

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-23-34>



Механизмы управления погрешностью аддитивного формообразования с применением устройств с гибридной компоновкой

А. Н. Гречухин ¹ ✉, В. В. Куц ¹, А. В. Олешицкий ¹, М. С. Разумов ¹

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

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Исследование посвящено повышению точности формирования поверхностного слоя изделий машиностроения аддитивными методами.

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. Для обеспечения ориентации формообразуемой поверхности предложено применение оборудования для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой.

Результаты. Разработана модель формообразующей системы оборудования для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой. Решена задача параметрического синтеза технологического оборудования для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой, в результате которой были обеспечены необходимые формообразующие возможности оборудования. Разработана методика расчета кинематической погрешности аддитивного формообразования, позволяющая подобрать такие двигатель и драйвер аддитивного оборудования, которые позволят получить необходимую точность формообразования.

Заключение. Разработанная методика позволяет решить задачу параметрического синтеза технологического оборудования с гибридной компоновкой из условия обеспечения заданной величины кинематической составляющей погрешности аддитивного формообразования.

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.

Для цитирования: Механизмы управления погрешностью аддитивного формообразования с применением устройств с гибридной компоновкой / А. Н. Гречухин, В. В. Куц, А. В. Олешицкий, М. С. Разумов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 23-34. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-23-34>.

Статья поступила в редакцию 02.08.2019

Статья подписана в печать 20.09.2019

Статья опубликована 25.10.2019

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

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2019; 23(5): 23-34

Control Mechanisms of Additive Shaping Error with the Use of Hybrid Design Devices

Alexander N. Grechukhin¹ ✉, Vadim V. Kuts¹, Alexey V. Oleshitsky¹,
Michael S. Razumov¹

¹ Southwest State University,
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The study is aimed at improving the accuracy of shaping the surface layer of mechanical engineering products by additive methods.

Methods. Shaping of parts surfaces by additive methods is characterized by high values of shaping error (approximation.) To reduce this error it is necessary to ensure the orientation of the surface at which the normal at the point of the surface being shaped will coincide with the axis of the final link of the shape-generating system. To ensure the orientation of the surface being shaped, the use of equipment for additive shaping with a hybrid design is proposed.

Results. The model of shape-generating system of the equipment for additive shaping with hybrid design has been developed. The problem of parametric synthesis of hybrid design technological equipment for additive shaping has been solved, as a result of which the necessary shaping capabilities of the equipment have been provided. The calculation method of kinematic error of additive shaping has been developed, which allows you to choose such engine and driver of additive equipment that will make it possible to obtain the necessary accuracy of shaping.

Conclusion. The developed technique allows us to solve the problem of parametric synthesis of hybrid design technological equipment based on the condition of providing a given value of the kinematic component of additive shaping error.

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.

Financing: The study was supported by the 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. Control Mechanisms of Additive Shaping Error with the Use of Hybrid Design Devices. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 23-34 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-23-34>.

Received 02.08.2019

Accepted 20.09.2019

Published 25.10.2019

Введение

Формообразование деталей аддитивными методами характеризуется высокими величинами погрешности фор-

мы. Это связано с тем, что формирование поверхностного слоя детали сложной формы происходит послойно (сло-

ями), а ориентация конечного звена формообразующей системы (экструдера) аддитивной установки при этом неизменна и независима от кривизны формируемой поверхности [1-11].

Для снижения величины погрешности формы детали необходимо при фор-

мировании точек поверхности обеспечить её ориентацию, при которой нормаль в точке формообразуемой поверхности будет совпадать с осью конечного звена формообразующей системы (рис. 1) [12-16].

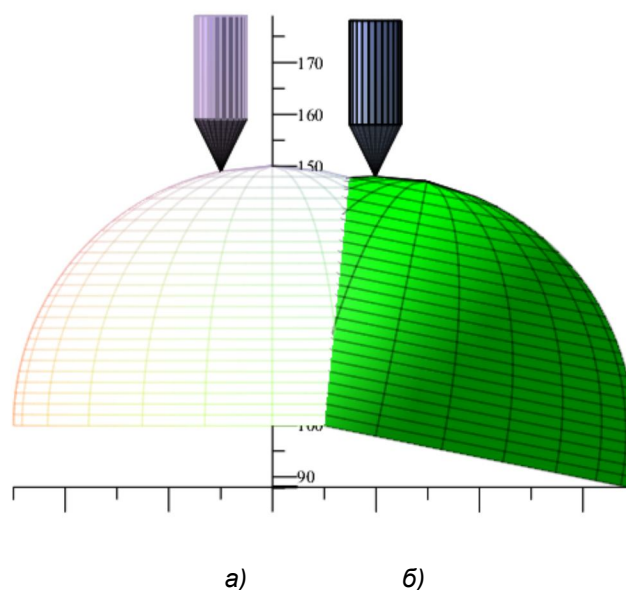


Рис. 1. Формирование точки на поверхности детали: а – традиционным способом; б – с динамической ориентацией детали относительно оси экструдера

Fig. 1. Forming a point on the part surface: a – in the traditional way; б – with the dynamic orientation of the part relative to the axis of the extruder

Материалы и методы

Для решения задачи динамического управления процессом аддитивного формообразования в работе [14] было предложено создать установку на базе механизма с гибридной компоновкой (рис. 2).

Модель формообразующей системы проектируемой установки представляет собой основное уравнение формообразования [17-20]:

$$\bar{r}_0(u, v) = [A_{32} \cdot A_{21}(q_1, \dots, q_4) \cdot A_{10}(q_5) \cdot A_{0j}(u, v)]^{-1} \cdot \bar{e}_4, \quad (1)$$

и системы геометрических связей:

$$\begin{cases} L = |\bar{R}_1(q_1) - A_{21}(q_1, \dots, q_4) \bar{S}_1|; \\ L = |\bar{R}_4(q_2) - A_{21}(q_1, \dots, q_4) \bar{S}_4|; \\ L = |\bar{R}_5(q_3) - A_{21}(q_1, \dots, q_4) \bar{S}_5|; \\ L = |\bar{R}_6(q_4) - A_{21}(q_1, \dots, q_4) \bar{S}_6|, \end{cases} \quad (2)$$

где A_{32} – матрица, определяющая положение экструдера в системе координат основания; $A_{21}(q_1, \dots, q_4)$ – матрица, определяющая положение подвижной платформы экструдера в системе координат основания при заданных параметрах движения q_1, \dots, q_4 ; $A_{10}(q_5)$ –

матрица, определяющая поворот стола с формируемой деталью на величину q_5 относительно его исходного положения; $A_{0j}(u, v)$ – матрица перехода из системы координат детали в систему координат точки формируемой поверхности с координатами (u, v) ; L – длины штанг; $\bar{R}_1(q_1), \bar{R}_2(q_1), \dots, \bar{R}_6(q_4)$ – векторы, определяющие положение подвижных шарниров в системе координат основания установки; q_1, \dots, q_4 – управляемые координаты установки, определяющие положение шарниров по оси Z ; $\bar{S}_1, \bar{S}_2, \dots, \bar{S}_6$ – векторы, задающие положение шарниров подвижной платформы в её собственной системе координат; \bar{e}_4 – вектор с нулевой длиной $\bar{e}_4 = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$.

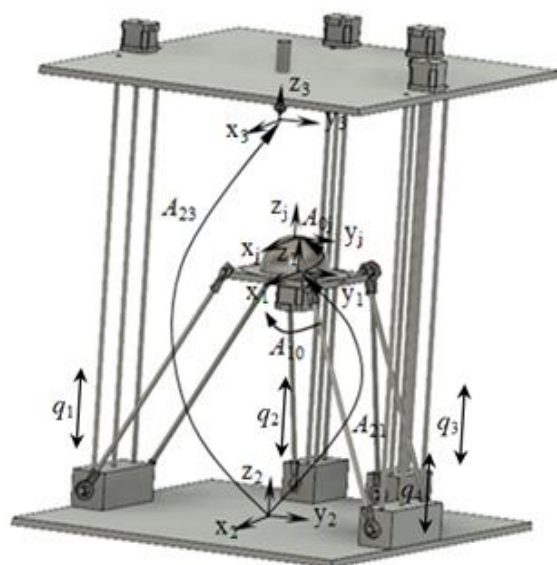


Рис. 2. Модель установки для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой

Fig. 2. Plant model for additive shaping with hybrid layout

В ходе решения задачи параметрического синтеза при проектировании технологического оборудования для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой необходимо обеспечить формообразующие возможности установки [21], такие как:

- возможность контакта экструдера со всеми точками формообразуемой детали (внутренними точками детали и точками на её поверхности);

- возможность установки нормали к поверхности детали для всех точек поверхности детали вдоль оси экструдера [22-24].

Однако в процессе формообразования могут возникать смещения детали от её номинального положения, что приводит возникновению погрешности формообразования. Возникновение данных смещений является результатом воздействия различных факторов, в том числе факторов, связанных с кинематической погрешностью применяемых шаговых двигателей.

В связи с этим, необходимо решить задачу параметрического синтеза проектируемого технологического оборудования с гибридной компоновкой, обеспечив заданную кинематическую составляющую погрешности аддитивного формообразования.

Для этого, модель формообразующей системы приведем к виду

$$\bar{r}_0(u, v) = [A_{32} \cdot A_{21}(q_1 + \Delta q_1, \dots, q_4 + \Delta q_4) \cdot A_{10}(q_5 + \Delta q_5) \cdot A_{0j}(u, v)]^{-1} \cdot \bar{e}_4, \quad (3)$$

$$\begin{cases} L = |\bar{R}_1(q_1 + \Delta q_1) - A_{21}(q_1 + \Delta q_1, \dots, q_4 + \Delta q_4) \bar{S}_1|; \\ L = |\bar{R}_4(q_2 + \Delta q_2) - A_{21}(q_1 + \Delta q_1, \dots, q_4 + \Delta q_4) \bar{S}_4|; \\ L = |\bar{R}_5(q_3 + \Delta q_3) - A_{21}(q_1 + \Delta q_1, \dots, q_4 + \Delta q_4) \bar{S}_5|; \\ L = |\bar{R}_6(q_4 + \Delta q_4) - A_{21}(q_1 + \Delta q_1, \dots, q_4 + \Delta q_4) \bar{S}_6|, \end{cases} \quad (4)$$

где $\Delta q_1, \dots, \Delta q_5$ – величины отклонений параметров движения от их номинальных значений q_1, \dots, q_5 .

Матрицу $A_{21}(q_1 + \Delta q_1, \dots, q_4 + \Delta q_4)$, входящую в (3) и (4) при заданных величинах $\Delta q_1, \dots, \Delta q_5$ определим путем её замены в (4) на эквивалентную матрицу

$$\begin{aligned} A_{21}(q_1 + \Delta q_1, \dots, q_4 + \Delta q_4) = \\ A_{21}(x, y, z, \beta_x) = A^{[1]}(x) \cdot A^{[2]}(y) \cdot \\ \cdot A^{[3]}(z) \cdot A^{[4]}(\beta_x) \end{aligned} \quad (5)$$

и решением системы (4) относительно параметров x, y, z, β_x .

Тогда отклонение точки детали $\bar{r}_0(u, v)$ от её номинального положения при заданных величинах $\Delta q_1, \dots, \Delta q_5$ определим как

$$\bar{\Delta}(\Delta q_1, \dots, \Delta q_5) = [A_{21}(q_1, \dots, q_4) A_{10}(q_5) - A_{21}(x, y, z, \beta_x) A_{10}(q_5 + \Delta q_5)] \cdot A_{0j}(u, v) \cdot \bar{e}_4. \quad (6)$$

Абсолютную величину погрешности формообразования определим в виде проекции вектора $\bar{\Delta}(\Delta q_1, \dots, \Delta q_5)$ на вектор нормали к поверхности детали в точке $\bar{r}_0(u, v)$

$$\begin{aligned} \Delta_{\perp}(\Delta q_1, \dots, \Delta q_5) = \\ = \bar{\Delta}(\Delta q_1, \dots, \Delta q_5) \cdot \bar{n}(u, v), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\bar{n}(u, v)$ – орт нормали к поверхности детали [2]:

$$\bar{n}(u, v) = A_{21}(q_1, \dots, q_4) \cdot A_{10}(q_5) \cdot A_{0j}(u, v) \cdot \bar{e}_3, \quad (8)$$

где \bar{e}_3 – орт, определяющий положительное направление оси Z_j системы координат точки на поверхности детали $\bar{e}_3 = [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$.

Рассматривая различные сочетания отклонений в крайних точках $\pm \Delta q_1, \dots, \pm \Delta q_5$ можно определить максимальную величину погрешности формообразования Δ_{\max} .

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим в качестве примера процесс формирования деталей типа полусферы с радиусом 75 мм, описываемой уравнением

$$r_0(\theta, z) = \begin{bmatrix} \sqrt{R^2 - z^2} \cdot \cos(\theta) \\ \sqrt{R^2 - z^2} \cdot \sin(\theta) \\ z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где θ, z – криволинейные координаты поверхности; R – радиус полусферы.

Приняв длину штанг $L=350$ мм, шаг ходового винта примем $P=10$ мм, и взяв для примера распространенные шаговые двигатели Nema 17, с погрешностью двигателей $\Delta q=1,8^\circ$ были получены следующие закономерности изменения погрешности формообразования от параметра полусферы z , представленные в табл. 1 и на рис. 3.

Таблица 1

Рассчитанные величины погрешности
формообразования поверхности
полусферы

Table 1

Calculated values of shaping error
of hemisphere surface

z, мм	Δ_{\max} , мм
0	24,913
1	23,895
5	10,200
15	0,762
30	0,318
45	0,192
60	0,122
75	0,051

Анализ табл. и графика (см. рис. 3) показывает, что наибольшие отклонения обеспечиваются при параметре $z=0$, когда подвижная платформа установки принимает положение параллельно экструдеру, поэтому дальнейший анализ отклонений целесообразно вести для параметра $z=0$.

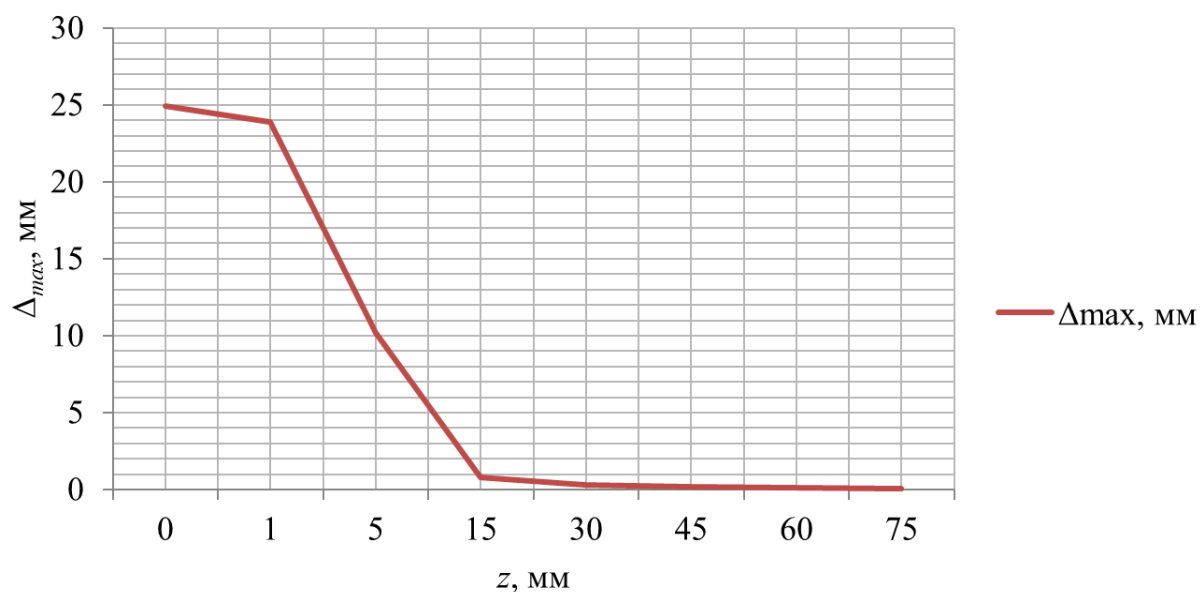


Рис. 3. Изменение погрешности формообразования полусферы от параметра z

Fig. 3. Changing the error of hemisphere shaping on z parameter

При $z=0$ был выполнен расчет изменения погрешности формообразования для различных значений погрешности шаговых двигателей, результаты которого показаны в табл. 2 и на рис. 4.

Таблица 2

Рассчитанные величины погрешности
формообразования
для различных погрешностей Δq

Table 2

Calculated values of forming
error for different errors Δq

$\Delta q, ^\circ$	Δ_{\max} , мм
1	2,520
0,9	2,081
0,45	0,980
0,23	0,482
0,11	0,240
0,06	0,120
0,01	0,022

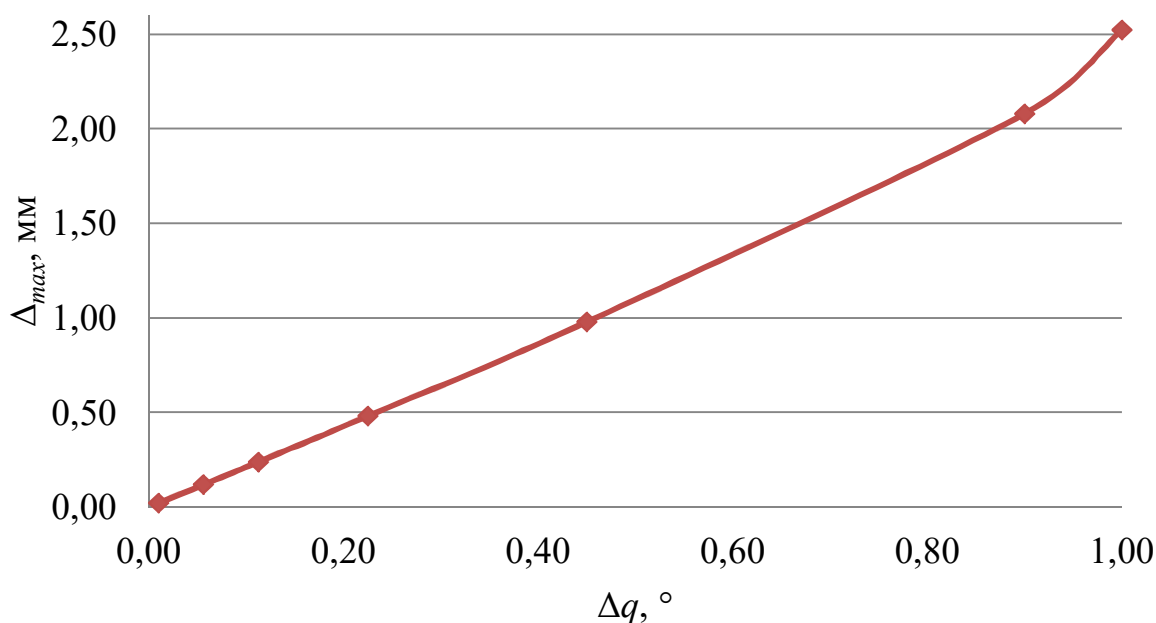


Рис. 4. Изменение погрешности формообразования от величины погрешности шаговых двигателей

Fig. 4. Changing the error of shaping on the magnitude of stepper motors error

Выводы

Таким образом, с применением данного метода расчета становится возможным решить задачу параметрического синтеза технологического оборудова-

ния с гибридной компоновкой из условия обеспечения заданной величины кинематической составляющей погрешности аддитивного формообразования.

Список литературы

1. Burns M. Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing. Englewood Cliffs, N.J., USA: PTR Prentice Hall, 1993. 369 pp.
2. Сапрыкин А.А. Повышение производительности процесса селективного лазерного спекания при изготовлении прототипов: дис... канд. техн. наук: 05.03.01. Юрга: Томский политехнический университет, 2006.
3. 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, no. 24. P. 11832-11835.
4. 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.

5. 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. No. 1–4. P. 319–328.

6. 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.

7. Hong S. Byun, Kwan H. Lee Optimal part orientation of rapid prototyping using a genetic algorithm // Computers & Industrial Engineering. 2004. P. 426–431.

8. Kim J. Y., Lee K., Park J.C. Determination of optimal part orientation in stereolithographic rapid prototyping // Technical Report, Department of Mechanical Design and Production Engineering. Seoul : Seoul National University. 1994.

9. Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereolithography apparatus / P.T. Lan, S. Y. Chou, L. L. Chent, D. Gemmill // Computer- Aided Design. 1997. Vol. 29. No. 1. P. 53– 62.

10. 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.

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

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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>.

17. Лашнев С.И., Борисов А.Н., Емельянов С.Г. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами / Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 1997. 391с.

18. Куц В.В. Методология предпроектных исследований специализированных металлорежущих систем: дис. ...д-ра техн. наук. Курск, 2012. 366 с.

19. 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.

20. 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. Vol. 37. No. 9. P. 824-826.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

References

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

2. Saprykin A. A. Povyshenie proizvoditel'nosti protsessa selektivnogo lazernogo spekaniya pri izgotovlenii prototipov [Increasing the productivity of the process of selective laser sintering in the manufacture of prototypes] Diss. kand. tekhn. nauk. Yurga, 2006, p. 153 (In Russ.).

3. 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.

4. 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.).

5. Singhal S. K., Pandey A. P., Pandey P. M. and Nagpal A. K. Optimum part deposition orientation in stereolithography. *Computer-Aided Design & Applications*, 2005, vol. 2, pp. 319–328.

6. 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.

7. Hong S. Byun, Kwan H. Lee. Optimal part orientation of rapid prototyping using a genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 2004, pp. 426–431.

8. Kim J Y, Lee K and Park J. C. Determination of optimal part orientation in stereolithographic rapid prototyping. *Technical Report. Department of Mechanical Design and Production Engineering*. Seoul: Seoul National University, 1994, pp. 356-366.

9. Lan P. T., Chou S., Chent Y., Gemmill L. D. Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereolithography apparatus. *Computer-Aided Design*, 1997, no. 29, pp. 53– 62.

10. 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, pp 110–116.

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

12. 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, no. 4, pp. 122-129 (In Russ.).

13. 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. Tekhniches-*

kie nauki = News of Tula State University. Technical science, 2018, no. 10, pp. 264-270 (In Russ.).

14. 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.).

15. 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.).

16. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Razumov M. S., Vanin I. V. Dinamicheskoe upravlenie protsessom additivnogo formoobrazovaniya s primeneniem 5-koordinatnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya [Dynamic Management of Additive Shaping Process with the Use of 5-Coordinate Processing Equipment]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2019, vol. 23, no. 1, pp. 9-20 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-9-20>.

17. Lashnev S. I., Borisov A. N., Emelyanov S. G. *Geometricheskaya teoriya formirovaniya poverkhnostei rezhushchimi instrumentami* [Geometric theory of surface formation by cutting tools]. Kursk, 1997, 391 p. (In Russ.).

18. Kuts V. V. Metodologiya predproektnykh issledovaniy spetsializirovannykh metallorezhushchikh sistem [Methodology of pre-project studies of specialized metal-cutting systems] Diss. dokt. tehn. nauk. Kursk, 2012, p. 366 (In Russ.).

19. Grechishnikov V. A., Kuts V. V., Razumov M. S. et al. 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.).

20. Grechishnikov V. A., Romanov V. B., Pivkin P. M. Errors in shaping by a planetary mechanism. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, no. 9, pp. 824-826.

21. 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 226, 2018, pp. 010-021.

22. 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.

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

24. 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*, 2019, Series 1210, pp. 1210-1220.

Информация об авторах / Information about the Authors

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

Alexander N. Grechukhin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Machine Building 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», Курск, Российская Федерация, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Vadim V. Kuts, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Machine Building 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», Курск, Российская Федерация, e-mail: oav46@yandex.ru

Alexey V. Oleshitsky, Undergraduate, 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», Курск, Российская Федерация, e-mail: mika_1984@mail.ru

Michael 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