

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-34-44>



## Расширение технологических возможностей методов аддитивного формообразования с применением механизмов параллельно-последовательной структуры

А. Н. Гречухин<sup>1</sup> ✉, В. В. Куц<sup>1</sup>, А. В. Олешицкий<sup>1</sup>, М. С. Разумов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»  
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

### Резюме

**Цель исследования.** В исследовании рассмотрены вопросы повышения точности аддитивных методов формообразования изделий. Проведен анализ, предложена новая конструкция устройства для формообразования изделий аддитивными методами на базе механизмов параллельно-последовательной структуры, которая обеспечивает жесткость технологической системы, повышенную точность позиционирования конечного элемента формообразующей системы, расширяя, таким образом, технологические возможности аддитивного формообразования.

**Методы.** Формообразование поверхностей деталей аддитивными методами характеризуется высокими значениями величины погрешности формообразования (аппроксимации), для снижения величины которой необходимо обеспечить ориентацию поверхности, при которой нормаль в точке формообразуемой поверхности будет совпадать с осью конечного звена формообразующей системы. В статье представлены результаты анализа, направленного на установление существующих конструкций устройств для аддитивного формообразования на базе механизмов параллельно-последовательной структуры, обеспечивающих высокую точность позиционирования конечного звена формообразующей системы.

**Результаты.** Разработана конструкция устройства для аддитивного формообразования изделий по технологии 3DMP – технологии аддитивного формообразования электрической дугой в среде защитных газов, применение которой обеспечивает высокую точность позиционирования конечного звена формообразующей системы, исключает возможность заклинивания жесткого расходного материала в виде проволоки за счет конструктивного исполнения механизма подачи, который выполнен жестко закрепленным на основании устройства для аддитивного формообразования.

**Заключение.** Применение разработанной конструкции устройства позволит исключить недостатки существующих устройств для аддитивного формообразования, обеспечить точность позиционирования конечного звена формообразующей системы аддитивного оборудования, исключить возможность заклинивания жесткого расходного материала, расширив, таким образом, область применения аддитивных технологий.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии; послойный синтез; формообразование; погрешность.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых МК-6406.2018.8.

© Гречухин А. Н., Куц В. В., Олешицкий А. В., Разумов М. С., 2019

**Для цитирования:** Расширение технологических возможностей методов аддитивного формообразования с применением механизмов параллельно-последовательной структуры / А. Н. Гречухин, В. В. Куц, А. В. Олешицкий, М. С. Разумов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 34-44. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-34-44>.

Поступила в редакцию 03.10.2019

Подписана в печать 14.11.2019

Опубликована 23.12.2019

## Technological Capabilities Extension of Additive Forming Methods Using Parallel-Serial Structures

Alexander N. Grechukhin<sup>1</sup>✉, Vadim V. Kuts<sup>1</sup>, Alexey V. Oleshitsky<sup>1</sup>,  
Michail S. Razumov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

### Abstract

**Purpose of research.** Accuracy improving of product forming additive methods is described in the paper. Analysis is carried out; new device design for product forming by additive methods is done on the basis of parallel-serial structure mechanisms. This device design provides rigidity of technological system, increased accuracy of final element positioning of forming system, thus expanding technological capabilities of additive formation.

**Methods.** Formation of parts surfaces by additive methods is characterized by high formation error size (approximation). It is necessary to ensure orientation of the surface in order to reduce the size at which normal will coincide with the axis of forming system final link at formed surface point. The paper presents results of the analysis aimed at existing structures installation of additive forming devices on the basis of parallel-serial structure mechanisms ensuring high accuracy of final link positioning of forming system.

**Results.** Device design for additive product forming according to 3DMP technology - technology of additive forming with electric arc in protective gases, application of which provides high accuracy of final link positioning of forming system, excludes possibility of rigid consumable material jamming in the form of wire due to design of supply mechanism, which is rigidly fixed on the device base for additive forming.

**Conclusion.** Application of developed device design will make it possible to eliminate disadvantages of existing devices for additive forming, to ensure accuracy of final link positioning of forming system for additive equipment, to exclude possibility of rigid consumable material jamming, thus expanding application field of additive technologies.

**Keywords:** additive technologies; layer-by-layer synthesis; shaping; error.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**Funding:** The reported study was funded by Grant of the President of the Russian Federation for young scientists MK-6406.2018.8.

**For citation:** Grechukhin A. N., Kuts V. V., Oleshitsky A. V., Razumov M. S. Technological Capabilities Extension of Additive Forming Methods Using Parallel-Serial Structures. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 34-44 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-34-44>.

Received 03.10.2019

Accepted 14.11.2019

Published 23.12.2019

## Введение

Развитие цифрового производства, аддитивных технологий, определено Стратегией научно-технологического развития России. Актуальной задачей в данной связи является создание новых единиц и расширение технологических возможностей оборудования для аддитивного производства, что обусловлено достаточно весомыми преимуществами аддитивных технологий по сравнению с технологией изготовления изделий традиционными методами.

Одним из направлений расширения технологических возможностей оборудования для аддитивного производства является разработка устройств, позволяющих изготовить изделия с высокой точностью и минимальным припуском на последующую механическую обработку (в случае, если таковая является необходимой).

Повышение точности аддитивных методов формообразования возможно за счет снижения погрешности аппроксимации<sup>1</sup> [1].

## Материалы и методы решения задачи

В работах [2, 3, 4, 5, 6, 7] был рассмотрен способ снижения погрешности формообразования, заключающийся в придании изделию в процессе выращи-

вания ориентации, обеспечивающей аппроксимацию профиля изделия слоями поперечного сечения с меньшей кривизной.

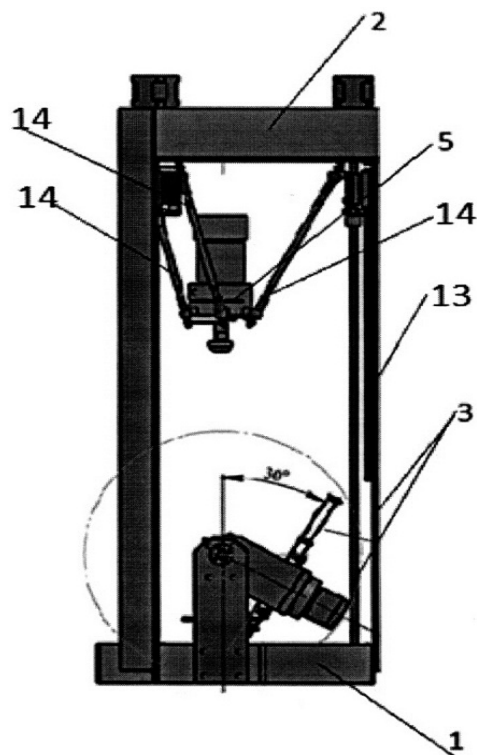
Механизм предлагаемой пространственной ориентации изделий в процессе их аддитивного формообразования возможно реализовать с применением мехатронных устройств на базе механизмов с последовательной, параллельной и параллельно-последовательной структурами [8].

Основными преимуществами мехатронных систем с параллельной кинематикой являются: высокая точность управления перемещением и ориентацией конечного элемента формообразующей системы в рабочем пространстве технологического оборудования; жесткость при действии динамических нагрузок, а так же компактность устройств, построенных на базе таких механизмов. К недостаткам подобных механизмов следует отнести меньшее рабочее пространство, по сравнению с последовательными структурами, небольшую манипулятивность и сложную конструкцию механизма, в процессе работы которой возникают внутренние связи, ограничивающие их рабочие пространства, которые могут приводить к потере управляемости механизмом [9-12].

Таким образом, для решения задач обеспечения динамической пространственной ориентации изделий в процессе их аддитивного формообразования, альтернативным вариантом механизмов

<sup>1</sup> Сапрыкин А.А. Повышение производительности процесса селективного лазерного спекания при изготовлении прототипов: дис... канд. техн. наук. Юрга, 2006.

с параллельной и последовательной структурами могут стать механизмы, сочетающие преимущества обозначенных выше устройств, а именно – устройства с гибридной компоновкой.



**Рис. 1.** 3D дельта-принтер: 1 – нижнее основание; 2 – верхнее основание; 5 – печатающее устройство; 13 – ходовой винт; 14 – поводки

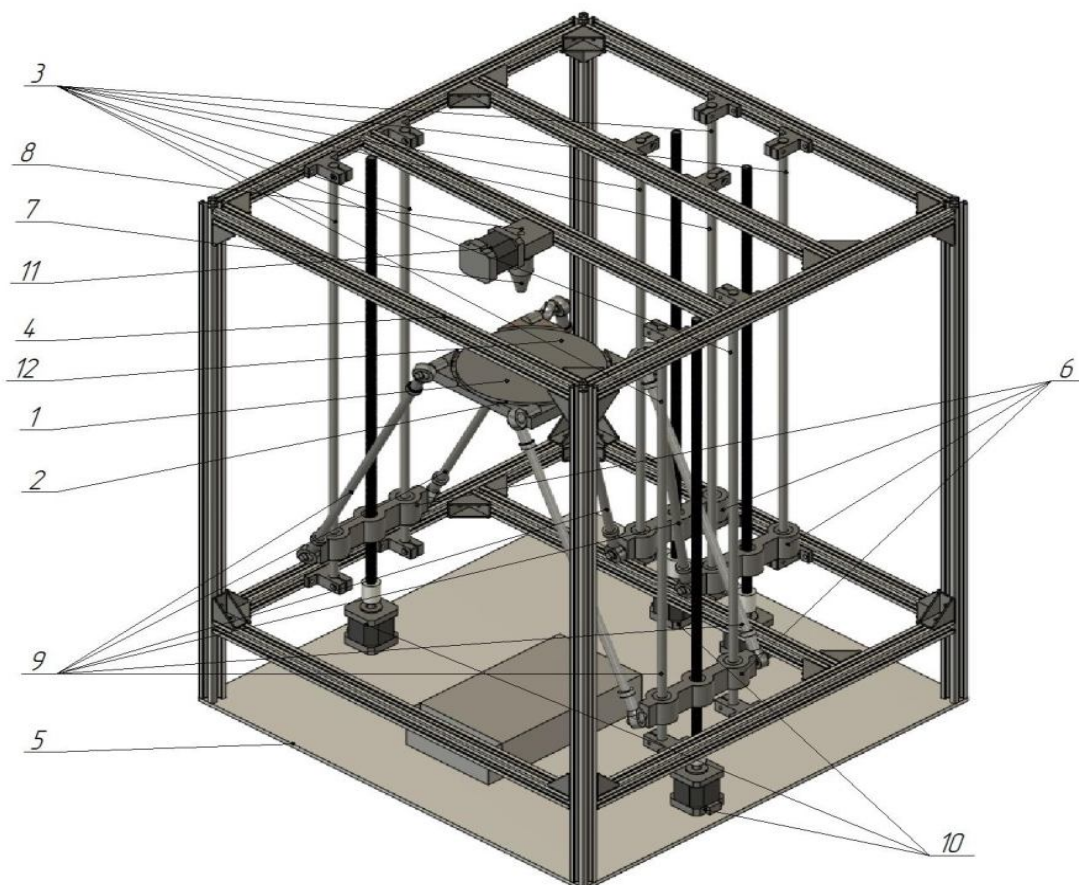
**Fig. 1.** 3D Delta printer: 1 – bottombase; 2 – top base; 5 – printing device; 13 – lead screw; 14 – leashes [8]

Существуют работы, направленные на разработку устройств подобного типа. Так, например, известно устройство – 3 D дельта-принтер. Устройство содержит корпус, соединенный с верхним и нижним основаниями с вертикально расположенными направляющими стержнями, на которых установлены каретки, стол, выполненный наклонно-поворотным с возможностью вращения, печат-

тающее устройство, поводки, каждый из которых одним концом присоединен к соединительной детали, а вторым концом – шарнирно к каретке, блок управления [13].

Данное устройство обеспечивает пространственную ориентацию изделий в процессе их аддитивного формообразования по 5 управляемым координатам за счет наклонно-поворотного стола и перемещающейся печатающей головки. Недостатком такого устройства является возможность заклинивания жесткого расходного материала, например, проволоки из стали при аддитивном формообразовании по технологии 3DMP, в подвижной печатающей головке из-за его перегибов в процессе перемещения печатающей головки.

Технология 3DMP – печать металлической проволокой, при которой формообразование происходит в среде инертного/активного газа или в многокомпонентных газовых смесях в зависимости от типа наплавляемого материала. Преимуществами данной технологии является высокая скорость изготовления деталей, возможность создания крупных изделий, высокий коэффициент использованного материала, лучшие в отрасли механические свойства конечных изделий: отсутствие пористости и термических трещин, дендритная структура. В итоге сокращается время производства и экономятся материалы для заготовки и утилизации металлической стружки [8].



**Рис. 2.** 3D-принтер с гибридной компоновкой: **1** – стол; **2** – основание рабочего стола; **3** – направляющие стержни; **4** – верхнее основание; **5** – нижнее основание; **6** – каретка; **7** – рабочий инструмент; **8** – соединительная деталь; **9** – поводки; **10, 11, 12** – шаговые двигатели

**Fig. 2.** 3D- printer with hybrid layout: **1** – table; **2** – desktop base; **3** – guide rods; **4** – upper base; **5** – lower; **6** – carriage; **7** – working tool; **8** – connecting part; **9** – leashes; **10, 11, 12** – stepper motors

Применение данной конструкции устройства при аддитивном формообразовании по технологии 3DMP приводит к пластическим деформации жесткого расходного материала (металлической проволоки), которые затрудняют его подачу в зону печати, что в конечном итоге приводит к заклиниванию материала в печатающей головке.

Актуальной задачей является разработка конструкции устройства [8, 14, 15], исключающего возможность заклинивания подачи жесткого расходного материала при аддитивном формообразовании

изделий по технологии 3DMP в зону печати через печатающую головку<sup>1</sup>.

### Результаты и обсуждение

Для решения обозначенной выше задачи разработана конструкция устройства для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой [16, 17, 18, 19]. Устройство содержит стол 1, выполненный с возможностью поворо-

<sup>1</sup> Куц В.В. Методология предпроектных исследований специализированных металлорежущих систем: дис. ... д-ра техн. наук. Курск, 2012. 366 с.

та вокруг оси  $Z$  посредством шагового двигателя 12; основание рабочего стола 2; направляющие стержни 3, закрепленные вертикально на верхнем 4 и нижнем 5 основаниях 3D-принтера; каретки 6, установленные на направляющих стержнях 3, имеющие возможность перемещения по оси  $Z$ ; печатающее устройство, включающее рабочий инструмент 7, выполненный в виде устройства для автоматической подачи проволочного электрода посредством шагового двигателя 11, с подводом смеси защитных газов; соединительная деталь 8; поводки 9, одни из концов которых закреплены шарнирно к угловым точкам основанию стола 1, а вторые закреплены шарнирно к кареткам 6; приводные механизмы кареток 6, выполненные в виде передач типа винт-гайка, приводимых в движение шаговыми двигателями 10, таким образом, обеспечивая управление пространственной ориентацией стола по 5 координатам. Печатающая головка является жестко закрепленной через соединительную деталь к верхнему основанию, подача металлического расходного материала (проволоки из стали) осуществляется под прямым углом, что исключает заклинива-

ние подачи расходного материала при аддитивном формообразовании изделий в результате перегиба.

Устройство работает следующим образом: блок управления передает управляющие команды шаговым двигателям 10, 11, 12, причем шаговые двигатели 10 перемещают каретки 6, изменяя угол наклона поводков 9, обеспечивая столу 1 перемещение по 4 координатам; шаговый двигатель 12 обеспечивает перемещение стола по 5 координате; шаговый двигатель 11 обеспечивает управление подачей расходного материала в виде металлической проволоки к рабочему инструменту 7.

## Выводы

Таким образом, применение 3D-принтера с гибридной компоновкой обеспечивает неподвижность печатающей головки в процессе аддитивного формообразования изделий, что в свою очередь исключит возможность заклинивания расходного материала (проволоки из стали) подачи в результате его перегиба, возможного при перемещении печатающей головки в зоне построения 3D-принтера.

## Список литературы

1. Burns M. Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing. Englewood Cliffs, N.J., USA: PTR Prentice Hall, 1993. 369 pp.

2. Improving the quality of additive methods for forming the surfaces of odd-shaped parts with the application of parallel kinematics mechanisms / V.V. Kuts, M.S. Razumov, A.N. Grechukhin, N.A. Bychkova // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. № 24. P. 11832-11835.

3. Динамическое управление процессом аддитивного формообразования с применением 5-координатного технологического оборудования / А.Н. Гречухин., В.В. Куц, М.С. Разумов, И.В. Ванин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23. № 1. С. 9-20. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-9-20>.

4. Grechukhin A.N., Anikutin I.S., Byshkin A.S. Management of space orientation of the end effector of generation of geometry system fiveaxis manufacturing machinery for additive generation of geometry. MATEC Web of Conferences. Volume 226, 7 November 2018, Номер статьи 0100214th International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems", DTS 2018; Don State Technical University Rostov-on-Don; Russian Federation; 12 September 2018 до 14 September 2018; Код 141842

5. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Ways to reduce the error of additive methods of forming // MATEC Web of Conferences. Volume 226, 7 November 2018, Номер статьи 0100214th International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems", DTS 2018; Don State Technical University Rostov-on-Don; Russian Federation; 12 September 2018 до 14 September 2018; Код 141842

6. Grechukhin A.N., Kudelina D.V., Razumov M.S. Development of information-analytical system for technological requests monitoring, taking into account regional specifics // International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering. Vol. 157. P. 198-202.

7. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Calculation of the controlled parameters of the 6-coordinate robot in the process of additive forming of products // Journal of Physics: Conference Series, 2019. 1210 (1), статья № 012053.

8. Егоров И.Н. Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами: монография. Владимир, 2010. 243 с.

9. Доброскок В.Л., Абдурайимов Л.Н., Чернышов С.И. Рациональная ориентация изделий при их послойном формообразовании на базе исходной триангуляционной 3d модели // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2010. № 24. С. 13-21.

10. Optimum part deposition orientation in stereolithography / S. K. Singhal, A. P. Pandey, P. M. Pandey, A. K. Nagpal // Computer-Aided Design & Applications. 2005. Vol. 2. Nos. 1–4. P. 319–328.

11. Hong S. Byun., Kwan H. Lee Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2006. №. 28. P. 307–313.
12. Massod S. H., Rattanawong W., Iovenitti P. A generic algorithm for part orientation system for complex parts in rapid prototyping // *J. Mater. Process. Technol.* 2003. Vol. 139. № 1–3. P. 110–116.
13. 3D дельта-принтер Сарапулов С.Н., Ижутов А.В. патент на полезную модель *RUS 186514 17.07.2018.*
14. Определение погрешности формы детали при формообразовании планетарным механизмом методами геометрической теории резания / В.А. Гречишников, В.В. Куц, М.С. Разумов [и др.] // *СТИН.* 2017. № 4. С. 24-26.
15. Errors in shaping by a planetary mechanism / V.A. Grechishnikov, V.B. Romanov, P.M. Pivkin, V.V. Kuts, M.S. Razumov, A.N. Grechukhin, S.Y. Yurasov // *Russian Engineering Research.* 2017. T. 37. № 9. С. 824-826.
16. Гречухин А.Н., Куц В.В., Разумов М.С. Управление пространственной ориентацией узлов робота в процессе аддитивного формообразования изделий // *Вестник Воронежского государственного технического университета.* 2018. Т. 14. № 4. С. 122-129.
17. Гречухин А.Н., Куц В.В., Разумов М.С. Экспериментальное определение параметров поперечного сечения единичного слоя при аддитивном формообразовании изделий // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* 2018. № 10. С. 264-270.
18. Проектирование технологического оборудования для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой / А.Н. Гречухин, В.В. Куц, А.В. Олешицкий, Ю.Э. Симонова // *Вестник Воронежского государственного технического университета.* 2019. Т. 15. № 4. С. 111-118.
19. Гречухин А.Н., Куц В.В., Разумов М.С. Решение задачи аппроксимации криволинейных поверхностей слоями с постоянным и переменным сечением при формообразовании аддитивными методами // *Вестник Брянского государственного технического университета.* 2019. № 3 (76). С. 38-40.

## References

1. Burns M. *Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing.* Englewood Cliffs. N.J. USA: PTR Prentice Hall, 1993, 369 p.
2. Kuts V. V., Razumov M. S., Grechukhin A. N., Bychkova N. A. Improving the quality of additive methods for forming the surfaces of odd-shaped parts with the application of



parallel kinematics mechanisms. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, vol. 11, no. 24, pp. 11832-11835.

3. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Razumov M. S., Vanin I. V. Dinamicheskoe upravlenie protsessom additivnogo formoobrazovaniya s primeneniem 5-koordinatnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya [Dynamic control of the additive shaping process using 5-coordinate process equipment]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019; 23(1): 9-20 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-9-20>.

4. Grechukhin A. N., Anikutin I. S., Byshkin A. S. Management of space orientation of the end effector of generation of geometry system fiveaxis manufacturing machinery for additive generation of geometry. *MATEC Web of Conferences*, 2018, no. 226, pp. 010-021.

5. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Ways to reduce the error of additive methods of forming. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 226, pp. 023-029.

6. Grechukhin A. N., Kudelina D. V., Razumov M. S. Development of information-analytical system for technological requests monitoring, taking into account regional specifics. *International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering*. no. 157, pp. 198-202.

7. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Razumov M.S. Calculation of the controlled parameters of the 6-coordinate robot in the process of additive forming of products. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, no. 1210, pp. 1210-1220.

8. Egorov I. N. *Pozitsionno-silovoe upravlenie robototekhnicheskimi i mekhatronnymi ustroystvami* [Position-force control of robotic and mechatronic devices]. Vladimir, 2010, 243 p. (In Russ.).

9. Dobroskok V. L., Abdurayimov L. N., Chernyshov S. I. Ratsional'naya orientatsiya izdelii pri ikh posloinom formoobrazovanii na baze iskhodnoi triangulyatsionnoi 3d modeli [Rational orientation of products with their layer-by-layer shaping on the basis of the original triangulation 3d model]. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta* = *Scientific notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University*, 2010, no. 24, pp. 13-21 (In Russ.).

10. Singhal S. K., Pandey A. P., Pandey P. M., Nagpal A. K. Optimum part deposition orientation in stereolithography. *Computer-Aided Design & Applications*, 2005, vol. 2, no. 1-4, pp. 319-328.

11. Hong S. Byun, Kwan H. Lee Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 2006, no. 28, pp. 307-313.

12. Massod S. H., Rattanawong W. Iovenitti P. A generic algorithm for part orientation system for complex parts in rapid prototyping. *J. Mater. Process. Technol.*, 2003, no. 139, pp. 110–116.

13. Sarapulov S. N., Izhutov A.V. *3D del'ta-printer* [3D Delta printer]: Patent RF na poleznuyu model' RUS patent for utility model RUS 186514 17.07.2018 (In Russ.).

14. Grechishnikov V. A., Kuts V. V., Razumov M. S. Opredelenie pogreshnosti formy detali pri formoobrazovanii planetarnym mekhanizmom metodami geometricheskoi teorii rezaniya [Determination of the error in the shape of a part shaping by a planetary mechanism using the methods of geometric cutting theory]. *STIN=STIN*, 2017, no. 4, pp. 24-26 (In Russ.).

15. Grechishnikov V.A., Romanov V.B., Pivkin P.M., Kuts V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N., Yurasov S.Y. Errors in shaping by a planetary mechanism. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, no. 9, pp. 824-826.

16. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Razumov M. S. Upravlenie prostranstvennoi orientatsiei uzlov robota v protsesse additivnogo formoobrazovaniya izdelii [Control of spatial orientation of robot units in the process of additive forming of products]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Voronezh state technical University*, 2018, 4, vol. 14, pp. 122-129 (In Russ.).

17. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Razumov M. S. Eksperimental'noe opredelenie parametrov poperechnogo secheniya edinichnogo sloya pri additivnom formoobrazovanii izdelii [Experimental determination of the cross-section parameters of a single layer in the additive forming products]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of Tula State University. Technical science*, 2018, no.10, pp. 264-270 (In Russ.).

18. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Olesnicki A. V., Simon J. E. Proektirovanie tekhnologicheskogo oborudovaniya dlya additivnogo formoobrazovaniya s gibridnoi komponovkoi [Design of technological equipment for additive shaping with hybrid layout]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 111-118 (In Russ.).

19. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Razumov M. S. Reshenie zadachi approksimatsii krivolineinykh poverkhnostei sloyami s postoyannym i peremennym secheniem pri formoobrazovanii additivnymi metodami [Solution of the problem of approximation of curvilinear surfaces by layers with constant and variable cross-section at forming by additive methods]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Bryansk State Technical University*, 2019, no. 3 (76), pp. 38-40 (In Russ.).

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Гречухин Александр Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, кафедра машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: agrechuhin@mail.ru

**Alexander N. Grechukhin**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Machine-Building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: agrechuhin@mail.ru

**Куц Вадим Васильевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

**Vadim V. Kuts**, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor Machine-Building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

**Олешицкий Алексей Вячеславович**, магистрант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: oav46@yandex.ru

**Alexey V. Oleshitsky**, Master Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: oav46@yandex.ru

**Разумов Михаил Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mika\_1984\_@mail.ru

**Michail S. Razumov**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Machine-Building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mika\_1984\_@mail.ru