

УДК 621.791.725

Влияние режимов SLM печати сплава Ti6Al4V на порообразование и прочностные характеристики поддерживающих структур

Бинков Иван Игоревич¹

binkovii@bmstu.ru

SPIN-код: 8872-9979

Новиков Александр Сергеевич^{1,2}

nas20t257@student.bmstu.ru

Нуждин Александр Юрьевич²

salex.original@gmail.com

Молчанов Сергей Алексеевич²

molchanov@conmet.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия² ООО «Конмет», Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены причины трещинообразования в образце, изготовленном из сплава Ti-6Al-4V методом селективного лазерного плавления. Проведен томографический анализ пористости образцов, напечатанных в стандартном и тестовых режимах, показавший снижение пористости с 6,57 % до 0,01 %. Испытания на растяжение выявили оптимальные режимы печати монолитных поддержек, обеспечивающие снижение количества дефектов и повышение механических свойств имплантатов. Термомеханический анализ позволил определить зоны с напряжениями, превышающими предел прочности материала. Приведены зависимости исследуемых характеристик от пористости для каждого режима печати.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, имплантаты, пористость, механические свойства, титановый сплав

Influence of SLM printing parameters on pore formation and strength characteristics of supporting structures

Binkov Ivan Igorevich¹

binkovii@bmstu.ru

SPIN-code: 8872-9979

Novikov Aleksandr Sergeevich^{1,2}

nas20t257@student.bmstu.ru

Nuzhdin Aleksandr Yurievich²

salex.original@gmail.com

Molchanov Sergey Alekseevich²

molchanov@conmet.ru

¹ BMSTU, Moscow, Russia² LLC "Conmet", Moscow, Russia

Abstract. The reasons of cracking in a sample made of Ti-6Al-4V alloy by the selective laser melting method are considered. The tomographic analysis of porosity of the samples printed in standard and test modes was carried out, which showed the porosity reduction from 6.57 % to 0.01 %. The tensile tests revealed the optimal printing modes of the monolithic supports providing a lower number of defects and an increase in the mechanical properties of the implants. Thermomechanical analysis was used to determine areas with stresses, exceeding the ultimate strength of the material. The dependences of the investigated characteristics on the porosity are presented.

Keywords: *selective laser melting, implants, porosity, mechanical properties, titanium alloy*

Введение. Технология селективного лазерного плавления (SLM) широко применяется для производства высокоточных и персонализированных медицинских имплантатов. Основное преимущество аддитивных технологий заключается в возможности синтеза конструктивных элементов сложной геометрии, труднореализуемой или недостижимой традиционными методами [1]. Ключевым ограничением широкого внедрения SLM печати является образование внутренних и поверхностных трещин при охлаждении деталей ниже температур фазовых и структурных превращений. Дефектообразование обусловлено множеством факторов: направлением газового потока, ориентацией относительно платформы, механическими свойствами, конфигурацией и количеством поддержек, а также параметрами лазерного плавления. Трещины возникают вследствие высоких термических и остаточных напряжений, формирующихся при охлаждении. Образцы с мартенситной микроструктурой, даже без термообработки, характеризуются повышенными пределами текучести и прочности при растяжении, но сниженным относительным удлинением [2]. Целью данной работы является определение способов оптимизации печати монолитных поддержек для предотвращения образования дефектов в поддерживаемых участках.

Методы и материалы. Моделирование процесса печати и возникающих во время печати напряжений выполнено в программе Materialise Magics 28.0 с использованием модуля Ansys Simulation Module V4.0.1. Для исследования причин трещинообразования, а также для анализа пористости образца был проведен томографический анализ на рентгеновском томографе Phoenix V|tome|x M300 с размером вокселя 10 мкм.

Образцы и деталь для анализа были напечатаны на установке TruPrint 1000 с использованием порошка сплава Ti–6Al–4V. Данный сплав характеризуется высокой коррозионной стойкостью, высокой биосовместимостью, высоким отношением прочности к весу и хорошими эксплуатационными характеристиками при повышенных температурах [2].

Расчет режимов для печати осуществлялся путем варьирования мощности лазера, скорости сканирования и толщины слоя таким образом, чтобы расчетная удельная энергия (1) соответствовала литературным данным [3].

$$E = \frac{P_L}{vht} \quad (1)$$

где P_L — мощность лазера, v — скорость сканирования, h — шаг сканирования, t — толщина слоя.

В дальнейшем механические свойства образцов, напечатанных на экспериментальных и стандартном режимах, оценивались на испытательной разрывной машине Walter + Bai AG по стандарту ASTM E8/E8M-22.

Результаты. Результат томографического анализа показан на рис. 1. Шкала «Deviation» [мм] отображает величину отклонения оцифрованной геометрии дефектного образца от исходной CAD-модели. Как можно заме-

тить, наблюдаемое отклонение превышает 1 мм в области фланца и монолитных поддержек (квадратной формы). Поддержки и монолит детали имеют трещины в одном сечении.

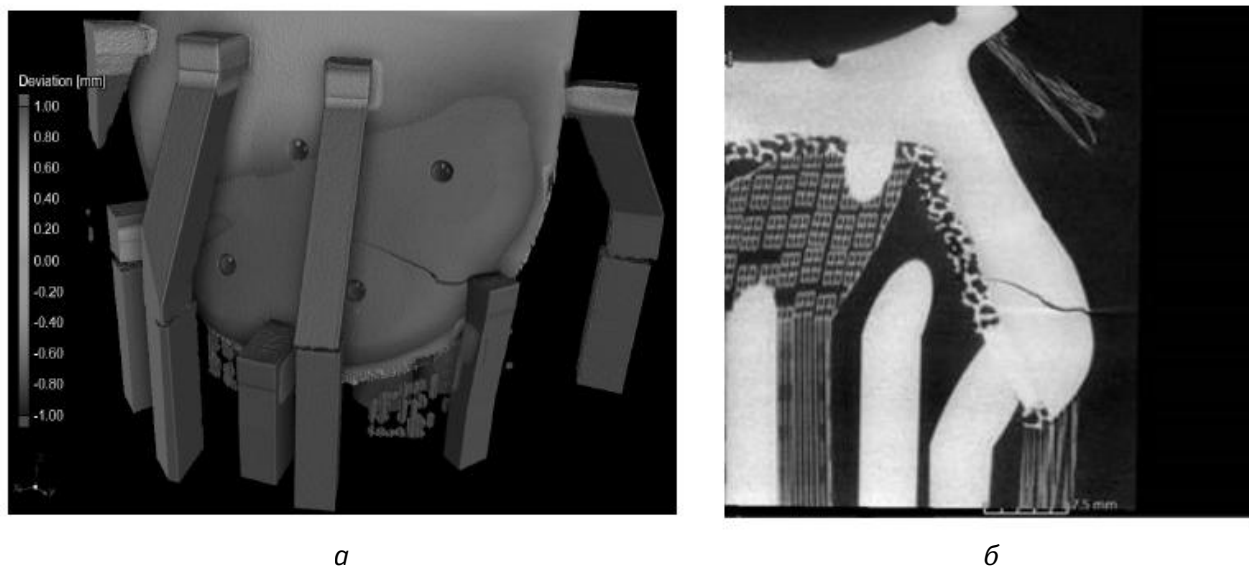


Рис. 1. Отклонение выращенной геометрии образца от исходной модели (а), сечение изделия с трещиной (б)

Из результатов симуляции процесса выращивания видно распределение эквивалентных напряжений по фон Мизесу выше 800 МПа (рис. 2). В сечении возникновения дефекта максимальное значение составляет 1370 МПа, что превышает предел прочности материала (850 МПа) в массиве основной детали, тогда как в монолитных поддержках критическое значение не достигается.

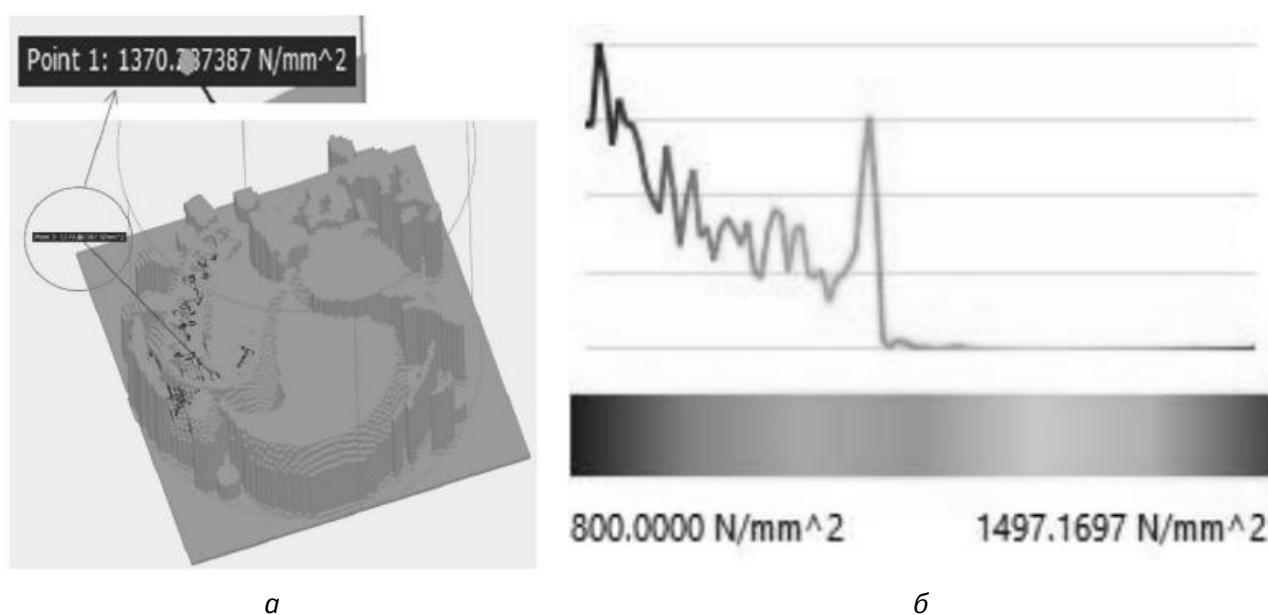


Рис. 2. Эквивалентные напряжения по фон Мизесу выше 800 МПа в сечении образования дефекта (а), шкала распределения напряжений (б)

При проведении анализа на наличие пор с помощью рентгеновского томографа в отдельно взятой поддержке образца было выявлено, что средняя пористость составляет $\sim 6,57\%$ (рис. 3, а) при среднем размере пор 0,2 мм (рис. 3, б).

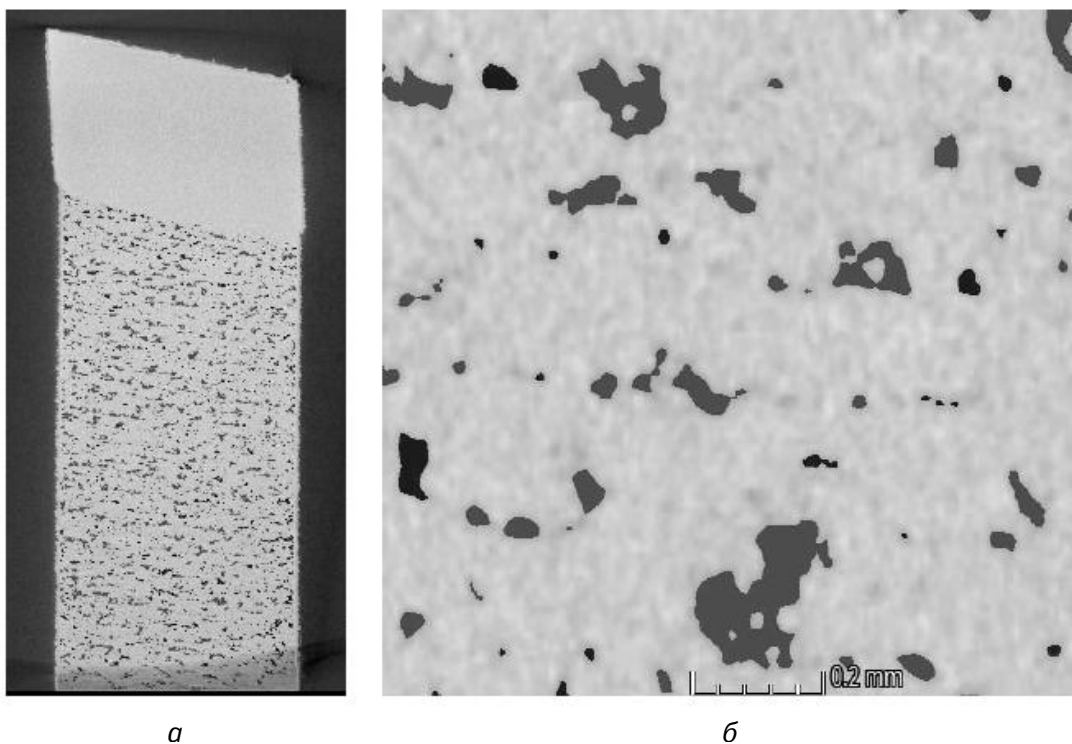


Рис. 3. Поры в материале монолитной поддержки (а), вид отдельно взятых пор с линейкой (б)

Обсуждение. Поскольку в процессе симуляции выращивания в подпорках не были достигнуты предельные значения напряжений, то можно сделать вывод о том, что подпорки начинают разрушаться при напряжениях, ниже предела прочности материала образца. В данном случае нарушается их возможность удерживать выращиваемую основную деталь от деформаций, вызывающих дефекты. Образование трещин в монолитных подпорках (рис. 1, а) может быть обусловлено критическими термическими напряжениями совместно с недостаточными механическими свойствами материала. На прочность материала влияют дефекты, вызванные некорректными параметрами печати.

Вследствие этого было решено напечатать по 3 образца на каждый из шести режимов, для поиска параметров печати монолитных поддерживающих структур, способных предотвратить образование дефектов в детали. В дальнейшем оптимальный режим определялся по наилучшим результирующим механическим характеристикам.

После печати образцов был проведен томографический анализ для определения объемной пористости. Было выявлено, что при увеличении удельной энергии, рассчитанной по формуле (1) для каждого режима, процент объема пор в образцах уменьшился, что говорит о положительном влиянии увеличения глубины проплавления слоя на свойства образцов.

После проведения механических испытаний на растяжение была получена зависимость механических характеристик от уровня пористости и удельной энергии (рис. 4).

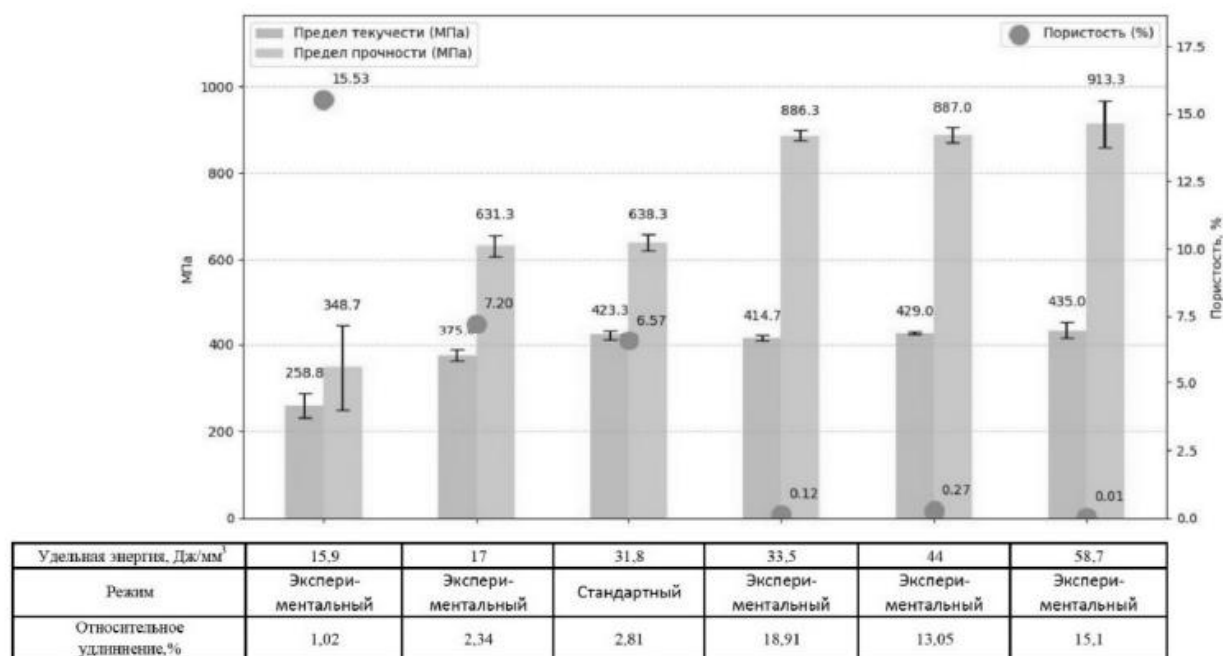


Рис. 4. Механические характеристики образцов экспериментальных и стандартного режимов в зависимости от пористости

Результаты испытаний на растяжение и данные томографического анализа пористости демонстрируют, что образцы серии 3 (стандартный режим печати), характеризуются относительно низкими значениями предела текучести ($\sigma_{\text{тек}} = 423,33$ МПа) и предела прочности ($\sigma_{\text{пр}} = 638,33$ МПа) при высоком значении пористости (6,57 %). Образцы серии 6 показали оптимальные механические характеристики: предел прочности — 913,33 МПа и предел текучести — 435 МПа. Образцы серий 4 и 5 также продемонстрировали высокие значения $\sigma_{\text{тек}}$ и $\sigma_{\text{пр}}$ при оптимизации параметра скорости сканирования и увеличении толщины слоя печати. Образцы серии 4 продемонстрировали наилучшее удлинение при разрыве достигнув значения 18,91 %, в то время как образцы серии 3 (стандартный режим печати) имеют значение удлинения при разрыве равным 2,81 %.

Заключение. При помощи термомеханического анализа были выявлены зоны с эквивалентными напряжениями по фон Мизесу до 1370 МПа, которые превышают предел прочности материала (850 МПа) и совпадают с местами расположения дефектов, обнаруженных на напечатанном изделии. Томографический анализ подтвердил снижение пористости с 6,57 % (стандартный режим) до 0,01 % (оптимизированный режим послойной печати). Испытания на растяжение позволили выявить значительное улучшение механических свойств: предел текучести увеличился на 2,8 % (до 435 МПа), предел прочно-

сти — на 43 % (до 913,33 МПа), модуль упругости — на 25 % (до 38 ГПа). Относительное удлинение при разрыве также возросло на 537 % (до 15,1 %). Режим серии 5 позволил сократить время печати на 23 % (до 18 часов 32 минут) благодаря стратегии печати через слой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Karolewska K., Ligaj B., Boroński D. Strain Analysis of Ti6Al4V Titanium Alloy Samples using Digital Image Correlation. *Materials*, 2020, no. 13, pp. 2–19. <https://doi.org/10.3390/ma13153398>
- [2] Benedetti M., Torresani E., Leoni M. et al. The effect of post-sintering treatments on the fatigue and biological behavior of Ti–6Al–4V ELI parts made by selective laser melting. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2017, vol. 71, pp. 295–306. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2017.03.010>
- [3] Xie W., Kirk C., Rejee A. et al. Enhancing geometric integrity and surface hardness of SLM-printed Ti–6Al–4V components with support structures and laser nitriding. *Surface & Coatings Technology*, 2024, vol. 494, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131378>
- [4] Leyens C., Peters M. *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*. Weinheim, Wiley-VCH, 2003, 512 p.
- [5] Nune K.C., Misra R.D., Li S.J. et al. Cellular response of osteoblasts to low modulus Ti–24Nb–4Zr–8Sn alloy mesh structure. *Journal of Biomedical Materials Research*, 2016, pt. A, vol. 105, no. 3, pp. 859–870. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.35953>
- [6] Warnke P.H., Douglas T., Wollny P. et al. Rapid prototyping: Porous titanium alloy scaffolds produced by selective laser melting for bone tissue engineering. *Tissue Engineering. Pt. C: Methods*, 2009, vol. 15, no. 2, pp. 115–124. <https://doi.org/10.1089/ten.tec.2008.0574>