mater. Sci.* 2015, 74, 401–477.
11. Parande, G.; Manakari, V.; Gupta, M. Selective Laser Melting of Magnesium and Magnesium Alloy Powders: A Review. *Metals* 2017, 7, 2; doi:10.3390/met7010002.
12. M.M. Savalani, L. Hao, R.A. Harris, Evaluation of CO2 and Nd: YAG lasers for the selective laser sintering of HAPEX (R), *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B: J. Eng. Manuf.* 220 (2006) 171–182.
13. B. Zheng, Y. Zhou, J.E. Smugeresky, J.M. Schoenung, E.J. Lavernia, Thermal behavior and microstructure evolution during laser deposition with laser-engineered net shaping: part II. Experimental investigation and discussion, *Metall. Mater. Trans. A (Phys. Metall. Mater. Sci.)* 39 (2008) 2237–2245.
14. M.X. Zhang, H. Huang, K. Spencer, Y.N. Shi, Nanomechanics of Mg–Al intermetallic compounds, *Surf. Coat. Technol.* 204 (2010) 2118–2122.
15. G. Abbas, Z. Liu, P. Skeldon, Corrosion behaviour of laser-melted magnesium alloys, *Appl. Surf. Sci.* 247 (2005) 347–353.