

Научная статья  
УДК 620.18  
DOI: 10.34759/vst-2023-2-46-50

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Анастасия Михайловна Шувалова<sup>1</sup>✉, Алексей Сергеевич Филимонов<sup>2</sup>, Андрей Леонидович Галиновский<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева,  
Королев, Московская область, Россия

<sup>2,3</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
Москва, Россия

<sup>1</sup> nuts97@inbox.ru ✉

<sup>2</sup> alexf72@mail.ru

<sup>3</sup> galcomputer@mail.ru

**Аннотация.** Исследуются внутренняя структура и поверхностный слой образцов, изготовленных по технологии послойного лазерного спекания. Показано, что качество поверхности влияет на возможность применения технологии селективного лазерного спекания при изготовлении моделей для испытаний в аэродинамических трубах в аэродинамических трубах.

Утверждается, что исследование образца с помощью механического, лазерного или любого другого среза приводит к необратимому изменению его внутренней структуры. В статье предложен метод получения слоя, аналогичного срезу, но без нарушения внутренней структуры. Приведены результаты исследований методом микроскопии различных поверхностей образцов. Представлены результаты измерения шероховатости поверхности, а также общие выводы и практические рекомендации.

**Ключевые слова:** лазерное спекание, SLS-принтер, 3D-печать, аэродинамические модели, аэродинамический эксперимент

**Для цитирования:** Шувалова А.М., Филимонов А.С., Галиновский А.Л. Исследование возможности применения технологии селективного лазерного спекания для изготовления аэродинамических моделей // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 2. С. 46–50. DOI: 10.34759/vst-2023-2-46-50

Original article

## STUDYING THE POSSIBILITY OF SELECTIVE LASER SINTERING TECHNOLOGY APPLICATION FOR AERODYNAMIC MODELS MANUFACTURING

Anastasiya M. Shuvalova<sup>1</sup>✉, Aleksei S. Filimonov<sup>2</sup>, Andrei L. Galinovskii<sup>3</sup>

<sup>1</sup> S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia,,  
Korolev, Moscow Region, Russia

<sup>2,3</sup> Bauman Moscow State Technical University (BMSTU),  
Moscow, Russia

<sup>1</sup> nuts97@inbox.ru ✉

<sup>2</sup> alexf72@mail.ru

<sup>3</sup> galcomputer@mail.ru

### Abstract

Technologies of layer-by-layer laser sintering by the SLS-printing method are being increasingly employed in modern mechanical engineering and instrumentation. The gist of the technology consists in layer-by-layer sintering of powder materials (polyamides, plastics) using a laser beam.

Relatively low labor intensity and cost, as well as the achievable speed of products manufacturing allows applying this technology to aerodynamic models creation used for experimental testing of aerospace engineering products. However, the development of these technologies is hindered by the poor studies of the internal structure of the parts' material.

There is an assumption based on the study of the outer layer of printed parts that a high porosity presents in the parts, caused by incomplete melting of all powder particles. This effect of incomplete sintering is visible on the outer surface. The problem lies in the fact that when sintering powder particles with a laser, neighboring, i.e. nearby particles that do not completely melt, forming a kind of a “relief” of the surface, are baked to the outer molten layer. It is obvious that such surface is not set in advance at the design stage, and the formed surface layer of stuck particles can be called undesirable. The external roughness control is especially up-to-date when creating aerodynamic models, since the external structure of the product surface may greatly affect the structure of the gas flow and the change in aerodynamic characteristics. The study of this layer and the roughness parameters will help designers to set and evaluate the necessary design requirements.

The research conduction is based on the results of a series of experiments performed with the EOS FORMIGA P110 SLS printing unit, in which laser is the main heat source with a power of 200 W-1 kW. The PA 2200 polymer was used for the samples production.

One of the problems while the research conducting is the impossibility of cutting samples or obtaining sections by mechanical or other methods without damaging the material structure. To solve it, an approach was adopted, according to which the operation of the installation was “emergently” terminated until the next layer of powder was applied. In other words, the newly obtained sample layer was not being filled with powder to form a new subsequent layer. It is possible to fulfill this by the printing emergency stoppage. Thus, it provided an opportunity to study the surface of the sample by the microscopy and measuring the roughness parameters of the formed surface. After processing the obtained images, the inference is being drawn that the internal structure is rather homogeneous and differs significantly from the outer layers of the samples. The outer layer of the products is of high level of roughness, which limits the possibility of their application in the field of aerodynamics. The article presents possible options for improving the surface layer of products.

The conclusion is made that the technology of selective laser sintering is utterly promising for creating aerodynamic models, provided that recommendations on improving characteristics of the outer surface roughness will be issued.

**Keywords:** laser sintering, SLS printer, 3d printing, aerodynamic models, aerodynamic experiment

**For citation:** Shuvalova A.M., Filimonov A.S., Galinovskii A.L. Studying the Possibility of Selective Laser Sintering Technology Application for Aerodynamic Models Manufacturing. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 2, pp. 46-50. DOI: 10.34759/vst-2023-2-46-50

---

---

## Введение

В современном машиностроении и приборостроении все шире применяются технологии послойного лазерного спекания методом SLS-печати. Суть технологии состоит в послойном спекании порошковых материалов (полиамидов, пластиков) с помощью луча лазера [1, 2]. Рост популярности данной технологии объясняется тем, что предоставляет инженерам-технологам ряд новых возможностей [3], в частности речь идет о возможности:

- изготовления деталей со сложными внутренними структурами [4, 5];
- производства единичных деталей с меньшей трудоемкостью и себестоимостью [6];
- изготовления деталей на околоземной орбите, что обеспечивает снижение выводимого объема полезного груза при печати в космосе в 3–5 раз [7];
- повышения механических свойств и точностных характеристик [8, 9];
- получения высоких значений коэффициента использования материала с учетом и того факта, что оставшийся после построения изделий материал может повторно использоваться для печати [10].

Благодаря относительно небольшим затратам трудоемкости и себестоимости, а также срокам изготовления, особый интерес вызывает применение этих технологий, в частности, для создания аэродинамических моделей, используемых для экспериментальной отработки изделий аэрокосмической техники [11].

Однако развитию этих технологий препятствует малая изученность внутренней структуры материала деталей. В особенности это касается создания элементов конструкций, применяемых в производстве аэрокосмической техники с высокими требованиями по качеству и надежности. Существует предположение, основанное на изучении внешнего слоя напечатанных деталей, что в деталях присутствует значительная пористость, причиной которой является неполное расплавление всех частиц порошка [12]. Такой эффект неполного спекания виден на внешней поверхности. Проблема заключается в том, что при спекании лазером частиц порошка к внешнему расплавленному слою припекаются соседние, т.е. близлежащие частицы, которые полностью не расплавляются, образуя своеобразный «рельеф» поверхности. Очевидно, что такая поверхность не задавалась заранее на этапе проектирования и сформировавшийся поверхностный слой из налипших частиц является нежелательным. Контроль внешней шероховатости особенно актуален при создании аэродинамических моделей, так как внешняя структура поверхности изделия может сильно влиять на структуру течения газа и изменение аэродинамических характеристик. Изучение этого слоя и параметров шероховатости поможет проектировщикам задать необходимые требования к конструкции. Таким образом, можно говорить о том, что данная тема является актуальной и что она практически не рассмотрена в научно-технической литературе. Поэтому целью исследования является изучение и оценка

характера и специфики формирования поверхностного слоя изделий, полученных по технологии селективного лазерного спекания.

### Исследование образцов, изготовленных методом селективного лазерного спекания

Исследования базируются на результатах серии экспериментов, выполненных с применением установки для SLS-печати EOS FORMIGA P110, в которой основным источником тепла является лазер мощностью 200 Вт ... 1 кВт [13, 14]. Для изготовления образцов использовался полимер PA 2200. Фотография частиц данного порошка, полученная с помощью микроскопа Leica S9i, представлена на рис. 1.

Одной из проблем при проведении исследований является невозможность вырезки образцов или получения срезов механическими или другими методами без повреждения структуры материала [15, 16]. Для ее решения был принят подход, согласно которому работа установки «аварийно» прекращалась до момента нанесения очередного слоя порошка. Другими словами, вновь полученный слой образца не засыпался порошком для формирования нового последующего слоя, и это предоставило возможность изучить поверхность образца средствами микроскопии и путем измерения параметров шероховатости сформированной поверхности. Образцы выращивались в форме сегмента с основанием размером 50 × 50 мм, что позволяло применять различные методы и средства диагностики (рис. 2).

В результате исследования поверхности с помощью микроскопа МБС-10 было получено изображение поверхностей, полученных штатно (рис. 3,а) и в результате «аварийной» остановки принтера (рис. 3,б).

Видно, что структуры поверхностей на рис. 3,а и 3,б значительно отличаются друг от друга. В первом случае (рис. 3,а) четко видны нерасплавленные частицы порошка, которые припаялись к основной части изделия. Во втором случае (рис. 3,б) такого эффекта не

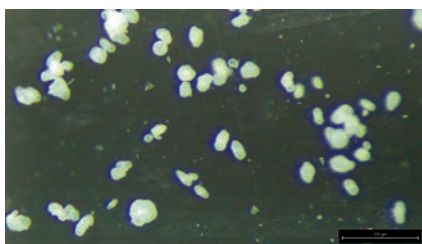
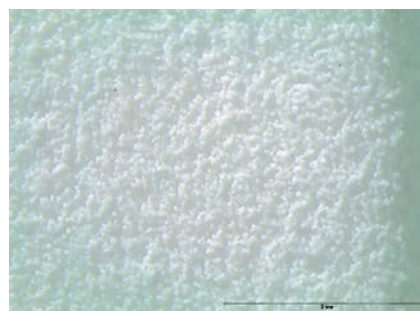


Рис. 1. Фотография частиц порошка PA 2200



Рис.2. Образец для исследований



а



б

Рис. 3. Вид внешней поверхности, полученный при обычном режиме печати (а) и «аварийной» остановке принтера (б)

наблюдается и мы можем видеть однородную структуру напечатанного слоя. Однако на кромке образца можно увидеть частицы, которые припеклись к внешнему слою и образовали значительную шероховатость поверхности. Поэтому на этой кромке наиболее удобно исследовать шероховатости стандартного внешнего слоя.

На следующем этапе исследований были проведены измерения шероховатости поверхностного слоя рассмотренных участков образца с применением профилографа-профилометра, производства НИИ «Измерения». Этот показатель является важным, так как хорошо известно [17], что шероховатость относится к микрогеометрии твердого тела и определяет его важнейшие эксплуатационные свойства, прежде всего износостойкость от истирания, прочность, плотность (герметичность) соединений, химическую стойкость, внешний вид.

Для исследования шероховатости поверхности была выполнена обработка изображения (повышение контрастности и резкости изображения для последующего выделения контура внешней кромки) в программном продукте Adobe Photoshop (см. рис. 3), в результате которой был получен контур шероховатости внешней поверхности, представленный на рис. 4 [18, 19].

Путем измерения параметров шероховатости с помощью профилографа-профилометра НИИ «Измерения» в соответствии с ГОСТ 2789-73 [20] было установлено, что параметры шероховатости образца, полученного методом SLS-печати, имеют следующие значения:

– среднее арифметическое значение отклонения профиля:  $R_a = 0,17$  мм;



Рис. 4. Профиль поверхностного слоя образца, полученного методом SLS-печати

- средний шаг местных выступов профиля:  $S = 0,54$  мм;
- среднее арифметическое значение шага неровности:  $S_m = 0,33$  мм;
- максимальная высота профиля:  $R_{\max} = 0,36$  мм.

Эти значения качества поверхности показывают, что уровень шероховатости изделий, полученных методом селективного лазерного спекания, довольно высок, и это может ограничивать возможности эксплуатации деталей, напечатанных по SLS-технологии. Вместе с тем после анализа изображений установлено, что внутренняя структура достаточно однородна и не имеет пустот (пор), размер которых превышает диаметр частицы порошка (рис. 5).

## Выводы

Технология селективного лазерного спекания является весьма перспективной для создания аэродинамических моделей. В результате проведенных исследований были выработаны рекомендации по производству изделий методом SLS-печати с заданным качеством поверхностного слоя:

1. Предлагается механически обрабатывать внешнюю поверхность деталей для снижения шероховатости поверхности и газопроницаемости. Это также будет способствовать решению задачи гигроскопичности материала, так как при механической обработке повышение температуры и упрочнение поверхностного слоя обеспечивают «подплавление» и «заделку» имеющихся на поверхности пор [21].
2. Одним из способов снижения шероховатости поверхности может быть ее сканирование с помощью лазерного излучения (лазерное выглаживание) с целью проплавления выступов и заделывания пор. Также

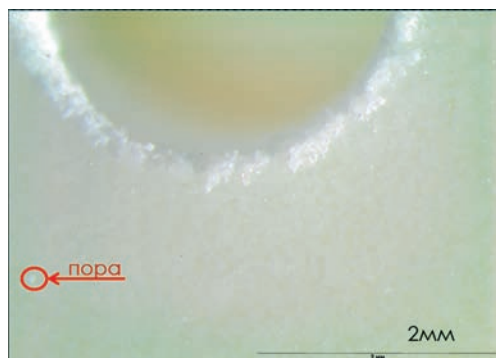


Рис.5. Вид внешней поверхности со сложной геометрии крайней кромки, полученной при «аварийной» остановке принтера с видимой порой

весьма вероятен положительный эффект от обкатки поверхности металлическими роликами при экспериментально и расчетным путем определенных усилиях и скоростях подачи.

## Список источников

1. Микрин Е.А. Перспективы развития отечественной пилотируемой космонавтики // Космическая техника и технологии. 2017. № 1(16). С. 5–11.
2. Bourell D., Watt T., Leigh D.K., Fulcher B. Performance limitations in polymer laser sintering // Physics Procedia. 2014. Vol. 56, pp. 147–156. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.157
3. Баданина Ю.В., Галиновский А.Л., Голубев Е.С. и др. Технология селективного лазерного спекания в производстве изделий ракетно-космической техники: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2019. – 37 с.
4. Галиновский А.Л., Голубев Е.С., Коберник Н.В., Филимонов А.С. Аддитивные технологии в производстве изделий аэрокосмической техники: Учебное пособие /Под общ. ред. А.Л. Галиновского. – М.: Изд-во Юрайт, 2023. – 115 с. URL: <https://urait.ru/bcode/518641>
5. ГОСТ Р 57911-2017. Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2018. – 8 с.
6. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. – 2nd ed. – New York: Springer-Verlag, 2015. – 519 p. DOI: 10.1007/978-1-4939-2113-3
7. Шачнев С.Ю., Зайцев А.М. Селективное спекание в производстве изделий ракетно-космической техники // Ритм: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. 2012. № 6(74). С. 34–36.
8. Королев А.Н., Тарасов В.А., Баскаков В.Д. и др. Влияние технологической ориентации образцов, изготовленных селективным лазерным спеканием, на их механические характеристики // XLIII Академические чтения по космонавтике (29 января – 1 февраля 2019; Москва): Сборник тезисов в 2 т. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. Т. 2. С. 188–189.
9. Kok Y.H., Tan X., Wang P. et al. Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review // Materials & Design. 2018. Vol. 139, pp. 565–586. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.11.021
10. Шеховцов А.А., Карпова Н.П. Аддитивные технологии как способ реализации концепции бережливого производства // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2015. Т. 13. С. 141–145. URL: <http://e-koncept.ru/2015/85029.htm>
11. Хатунцева О.Н., Шувалова А.М. О дополнительных «многомаштабных» критериях подобия для экспериментальной отработки изделий аэрокосмической техники // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 1. С. 91–97. DOI: 10.34759/vst-2023-1-91-97
12. Flodberg G., Petterson H., Yang L. Pore analysis and mechanical performance of selective laser sintered objects // Additive Manufacturing. 2018. Vol. 24, pp. 307–315. DOI: 10.1016/j.addma.2018.10.001
13. Баева Л.С., Маринин А.А. Современные технологии аддитивного изготовления объектов // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2014. Т. 17. № 1. С. 7–12.
14. ГОСТ Р 57558-2017. Аддитивные технологические процессы.



Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2020. – 16 с.

15. Михалев П.А., Филимонов А.С., Королев А.Н., Шувалова А.М. Исследование параметров анизотропии структуры материалов на основе полиамида при их изготовлении методом послойного лазерного спекания // XLIII Академические чтения по космонавтике (29 января – 1 февраля 2019; Москва): Сборник тезисов в 2 т. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2019. Т. 2. С. 189–190.
16. Majewski C., Zarringhalam H., Hopkinson N. Effect of the degree of particle melt on mechanical properties in selective laser-sintered Nylon-12 parts // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2008. Vol. 222. No. 9, pp. 1055-1064. DOI: 10.1243/09544054JEM1122
17. Косилова А.Г., Мещеряков П.К. (ред.) Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. – 4-е изд., перераб. и доп. – М: Машиностроение, 1986. – Т. 1 – 656 с.
18. Паршев С.Н., Иваницков А.Ю. (сост.) Исследование параметров шероховатости поверхности. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2010. – 14 с.
19. Аристов А.И., Кудряшов Б.А., Яндулова О.В. Шероховатость поверхности. – М.: Изд-во МАДИ, 2015. – 32 с.
20. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. – М.: Стандартинформ, 2018. – 7 с.
21. Заплатин В.Н., Сапожников Ю.И., Дубов А.В., Духнеев Е.М. Основы материаловедения (металлообработка): Учебник / Под ред. В.Н. Заплатина. – 8-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2017. – 272 с.
11. Khatuntseva O.N., Shuvalova A.M. On Additional “Multi-Scale” Similarity Criteria for Experimental Work-Out of Aerospace Engineering Products. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 1, pp. 91-97. DOI: 10.34759/vst-2023-1-91-97
12. Flodberg G., Petterson H., Yang L. Pore analysis and mechanical performance of selective laser sintered objects. *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 24, pp. 307-315. DOI: 10.1016/j.addma.2018.10.001
13. Baeva L.S., Marinin A.A. Vestnik MGTU. *Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 1, pp. 7-12.
14. *Additivnye tekhnologicheskie protsessy. Bazovye printsipy. Chast' 1. Terminy i opredeleniya.* GOST R 57558-2017 (Additive manufacturing - General principles – Terminology, IDT Part 1. Terms and definitions, ISO/ASTM 52900:2015), Moscow, Standartinform, 2020, 16 p.
15. Mikhaliev P.A., Filimonov A.S., Korolev A.N., Shuvalova A.M. *Materiyaly XLIII Akademicheskie chteniya po kosmonavtike (29 January - 1 February 2019; Moscow)*, Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 2019, vol. 2, pp. 189-190.
16. Majewski C., Zarringhalam H., Hopkinson N. Effect of the degree of particle melt on mechanical properties in selective laser-sintered Nylon-12 parts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2008, vol. 222, no. 9, pp. 1055-1064. DOI: 10.1243/09544054JEM1122
17. Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K. (ed.) *Spravochnik tekhnologa-mashinostroytelya. V2-kh t.* (Handbook of a machine-building technologist. In 2 vols), 4th ed. Moscow, Mashinostroenie, 1986. vol. 1, 656 p.
18. Parshev S.N., Ivannikov A.Yu. (comp.) *Issledovanie parametrov sherokhovatosti poverkhnosti* (The studies of surface roughness parameters), Volgograd, IUNL VolgGTU, 2010, 14 p.
19. Aristov A.I., Kudryashov B.A., Yandulova O.V. *Sherokhovatost' poverkhnosti* (Surface roughness), Moscow, MADi, 2015, 32 p.
20. *Sherokhovatost' poverkhnosti. Parametry, kharakteristiki i oboznacheniya.* GOST 2789-73 (Surface roughness. Parameters and characteristics, State Standard 2789-73), Moscow, Standartinform, 2018, 7 p.
21. Zaplatin V.N., Sapozhnikov Yu.I., Dubov A.V., Dukhneev E.M. *Osnovy materialovedeniya: metalloobrabotka* (Fundamentals of Materials Science: metalworking). 8th ed. Moscow, Izdatel'skii tsentr "Akademiya", 2017, 272 p.

Статья поступила в редакцию 06.04.2023; одобрена после рецензирования 12.04.2023; принята к публикации 14.04.2023.

The article was submitted on 06.04.2023; approved after reviewing on 12.04.2023; accepted for publication on 14.04.2023.