

**Даниил Константинович Зиманов¹, Марина Михайловна Абрамова¹,
Нариман Айратович Еникеев¹**

¹Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия

*zimanov02@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ ПОЛИРОВКИ НА РАЗМЕР ПОР КАРКАСНЫХ СТРУКТУР, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

В исследовании рассматривается проблема налипания нерасплавленного порошка на пористые каркасы из титанового сплава, изготовленные методом селективного лазерного плавления (SLM). Пористые титановые сплавы с тройной периодической минимальной поверхностью (TPMS) IWP-структурой были подготовлены для динамической химической полировки. Для оценки их поверхностных свойств была применена динамическая химическая полировка, которая, как предполагается, позволяет удалить прилипший порошок и улучшить качество поверхности. Применение динамической химической полировки привело к обнаружению прямо пропорциональной связи между увеличением размера пор и временем полирования.

Ключевые слова: пористый каркас, IWP, химическая полировка, размер пор, порошок.

Daniil K. Zimanov, Marina M. Abramova, Nariman A. Yenikeev

EFFECT OF CHEMICAL POLISHING ON PORE SIZE OF SCAFFOLDS PRODUCED BY THE SELECTIVE LASER MELTING METHOD

Annotation. The study addresses the problem of unmelted powder adhesion on porous titanium alloy frameworks fabricated by selective laser melting (SLM). Porous titanium alloys with triple periodic minimum surface (TPMS) IWP structure were prepared for dynamic chemical polishing. Dynamic chemical polishing was applied to evaluate their surface properties, which is expected to remove adhering powder and improve the surface quality. The application of dynamic chemical polishing led to the discovery of a directly proportional relationship between the increase in pore size and polishing time.

Keywords: scaffolds, IWP, chemical polishing, pore size, powder.

Скаффолды (или каркасные структуры) представляют собой трёхмерные матрицы, которые служат основой для роста и регенерации клеток. Они играют ключевую роль в процессе восстановления и замещения повреждённых или утраченных тканей и органов, обеспечивая поддержку для клеток, необходимых для формирования новых тканей.

Современные подходы к разработке скаффолдов включают использование технологий аддитивного производства, таких как 3D-печать, что позволяет создавать сложные структуры с заданными механическими свойствами и пористостью.

Селективное лазерное плавление (SLM) - это один из передовых методов аддитивного производства, основанный на порошковой металлургии и лазерных технологиях. В этом методе компоненты изготавливаются путём селективного наплавления слоя порошка на основе 3D CAD-модели требуемого компонента в среде защитного газа, такого как аргон [1]. Этот процесс включает нагрев и расплавление порошкообразного материала, из которого будет напечатан компонент, с помощью высокоэнергетического лазерного луча с последующим быстрым затвердеванием расплавленной ванны [2],[3].

Одним из важных факторов в процессе SLM является порошок, свойства которого влияют на микроструктурные и механические свойства продуктов SLM [4].

Пористые каркасы из титанового сплава, изготовленные с использованием этой технологии, широко используются в ортопедических имплантатах в индустрии медицинских устройств. Эти каркасы эффективно снижают модуль упругости материалов из титанового сплава и способствуют васкуляризации и росту костей [5].

Однако в процессе селективного лазерного сплавления возможно неполное расплавление частиц порошка, что приводит к их прилипанию к поверхности каркасов во время процесса формования. Такие дефекты печати могут приводить к закупориванию пор, что препятствует васкуляризации, а также выделение порошинок в окружающие ткани после имплантации, что может вызвать нежелательные явления в организме. Также налипание частиц порошка может приводить к образованию очагов зарождения трещин. Таким образом, решение проблемы удаления частиц порошка, прилипшего к поверхности материала имеет важное значение для применения каркасных структур в восстановительной медицине.

Для конструкций со сложной внутренней структурой, изготавливаемых с помощью порошковых аддитивных технологий механическая обработка (механическая или виброабразивная обработка) не способна обеспечить желаемую гладкость поверхности и удалить свободные частицы порошка, оставшиеся после процессов сборки. Химическая полировка является одним из наиболее подходящих методов для решения проблемы прилипшего порошка на поверхности каркасов с малыми отверстиями [6],[7].

Цель: Исследовать влияние химической полировки на размер пор и разрушение каркасных структур.

В качестве объекта исследований использовали образцы титанового двухфазного ($\alpha+\beta$) сплава Ti-6Al-4V, полученные методом селективного лазерного сплавления.

С помощью утилиты «SpaceClaim» и плагина «MSLattice», создали геометрию элементарной ячейки, спроектированную благодаря,

трехпериодическому параметрическому подходу к минимальной поверхности (TPMS или ТПМП): IWP (трижды периодическая минимальная поверхность). Пористые структуры с размерами пор от 374 до 700 мкм, были помещены в цилиндрический образец высотой 10 мм и диаметром 6 мм, пригодный для испытаний на механическое сжатие. Модели были преобразованы в формат STL, используемый в АМ, для точной печати мелких пор.

Подвергли образцы химическому полированию в растворе 2.2% HF+20% HNO₃. Образцы помещались в указанный раствор в ультразвуковой ванне и подвергались полированию от 2 – 90 минут в зависимости от вида пористой структуры. Далее образцы промывались в ацетоне в ультразвуковой ванне и высушивались в сушильном шкафу при 100°C. После полирования были проведены исследования поверхности каркасов на предмет наличия порошинок и сохранения размеров пор.

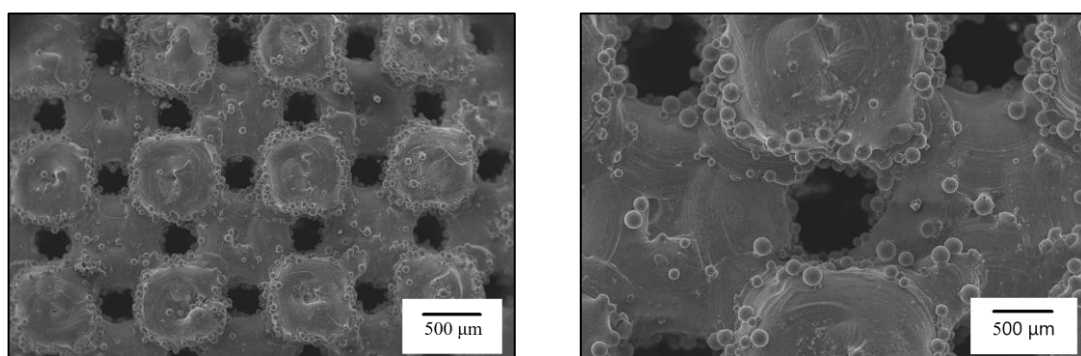


Рис 1. Исходная микроструктура пористых образцов IWP-374, напечатанных на 3D-машине

Показано, что время полирования зависит от формы и размера пор. Подобрано оптимальное время, позволяющее в значительной степени удалить оставшиеся частицы порошка на поверхности материала при сохранении целостности каркаса. В результате исследований, выяснили что, размер пор увеличивается с увеличением времени полирования. Построена зависимость изменения размера пор от времени полировки с целью контроля размера пор в итоговом изделии.

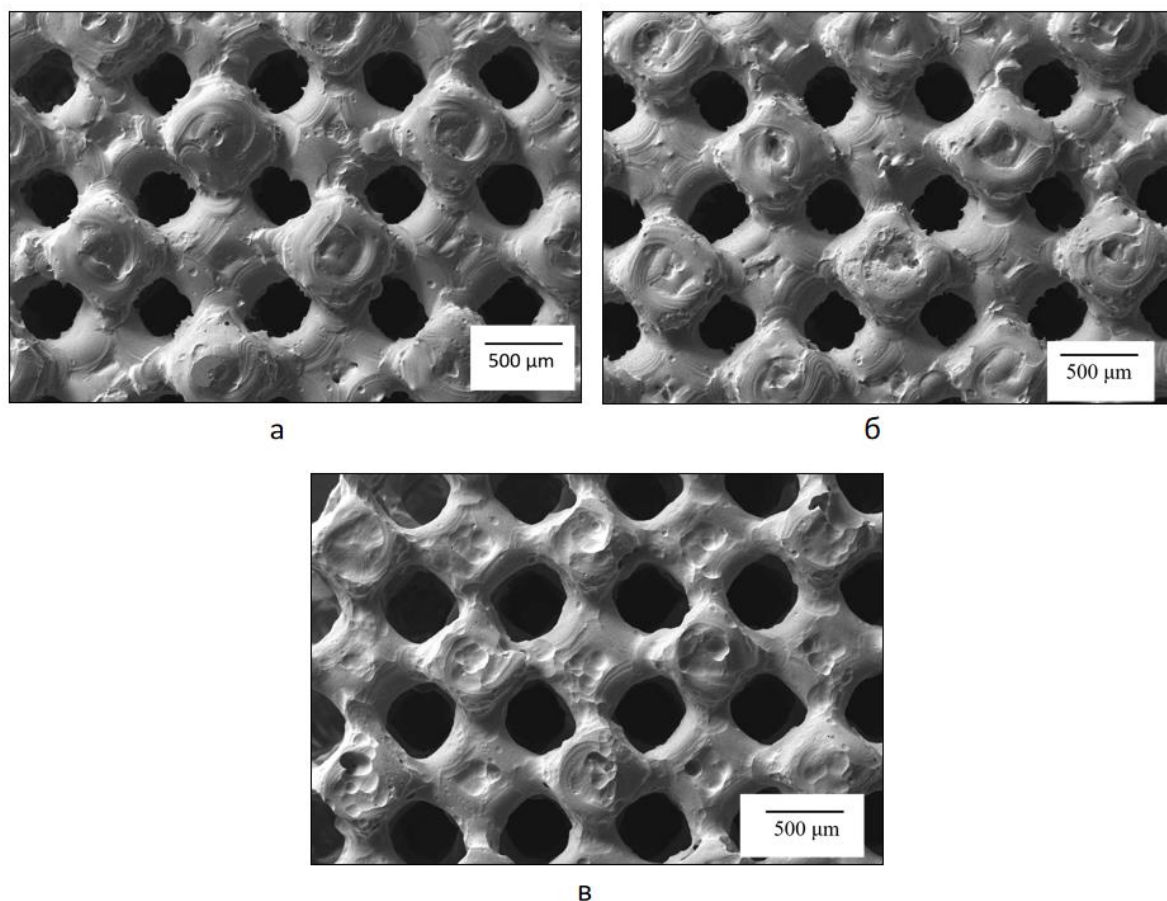


Рис 2. Микроструктура пористых образцов IWP-374 после химической полировки:
а – 15 мин, *б* – 30 мин, *в* – 45 мин

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-69-10003).

REFERENCES

- 1 Davydova, A. Selective laser melting of boron carbide particles coated by a cobalt-based metal layer / A. Davydova [et al] // J. Mater. Process. Technol. 2016. V. 229. P. 361–366. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.033>
- 2 Chivavibul P. Effects of carbide size and Co content on the microstructure and mechanical properties of HVOF-sprayed WC-Co coatings / P. Chivavibul // Surf. Coatings Technol. 2007. V. 202 P. 509–521. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.06.026>.
- 3 Lee H.C. Hardness and deformation of cemented tungsten carbide / H.C. Lee // Mater. Sci. Eng. 1978. V. 1 P. 125–133. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(78\)90163-5](https://doi.org/10.1016/0025-5416(78)90163-5).
- 4 Gu D. Selective laser melting additive manufacturing of Tibased nanocomposites: the role of nanopowder / D. Gu, H. Wang, G. Zhang // Metall. Mater. Trans. A. 2014. V. 45 P. 464–476 <https://doi.org/10.1007/s11661-013-1968-4>.

- 5 Bozkurt Y. 3D printing technology; methods, biomedical applications, future opportunities and trends / Y. Bozkurt, E. Karayel // J Mater Res Technol. 2021. V. 14. P. 1430-1450. 10.1016/j.jmrt.2021.07.050
- 6 Pyka G. Surface Roughness and Morphology Customization of Additive Manufactured Open Porous Ti6Al4V Structures / G. Pyka [et al] // Materials. 2013. V. 6 P. 4737-4757. 10.3390/ma6104737
- 7 Łyczkowska E. Chemical polishing of scaffolds made of Ti-6Al-7Nb alloy by additive manufacturing / E. Łyczkowska [et al] // Arch Civil Mech Eng. 2014. V. 14. № 4. P. 586-594. 10.1016/j.acme.2014.03.001