

---

---

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

---

---

УДК 669-1

**ПРИМЕНЕНИЕ ПАНТОГРАФИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ ПОЛУЧЕННОЙ  
МЕТОДОМ SLM-ПЕЧАТИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОСТОБРАБОТКИ  
С НАНЕСЕНИЕМ ДЕМПИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ**© 2023 г. А. А. Зайцев<sup>1,3</sup>, С. С. Лопатин<sup>1</sup>, Т. Т. Фозилов<sup>1,2,\*</sup>, А. В. Бабайцев<sup>1</sup><sup>1</sup>Московский авиационный институт, Москва, Россия<sup>2</sup>АО “Научно-исследовательский институт организации и производства двигателей”,  
Москва, Россия<sup>3</sup>АО “Корпорация Тактическое ракетное вооружение”, Москва, Россия

\*e-mail: fozbourne@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.01.2023 г.

После доработки 15.04.2023 г.

Принята к публикации 20.04.2023 г.

Для борьбы с остаточными напряжениями, возникающими после применения метода селективного лазерного спекания, в настоящей статье выбран метод термической обработки по ГОСТ и вибрационная галтовка в барабане с керамическими “чипсами”. В процессе эксплуатации возникают различные колебания, приводящие к разрушению конструкции. Для борьбы с колебаниями подобного рода предлагается на конструкцию наносить покрытия. Такие покрытия не только увеличивают стойкость к окислению, коррозии и т.д. Кроме этого они поглощают колебания (демпфируют), убирая, таким образом, резонанс. При этом ресурс изделия с покрытием относительно непокрытой детали будет выше на 5–20% гарантированно.

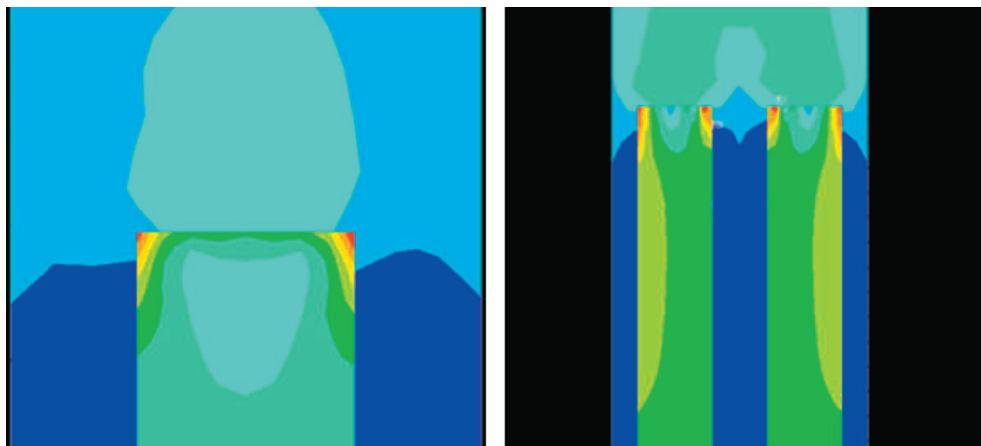
*Ключевые слова:* селективное лазерное плавление, пантографический материал, метаматериал, демпфирующие покрытия

**DOI:** 10.31857/S0235711923040181, **EDN:** XXGDSF

**Теоретическое обоснование.** Пантографические конструкции в настоящее время охватывают все больший спектр производств. Свойства таких конструкций ежегодно возрастают, как и предъявляемые к ним требования. Однако у них есть достаточно большой недостаток после применения метода селективного лазерного спекания – остаточные напряжения. Развитие аддитивных технологий (3D-печать) и открывающиеся вследствие этого новые технологические возможности побудили инженеров к созданию новых материалов под данную технологию. За последние годы специалистами по всему миру были предложены различные виды таких материалов, среди которых выделяются механические материалы или механические метаматериалы [1–6].

В современном мире повсеместно создаются и используются конструкционные материалы для машин, сооружений. Конструкции и их детали характеризуются огромным разнообразием, как по форме, так и по способам эксплуатации. Применяются такие материалы и механизмы в самых различных отраслях, от деталей оснасток для изготовления продукции до приспособлений в авиа-, аэрокосмических отраслях [7].

Аддитивное производство металлов в течение ряда лет рассматривалось как способ снижения затрат, увеличения возможностей и продвижения современного уровня техники для применения в производстве ракетных двигателей. В 2013 г. Илон Маск представил двигатель SuperDraco, созданный с помощью технологии лазерного луча с



**Рис. 1.** Узловые решения для растягивающих напряжений, как для длинных, так и для коротких волоконных моделей [10].

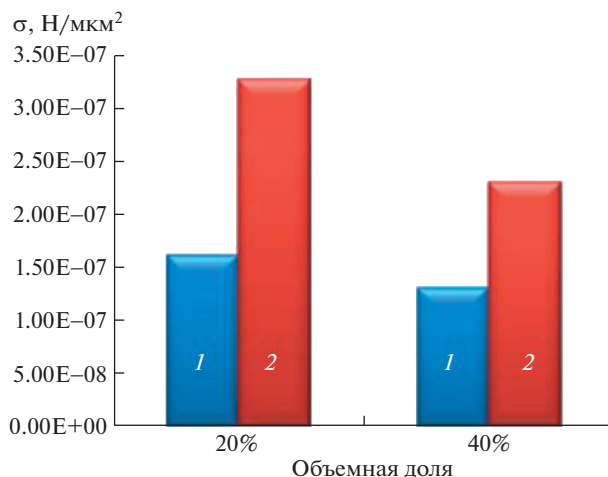
порошковым покрытием (PBF-LB) с использованием жаропрочного сплава на основе никеля Inconel [8]. Возможность изготовления сложных компонентов, например камеры двигателя, как единой детали, без необходимости использования дорогостоящих инструментов, дает возможность значительно ускорить процесс проектирования и испытаний. НАСА, совместно с Virgin Orbit, успешно испытало камеру сгорания, включающую вкладыш камеры сгорания из медного сплава PBF-LB (GrCOP-84) со структурным кожухом из суперсплава никеля, нанесенным на его внешнюю часть.

В процессе селективного лазерного плавления выделяется огромное количество тепла и, как следствие, остаточное внутреннее напряжение. После изготовления компонента он подвергается термической обработке для снятия внутреннего напряжения и точной настройки свойств материала [9]. Контроль качества и сертификация всегда были жизненно важной частью передового производства, ввиду этого постобработка (доведение до требуемых параметров по геометрии изделия и соблюдение всех допусков) является важнейшим этапом. Благодаря селективному лазерному плавлению (SLM) изделия получаются намного легче, что не только экономит материал, но и за счет внутренней геометрии демонстрирует аналогичные показатели прочностей, поэтому изделия выдерживают длительные циклические нагрузки.

Говоря об эксплуатационных свойствах, немаловажной характеристикой является демпфирование вибрационных и акустических колебаний. К конструкциям ответственного назначения применяются защитные покрытия, но изучаются уже иные свойства этих покрытий, что делает вопрос демпфирования колебаний актуальным и важным.

Согласно анализу зарубежной и отечественной литературы, применяются различные методики гашения колебаний, например, в статье [10] применяется метод конечных элементов в композиционных материалах, анализы которого показывают, что максимальное напряжение возникает на границе раздела из-за концентрации трещин (рис. 1).

Напряжение уменьшается по длине поверхности по мере увеличения расстояния от острой кромки (рис. 2). Увеличение объемной доли волокна показывает более низкое межфазное напряжение, что снижает вероятность растрескивания, а композиты демонстрируют большую прочность. Аналогичные результаты демонстрируют многово-



**Рис. 2.** Растягивающее напряжение для длинной модели с одинарным и двойным волокном при объемной доле 20 и 40% [10]: 1 – двойное полотно; 2 – одинарное полотно.

локонные композиты из-за увеличенной площади поверхности раздела; напряжение снижается при определенной объемной доле, чем в модели с одним длинным волокном. Сравнение напряжений для обеих моделей показано на рис. 2.

Однако применение термопластичных материалов способствует снижению нагрузки, в том числе и вибрационной, что улучшает демпфирующие характеристики.

В работах Н.В. Абраимова и Ю.С. Елисеева [11–14] в ходе проведения ремонта и восстановления сборочных единиц после износа поверхностей деталей применяются ресурсосберегающие технологии для гашения вибраций и шума. Современным методом решения этих задач является использование вязкоупругих демпфирующих материалов, с помощью которых поглощается энергия колебаний, возникающих при циклическом движении.

По мнению В.Ф. Безъязычного и И.Н. Аверьянова [16] возможно применение никелирования, как способа повышения энергорассеивания колебаний и снижения их амплитуды, что способствует снижению уровня шума и вибраций. Также необходимо обращать внимание на уплотнение стыковых элементов демпфирующих конструкций. В местах установки различных прокладок необходимо применение герметиков и клеев, что значительно повышает уровень демпфирования систем.

Рассматривались демпфирующие покрытия толщиной 10–11 мкм в рамках работы [15]. Покрытия наносились гальваническим методом, что позволило устранить недостатки виброгашения. Кроме этого отмечается, что введение данных демпфирующих прослоек является экономически выгоднее остальных решений и обладает высокой практичностью.

В исследовании [16] высокие показатели демпфирования достигнуты путем инфильтрации силумина на поверхность керамики на основе SiO<sub>2</sub>. Применение покрытия на основе алюминия снижает уровень вибраций и результирующих шумов карбида кремния, которые возникают из-за низкого собственного демпфирования керамического композита.

В монографии [17] были также проведены опыты с демпфирующими покрытиями. Рассмотрено нанесение на поверхность образцов диффузионных комплексных покрытий, а именно Ni–Al–Hf–Y, Ni–Cr–Al–Y, Ni–Al и Cr–Al–Ti–Hf. В различных

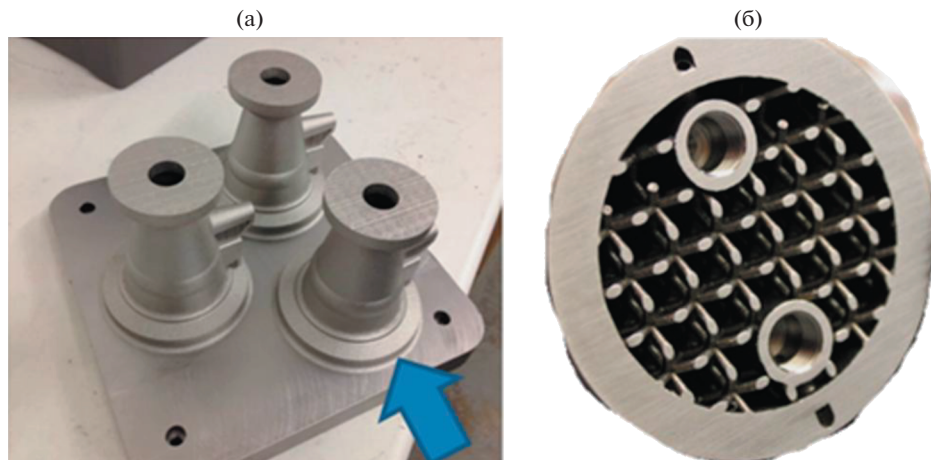


Рис. 3. Модель пантографического стабилизатора перед постобработкой и покрытием: (а) – общий вид; (б) – внутренняя полость [8].

случаях демпфирующая способность образцов возрастала от 3 до 40%, что снизило уровень амплитуд их резонансных колебаний, повышая динамическую устойчивость системы и препятствуя развитию автоколебаний, а также замедляя износ контактных поверхностей и повышая надежность и ресурс.

В работах [18–22] выполнялись исследования трехмерной печати. В частности, рассматривались решетки пантографического типа и подвергались различным экспериментам, например, на локальное вдавливающее нагружение по схеме трехточечного изгиба с малым отношением длины к толщине.

**Проведение эксперимента и его результаты.** В настоящей статье была разработана математическая и, вследствие этого, действительная модель пантографической конструкции, полученной методом селективного лазерного плавления SLM (рис. 3).

Такого рода конструкция позволяет увеличить коэффициент использования материала (КИМ) практически до 90%, что в свою очередь не только уменьшает себестоимость изделия, но и делает показатели механических и усталостных характеристик не ниже, чем у полнотелой конструкции.

В дальнейшем, с помощью программного обеспечения в НИУ МАИ был проведен расчет на растяжение и сжатие полученного прототипа изделия. Образец выдержал нагрузку на растяжение в 489 МПа (рис. 4а, б). За счет распределения нагрузки в сотовой внутренней конструкции, где нагрузка на каждую ячейку была минимальной, испытуемый образец рассчитан без разрушения. В ходе расчета на текучесть, при критической нагрузке в 494 МПа (рис. 4в, г), напряжения так же гасились, и разрушение образца не произошло (рис. 4а–г).

Для реальных исследований была выбрана нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, она является наиболее распространенной в современном производстве, с хорошими показателями механических и физических свойств, а также является экономичной с точки зрения цены аддитивного производства.

В настоящей статье показаны новые экспериментальные образцы, полученные из 12Х18Н10Т (рис. 5).

Поскольку детали, полученные методом 3D-печати из металла, имеют высокий уровень остаточных напряжений, должна быть проведена термообработка по стан-

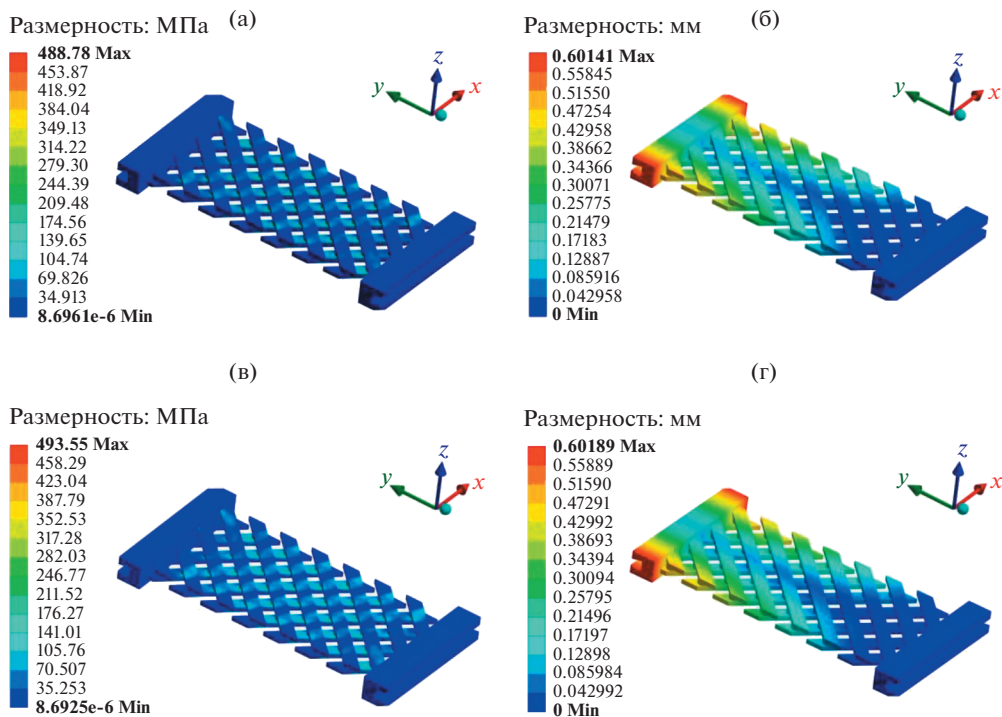


Рис. 4. Результаты математического моделирования растяжения и сжатия пантографического образца: (а) – прочность; (б) – относительное удлинение; (в) – текучесть; (г) – относительное сжатие.

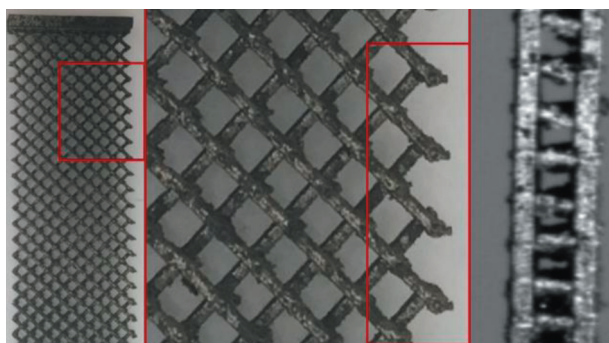


Рис. 5. Пантографическая структура из 12Х18Н10Т. Слева направо: общий вид, увеличение, вид сбоку [1].

дартному режиму (ГОСТ 7350–77), с последующей виброгалтовкой, для сглаживания острых углов и для релаксации напряжений [23].

На настоящее время проведено математическое моделирование процесса нагружения пантографической конструкции, полученной методом SLM с применением гальванического покрытия. Реализация действительного эксперимента достигает сейчас 60% (проводится механическая обработка термообработанного изделия).

Область применения таких конструкций варьируется от кузнечных цехов (как подземный демпфер для сокращения вибраций от ударного молота) до авиастроения (применение в шасси, как естественный демпфер при соприкосновении с взлетно-посадочной полосой). Отмечается также применение в установках с повышенной вибрацией для ее уменьшения и, соответственно, увеличения показателей точности. Также коллектив авторов видит область применения в строительстве сооружений и зданий.

**Оборудование.** Для постобработки (а именно: токарная, фрезерная и шлифовальная) используются станки: токарный станок фирмы MAZAK марки Integrex 200-III 640mt Pro; фрезерный станок Master25115 PRO; шлифовальный станок марки V Jainnher JNC-12BN.

Для термической обработки использовалась электропечь сопротивления марки СНОЛ. Для гальванического покрытия использована ванна производства компании ТЕТРА.

Само изделие получено методом SLM-печати на принтере 3D-LAR510. Расчет математического моделирования выполнен в комплексе Ansys Workbench.

**Заключение. 1.** В процессе селективного лазерного плавления выделяется огромное количество тепла и, как следствие, остаточное внутреннее напряжение. После изготовления компонента, он подвергается термической обработке для снятия внутреннего напряжения и точной настройки свойств материала. Многоосевые обрабатывающие центры с ЧПУ обеспечивают высокую точность обработки критических деталей. Этот конкретный компонент требовал точного внешнего диаметра, чтобы обеспечить его успешную интеграцию в полевых условиях. Так же была важна чистота поверхности. Кроме того, имеется критическая плоскостность и параллельность верхней и нижней граней изделия. Планируются вибрационные испытания с нагружением  $20 \text{ кгс/мм}^2$ , что требует точного нарезания мест креплений. **2.** Характеристики геометрии и микроструктуры обеспечивают необычные свойства и подразумевают вторую градиентную природу этого типа материала. Из-за сотовой структуры, прежде всего, уменьшается вес всей конструкции, что создает преимущество перед стандартными изделиями и повышает КИМ. **3.** Поскольку данная конструкция должна не только облегчить вес всего механизма и увеличить КИМ при производстве, в своей среде применения нужно оптимизировать демпфирующую способность покрытий, которые будут нанесены на поверхность и внутренние полости детали. Согласно сравнительному анализу наиболее подходящим покрытием является гальваническое ввиду своей универсальности, дешевизны и легкости нанесения.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена с финансовой поддержкой гранта Президента Российской Федерации «МК-398.2022.4».

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Giorgio I., Placidi L., Spagnuolo M., Peyre P., Dupuy C., Dirrenberger J., Pawlikowski M., Igumov L. Pantographig metamaterials: a view towards applications Francesco dell'sola // Materials physics and mechanics. 2019. № 5. V. 42. P. 637. [https://doi.org/10.18720/MPM.4252019\\_17](https://doi.org/10.18720/MPM.4252019_17)
2. Dell'Isola F., Seppacher P. The relationship between edge contact forces, double forces and interstitial working allowed by the principle of virtual power // Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série Ib, Mécanique, physique, astronomie. 1995. V. 7. P. 43.
3. Abali B.E. Computational Reality. Singapor: Springer, 2016.
4. Abali B.E., Müller W.H., Dell'Isola F. Theory and computation of higher gradient elasticity theories based on action principles. Archive of Applied Mechanics. 2017. V. 87 (9). P. 1495.

5. *Forest S., Sab K.* Stress gradient continuum theory // *Mechanics Research Communications*. 2012. V. 40. P. 16.
6. *Dell'Isola F., Giorgio I., Pawlikowski M., Rizzi N.L.* Large deformations of planar extensible beams and pantographic lattices: heuristic homogenization, experimental and numerical examples of equilibrium // *Proc. R. Soc. A*. 2016. V. 472 (2185). P. 20150790.
7. *Бабайцев А.В., Ян Н.М.* Методика оценки остаточных напряжений в образцах из сплава AlSi10Mg, полученных по технологии SLM // *Труды МАИ*. 2021. № 119. С. 1.
8. SpaceX запускает в космос напечатанные на 3D-принтере детали. *Engineering.com*, 5 августа 2014 г. [www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/8196/SpaceX-Launches-3D-Printed-Parts-to-Space.aspx](http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/8196/SpaceX-Launches-3D-Printed-Parts-to-Space.aspx), 31 августа 2020 г.
9. *Witkin D., Patel D., Helvajian H., Lee S., Diaz A.* Surface Treatment of Powder-Bed Fusion Additive Manufactured Metals for Improved Fatigue Life // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2019. № 28. P. 681.  
<https://doi.org/10.1007/s11665-018-3732-9>
10. *Сингх С., Батра Н.К., Ротанг Р.* КЭ анализ и экспериментальное исследование влияния размеров арматуры на вибрационные характеристики. Полипропиленовый композит // *Международный журнал инженерных исследований и разработок*. 2012. Т. 1. № 2. С. 34.
11. *Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Колесников С.А., Васильев Ю.Н.* Неметаллические композиционные материалы в элементах конструкций и производстве авиационных газотурбинных двигателей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. С. 368.
12. *Елисеев Ю.С., Абрамов Н.В., Крымов В.В.* Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиадвигателестроении. М.: Высш. шк., 1999. С. 525.
13. *Елисеев Ю.С., Абрамов Н.В.* Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. С. 622.
14. *Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Малиновский К.А., Попов В.Г., Ярославцев Н.Л.* Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей. М.: Высш. шк., 2002. С. 354.
15. *Li X., Li C., Shao D., Hui Q., Cheng N.* Damping mechanism of SiC particle Reinforced Al matrix composites // *MATEC Web of Conf.* 67. SMAE-2016. 2016. P. 06006.  
<https://doi.org/10.1051/mateconf/20166706006>
16. *Безъязычный В.Ф., Аверьянов И.Н.* К вопросу использования демпфирующих покрытий для снижения вибраций и шумопоглощения в ремонтном производстве // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. 2014. № 38. С. 48.
17. *Абрамов Н.В., Елисеев Ю.С.* Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. С. 499.
18. *Solyaev Y., Babaytsev A., Ustenko A., Ripetskiy A., Volkov A.* Static and dynamic response of sandwich beams with lattice and pantographic cores // *J. of Sandwich Structures and Materials*. 2021. V. 0 (0). P. 1.  
<https://doi.org/10.1177/10996362211033896>
19. *Ломакин Е.В., Рабинский Л.Н., Бабайцев А.В., Соляев Ю.О.* Оптимальное объемное содержание ячеистых заполнителей для ударопрочных элементов конструкций, получаемых по технологии FDM // *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки*, издательство Российской академии наук (Москва). 2022. Т. 505. С. 73.
20. *Бабайцев А.В., Добрянский В.Н., Лурье С.А., Рипецкий А.В., Соляев Ю.О., Шумская С.А.* Ударопрочность трехслойных балок с сетчатыми заполнителями, работающими по принципу нелокальных механических метаматериалов // *Механика, композиционных материалов и конструкций*. 2020. Т. 26. № 2. С. 212.
21. *Babaytsev A.V., Prokofiev M.V., Rabinskiy L.N.* Mechanical properties and microstructure of stainless steel manufactured by selective laser sintering // *Nanoscience and Technology: An Int. J.* 2017. V. 8. № 4. P. 359.  
<https://doi.org/10.1615/NanoSciTechnolIntJ.v8.i4.60>
22. *Babaytsev A.V., Orekhov A., Rabinskiy L.N.* Properties and microstructure of AlSi10Mg samples obtained by selective laser melting // *Nanoscience and Technology: An Int. J.* 2020. V. 11. Iss. 3. P. 213.  
<https://doi.org/10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2020034207>
23. *Елисеев Ю.С., Масленков С.Б., Гейкин В.А., Поклад В.А.* Технология создания неразъемных соединений при производстве газотурбинных двигателей / Под общ. ред. С.Б. Масленкова. М.: Наука и технологии, 2001. С. 394.