
МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

**MECHANICAL ENGINEERING
AND ENGINEERING SCIENCE**

УДК 621.7

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-1-8-20

**Динамическое управление процессом аддитивного
формообразования с применением 5-координатного
технологического оборудования****Гречухин А.Н.¹ ✉, Куц В.В.¹, Разумов М.С.¹, Ванин И.В.¹**¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Исследование посвящено изучению вопросов точности формирования поверхностного слоя изделий машиностроения аддитивными методами. Проведен анализ преимуществ и недостатков технологий послойного синтеза изделий. Выявлено, что при аддитивном формообразовании точностные характеристики поверхностного слоя существенно отличаются от точностных характеристик поверхностного слоя изделий, полученных традиционными методами.

Методы. Формообразование поверхностей деталей сложного профиля аддитивными методами характеризуется высокими значениями величины статической составляющей погрешности обработки - погрешности формообразования (аппроксимации). Проведен анализ отечественных и зарубежных трудов по теме исследований. Предложено для повышения точностных характеристик сложных поверхностей изделий, получаемых аддитивными методами, осуществлять динамическую пространственную ориентацию конечного элемента формообразующей системы аддитивного оборудования. Для управления пространственной ориентацией конечного элемента формообразующей системы предложено применение 5-координатного технологического оборудования. Разработана методика расчета управляемых параметров 5-координатного технологического оборудования, при которых будет обеспечена пространственная ориентация конечного элемента формообразующей системы по нормали в точке номинальной поверхности формообразуемой детали.

Результаты. Произведен расчет управляемых параметров 5-координатного технологического оборудования при формообразовании полусферической поверхности аддитивными методами. В результате математического моделирования получены графические зависимости, отражающие величину углов наклона рабочего стола 5-координатного технологического оборудования, а так же поворота платформы с деталью при формообразовании полусферической поверхности детали аддитивными методами.

Заключение. Предлагаемая методика позволит осуществить динамическую пространственную ориентацию конечного элемента формообразующей системы аддитивного оборудования, что позволит снизить величину погрешности формообразования (аппроксимации) сложнопрофильных поверхностей деталей при их формообразовании аддитивными методами.

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

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

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

Для цитирования: 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. 8-20. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-1-8-20.

UDC 621.7

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-1-8-20

Dynamic Management of Additive Shaping Process with the Use of 5-Coordinate Processing Equipment

Aleksandr N. Grechukhin ¹ ✉, Vadim V. Kuts ¹,
Mikhail S. Razumov ¹, Ivan V. Vanin ¹

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

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The study is about accuracy of surface layer formation of mechanical engineering products by additive method. Advantages and disadvantages analysis of layer-by-layer synthesis technologies of products was done. It was identified that accuracy characteristics of surface layer under additive shaping significantly differ from accuracy characteristics of products' surface layer obtained by traditional methods.

Methods. Surfaces shaping of complex details by additive methods is characterized by high static values of processing error. Processing error is a shaping error (approximation). Analysis of Russian and foreign literature was done. It was offered to carry out dynamic spatial orientation of a final element of a form-building system of the additive equipment. It was offered for increase in accuracy characteristics of products' received by additive methods. It was offered to use 5-coordinate processing equipment for spatial orientation management of a final element of a form-building system. Calculation method of operated parameters of 5-coordinate processing equipment was developed. Spatial orientation of a final element of a shaping system will be at these parameters. The orientation will be according to normals in a point of nominal surface of a shaping detail.

Results. Operated parameters determination of 5-coordinate processing equipment when shaping a hemispherical surface was done by additive methods. Graphic dependences are results of mathematical modeling. They reflect the size of tilt angles of 5-coordinate processing equipment desktop. Platform turn with a detail at hemispherical surface shaping of a detail by additive methods was also reflected.

Conclusion. The offered technique allows carrying out dynamic spatial orientation of a final element of a shaping system of additive equipment. This can reduce shaping error (approximation) of figurine details' surfaces in the process of their shaping by additive methods.

Key words: additive technologies; layer-by-layer synthesis; shaping; error.

Acknowledgements: The study was supported by the Grant of the President of the Russian Federation for young scientists МК-6406.2018.8.

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

For citation: Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S., Vanin I.V. 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, 23(1): 8-20 (in Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-1-8-20.

Введение

Развитие отечественного машиностроения и вывод его продукции на принципиально новый технологический уровень, повышение производительности труда, качества изделий возможно за счет применения новых производственных технологий, к числу которых относятся технологии формообразования аддитивными методами.

Аддитивные методы – это методы формообразования, основанные на послойном добавлении объемов материала. К аддитивным методам относят послойный синтез, при котором материал добавляется плоскими или концентричными слоями. Для послойного синтеза характерны следующие особенности: поверхности изделия формируются боковыми сторонами добавляемых слоев, аппроксимируя форму первых; точность формируемых изделий ограничена минимальной толщиной слоев [1, 2].

Использование аддитивных технологий радикально меняет процесс производства, так как будущее изделие «выращивается» из расходного материала. При этом процедура построения может быть любой: сверху вниз или снизу вверх. Использование же различ-

ных по своим свойствам и составу материалов и соответствующих технологий позволяет получать модели с разными физическими характеристиками и возможностями [3].

Однако несмотря на очевидные положительные стороны применения аддитивных технологий, их область применения остается ограниченной по сравнению с традиционными субтрактивными и формативными технологиями вследствие наличия следующих недостатков: низкой производительности процесса изготовления изделий; его высокой энергоемкости; высокой стоимости технологического оборудования, а так же исходных материалов. Основным фактором, препятствующим расширению применения аддитивных технологий в технологических процессах изготовления изделий, является высокая погрешность формообразования (аппроксимации) поверхностей.

Таким образом, целью исследования является снижение погрешности формообразования (аппроксимации) изделий, полученных аддитивными методами.

Материалы и методы решения задачи

Вопросам снижения погрешности формообразования аддитивными мето-

дами посвящено большое количество работ [2, 4, 5–11]. Так, например, в работе [6] для снижения погрешности, предлагается применять статическую ориентацию формообразуемой поверхности. Известны так же способы снижения погрешности формообразования, основанные на применении последующей механической обработки.

Перспективным направлением исследований в данной области является обеспечение динамической ориентации конечного звена формообразующей системы аддитивного оборудования, применение которой позволит снизить величину погрешности формообразования аддитивных методов за счет обеспечения аппроксимации сложнопрофильных поверхностей участками поперечного сечения единичного слоя с наименьшей кривизной.

Существуют различные варианты реализации пространственной ориентации конечного звена формообразующей системы аддитивного оборудования, которые сопряжены с созданием нового технологического оборудования, либо с модернизацией уже существующего, что позволит расширить, таким образом, его технологические возможности. Причем, первый вариант может быть реализован с применением в качестве базовой платформы на основе 6-координатных промышленных роботов, а второй – с применением поворотных мехатронных систем, которые обеспечат базовому аддитивному оборудованию позиционирование конечного звена

формообразующей системы по 5-ти координатам.

Анализ научных трудов в данной области показывает актуальность темы исследований.

Так, в работе [4] был предложен способ аддитивного формообразования с использованием мехатронной системы с параллельной кинематикой – платформы Стюарта. При этом способе обеспечивается ориентация конечного звена формообразующей системы аддитивного оборудования по нормали к поверхности детали в формируемой точке.

Преимуществами применения мехатронных систем с параллельной кинематикой является высокая точность функционального управления перемещением и ориентацией конечного элемента формообразующей системы в трехмерном рабочем пространстве, а так же жесткость при действии динамических нагрузок, компактность устройств. Однако такие механизмы, по сравнению с механизмами с последовательной структурой, имеют меньшее рабочее пространство, небольшую манипулятивность, высокую сложность конструкции механизма. Так же, в процессе работы таких устройств, возникают внутренние связи, ограничивающие их рабочие пространства, которые могут приводить к потере управляемости механизмом [12, 13, 15, 20, 21, 22].

Таким образом, для решения задачи обеспечения динамической пространственной ориентации конечного звена формообразующей системы аддитивно-

го оборудования, альтернативным вариантом механизма с параллельной структурой могут стать механизмы с последовательной структурой, применение которых позволит расширить диапазоны управления технологическими параметрами, обеспечив снижение погрешности формообразования поверхностей сложной формы аддитивными методами.

Для реализации динамической пространственной ориентации конечного

звена формообразующей системы аддитивного оборудования, рассмотрим применение поворотных мехатронных систем, которые обеспечат базовому аддитивному оборудованию позиционирование конечного звена формообразующей системы по 5-и координатам.

Для этого необходимо решить задачу расчета управляемых параметров оборудования, при которых будет обеспечена необходимая пространственная ориентация его конечного звена (рис. 1).

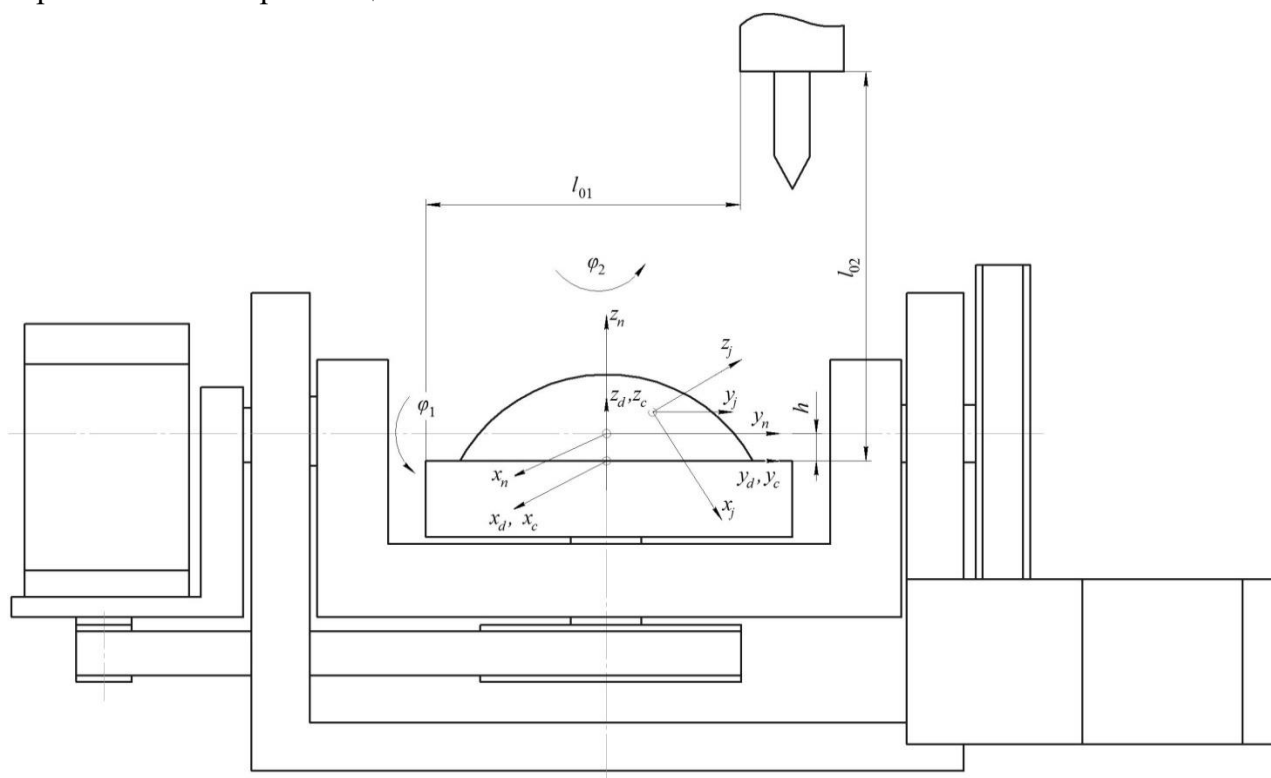


Рис. 1. Схема расчета управляемых параметров для обеспечения пространственной ориентации формообразующего элемента аддитивной установки с применением 5-координатного технологического оборудования

Опишем основное уравнение процесса аддитивного формообразования с применением 5-координатного технологического оборудования, обеспечивающего пространственную ориентацию конечного элемента формообразующей системы аддитивной установки.

Уравнение имеет вид

$$\bar{r}_0(u, v) = A_{0\Sigma} \cdot A_{\Sigma}(\varphi_1, \varphi_2, h) \cdot \bar{e}^4, \quad (1)$$

где $A_{0\Sigma}$ — матрица установки системы координат детали в рабочем пространстве технологического оборудования; $A_{\Sigma}(\varphi_1, \varphi_2, h)$ — матрица формообразу-

ющей системы технологического оборудования, соответствующая значениям углов поворота соответствующих звеньев 5-координатной мехатронной системы; φ_1 – угол поворота стола относительно оси ОУ; φ_2 – угол поворота 2-го звена относительно оси ОZ; h – расстояние между плоскостью и осью вращения стола; e^{-4} – радиус-вектор начала координат; u, v – криволинейные координаты формируемой детали.

Матрица установки системы координат детали в рабочем пространстве 5-координатной мехатронной системы имеет вид (см. рис. 1) [14, 18, 23, 24, 25]:

$$A_{0\Sigma} = A^{\{2\}}(l_{01}) \cdot A^{\{3\}}(l_{02}), \quad (2)$$

где $A^{\{2\}}(l_{01})$ – матрица установки системы координат детали в рабочем пространстве 5-координатного оборудования по оси ОZ;

$A^{\{3\}}(l_{02})$ – матрица установки системы координат детали в рабочем пространстве 5-координатного оборудования по оси ОУ.

Матрица формообразующей системы 5-координатной мехатронной системы имеет вид [18, 26, 27, 28]:

$$A_{\Sigma} = A^{\{5\}}(\varphi_1) \cdot A^{\{3\}}(h) \cdot A^{\{6\}}(\varphi_2), \quad (3)$$

где $A^{\{5\}}(\varphi_1)$ – матрица поворота системы координат соответствующего звена мехатронной системы по оси ОУ;

$A^{\{3\}}(h)$ – матрица перемещения систем координат соответствующего звена мехатронной системы по оси ОZ;

$A^{\{6\}}(\varphi_2)$ – матрица поворота систем координат соответствующего звена мехатронной системы по оси ОZ.

Параметры, входящие в матрицу A_{Σ} , можно разделить на управляемые и неуправляемые (конструктивные) параметры технологического оборудования.

Для обеспечения процесса формообразования, на неуправляемые параметры 5-координатного оборудования, входящие в уравнение формообразования, необходимо наложить связь вида

$$q_i = const. \quad (4)$$

К неуправляемым параметрам относятся длины звеньев технологического оборудования, а именно элементы матрицы формообразующей системы: h .

На пять управляемых параметров технологического оборудования, для обеспечения процесса формообразования, необходимо наложить связь вида

$$\begin{aligned} q_1 &= q_1(u, v); \\ q_2 &= q_2(u, v); \\ &\dots \\ q_5 &= q_5(u, v). \end{aligned} \quad (5)$$

К управляемым параметрам относятся углы поворота звеньев мехатронной системы вокруг оси ОУ, ОZ, параметры φ_1, φ_2 .

При формообразовании j -й точки поверхности детали уравнения (5) можно определить путем решения матричного уравнения

$$A_{0j}(u_j, v_j) \cdot A_{0\Sigma} \cdot A_{\Sigma}(\varphi_1, \varphi_2, h) = E, \quad (6)$$

где $A_{0j}(u_j, v_j)$ – матрица перехода из системы координат формообразуемой детали в систему координат j -й точки на поверхности детали $\bar{r}_{0j}(u_j, v_j)$;

E – единичная матрица.

Матрица A_{0j} перехода из системы координат формообразуемой детали в

систему координат j -й точки на поверхности детали $\bar{r}_{0j}(u_j, v_j)$ рассчитывается по методике, изложенной в работах [16, 17, 18, 19], по векторам, задающим положительное направление оси Z_j

$$\bar{k}_{j0} = \frac{\partial \bar{r}_{0j}}{\partial u} \times \frac{\partial \bar{r}_{0j}}{\partial v} / \left| \frac{\partial \bar{r}_{0j}}{\partial u} \times \frac{\partial \bar{r}_{0j}}{\partial v} \right|,$$

$$\text{оси } Y_j \quad \bar{j}_{j0} = \frac{\partial \bar{r}_{0j}}{\partial u} / \left| \frac{\partial \bar{r}_{0j}}{\partial u} \right|$$

$$\text{или } \bar{j}_{j0} = \frac{\partial \bar{r}_{0j}}{\partial v} / \left| \frac{\partial \bar{r}_{0j}}{\partial v} \right|,$$

где $\frac{\partial \bar{r}_{0j}}{\partial u}, \frac{\partial \bar{r}_{0j}}{\partial v}$ – частные производные вектора \bar{r}_{0j} по параметрам u, v , а так же вектору \bar{r}_{0j} , задающему положение начала системы координат $X_j Y_j Z_j$.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим пример расчета управляемых параметров 5-координатного технологического оборудования при формообразовании аддитивными методами полусферической поверхности (рис.2).

Уравнение полусферы имеет вид:

$$r_0(\theta; z) = \begin{bmatrix} \sqrt{R^2 - z^2} \cdot \cos(\theta) \\ \sqrt{R^2 - z^2} \cdot \sin(\theta) \\ z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

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

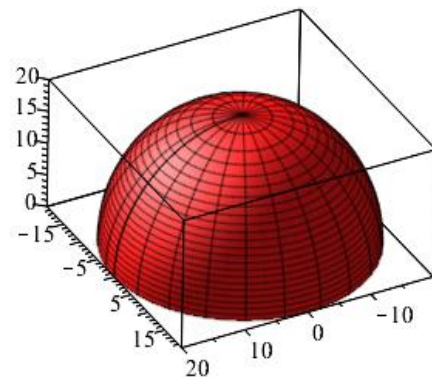


Рис. 2. Графическое представление формообразуемой поверхности

Как было отмечено выше, моделирование процесса формообразования поверхности полусферы происходит с обеспечением ориентации получаемой поверхности в каждой точке перпендикулярно оси конечного звена формообразующей системы технологического оборудования (рис.3).

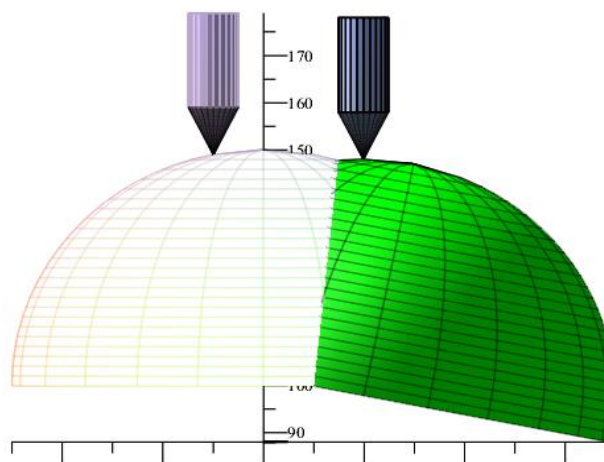


Рис. 3. Ориентация конечного звена формообразующей системы $\theta = 0^\circ, z = 49 \text{ мм}$

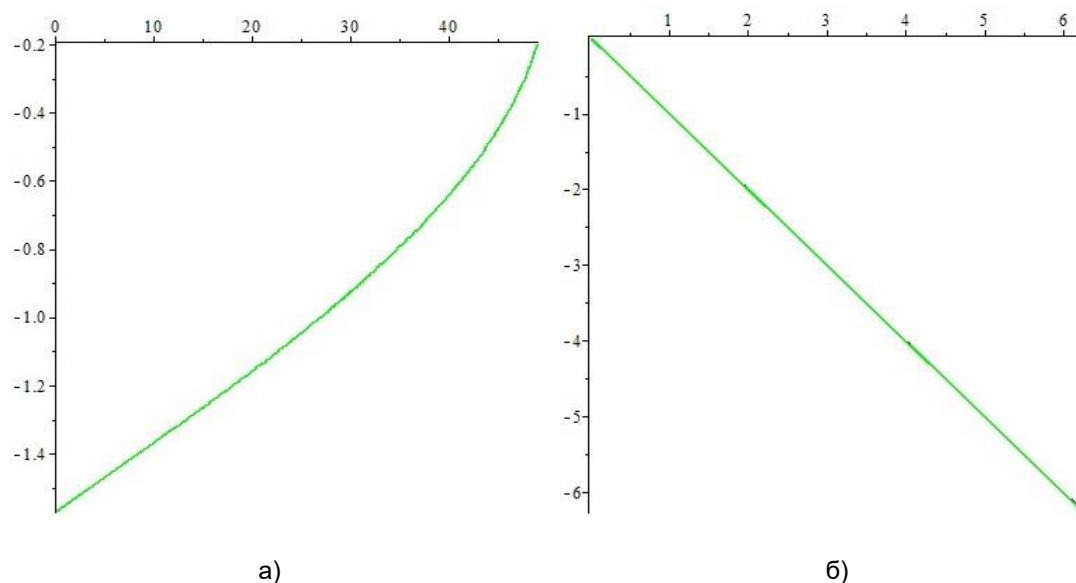


Рис.4. Изменение координат технологического оборудования: а – при повороте стола; б – при вращении платформы с заготовкой

В результате моделирования построены графики, отражающие изменение координат при наклоне поворотного стола технологического оборудования, а так же при вращении платформы с заготовкой.

Выводы

Предлагаемая методика позволит осуществить расчет управляемых пара-

метров 5-координатной мехатронной системы при аддитивном формообразовании изделий, обеспечить динамическую пространственную ориентацию конечного элемента формообразующей системы аддитивного оборудования, что позволит снизить величину погрешности формообразования (аппроксимации), повысить производительность процесса 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. Юрга: Томский политехнический университет, 2006.
3. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: справочник-учебник: в 3 т. Т. 1. Проектирование станков / А.С. Проников, О.И. Аверьянов, Ю.С. Аполлонов [и др.]; под общ. ред. А.С. Проникова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана: Машиностроение, 1994. 444 с.
4. 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 par-

allel kinematics mechanisms // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. № 24. P. 11832-11835.

5. Трансфер аддитивных технологий: промышленность Курской области / Л.М. Червяков, Н.А. Бычкова, Н.В. Елисеева [и др.]. Курск, 2016. 168 с.

6. 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.

7. 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. N. 1–4. P. 319–328.

8. 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.

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

10. Hur J., Lee K. The development of a CAD environment to determine the preferred build-up direction for layered manufacturing // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 1998. №. 14. P. 247–254.

11. 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 Publ.. 1994.

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

13. 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

14. Masood S. H., Rattanawong W. A generic part orientation system based on volumetric error in rapid prototyping // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2002. № 19. P. 209–216.

15. Егоров И. Н. Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами. Владимир, 2010.

16. Лашнев С.И., Борисов А.Н., Емельянов С.Г. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами. Курск, 1997. 391с.

17. Емельянов С.Г. Разработка теории, методов и средств формирования поверхностей сборными металлорежущими инструментами на основе системного моделирования процесса их проектирования: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2001. 407 с.

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

19. Куц В.В., Пономарев В.В. Построение модели формообразования длинных валов с РК - профилем сборной дисковой фрезой // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2017. № 2 (322). С. 110-115.

20. 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.

21. 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. № 9. P. 824-826.

22. Высокоточный промышленный 6-координатный робот. URL: [//video.phim22.com/n535u234a405i3w5m5b3x5.html](https://video.phim22.com/n535u234a405i3w5m5b3x5.html) (дата обращения: 20.05.2018).

23. Повышение точности аддитивных методов формообразования / А.Н. Гречухин, В.В. Куц, М.С. Разумов, А.А. Троян // *Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: материалы международной научно-практической конференции*. Курск, 2018. С. 128-131.

24. 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.

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. 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*. Том 157. С. 198-202.

Поступила в редакцию 05.02.2019

Подписана в печать 04.03.2019

Reference

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 processa selektivnogo lazernogo spekanija pri izgotovlenii prototipov. Diss. kand. tehn. nauk. Jurga, Tomskij politehnicheskij universitet Publ., 2006.
3. Pronikov A.S., Aver'janov O.I., Apollonov Ju.S. i dr. Proektirovanie metallovezhushih stankov i stanochnyh sistem. Spravochnik-uchebnik. Vol. 1. Proektirovanie stankov; ed. by Pronikov A.S. Moscow, MG TU im. N.Je.Baumana; Mashinostroenie Publ., 1994, 444 p.
4. 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.
5. Chervjakov L.M., Bychkova N.A., Eliseeva N.V. eds. Transfer additivnyh tehnologij: promyshlennost' Kurskoj oblasti. Kursk, 2016, 168 p.
6. Dobroskok V.L., Abdurajimov L.N., Chernyshov S.I. Racional'naja orientacija izdelij pri ih poslojnom formo-obrazovanii na baze ishodnoj trianguljacionnoj 3d modeli. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta*, 2010, no. 24, pp. 13-21.
7. 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.
8. 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.
9. Hong S. Byun, Kwan H. Lee Optimal part orientation of rapid prototyping using a genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 2004, pp. 426-431.
10. Hur J., Lee K. The development of a CAD environment to determine the preferred build-up direction for layered manufacturing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 1998, no. 14, pp. 247-254.
11. Kim J. Y., Lee K., Park J.C. Kim J. Y. C. Determination of optimal part orientation in stereolithographic rapid prototyping. Technical Report, Department of Mechanical Design and Production Engineering. Seoul, Seoul National University Publ., 1994.
12. Chou S. Y., Chent L. L., Gemmill D. Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereo-lithography apparatus. *Computer-Aided Design*, 1997, vol. 29, no. 1, pp. 53- 62.
13. 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, no. 1-3, pp. 110-116.

14. Masood S. H., Rattanawong W. A generic part orientation system based on volumetric error in rapid prototyping. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2002, no. 19, pp. 209–216.
15. Egorov I. N. Pozicionno-silovoe upravlenie robototekhnicheskimi i mehatronnymi ustrojstvami. Vladimir, 2010.
16. Lashnev S.I., Borisov A.N., Emel'janov S.G. Geometricheskaja teorija formirovanija poverhnostej rezhushhimi instrumentami. Kursk, 1997, 391 p.
17. Emel'janov S.G. Razrabotka teorii, metodov i sredstv formirovanija poverhnostej sbornymi metallorehushhimi instrumentami na osnove sistemnogo modelirovanija processa ih proektirovanija. Diss. d-ra tekhn. nauk. Moscow, 2001, 407 p.
18. Kuc V.V. Metodologija predproektnyh issledovanij specializirovannyh metallorehushhij sistem. Diss. d-ra tekhn. nauk. Kursk, 2012, 366 p.
19. Kuc V.V., Ponomarev V.V. Postroenie modeli formoobrazovanija dlinnyh valov s RK - profilem sbornoj diskovoj freznoj. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii*, 2017, no. 2 (322), pp. 110-115.
20. Grechishnikov V.A., Kuc V.V., Razumov M.S. Opredelenie pogreshnosti formy detali pri formoobra-zovanii planetarnym mehanizmom metodami geometricheskoj teorii rezanija. *STIN*, 2017, no. 4, pp. 24-26.
21. 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.
22. Vysokotochnyj promyshlennyj 6-i koordinatnyj robot. URL: [//video.phim22.com/n535u234a405i3w5m5b3x5.html](http://video.phim22.com/n535u234a405i3w5m5b3x5.html) (data obrashhenija: 20.05.2018).
23. Grechuhin A.N., Kuc V.V., Razumov M.S., Trojan A.A. Povyshenie tochnosti additivnyh metodov formoobrazovanija. Innovacii, kachestvo i servis v tehnike i tehnologijah. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. Kursk, 2018, pp. 128-131.
24. Grechuhin A.N., Kuc V.V., Razumov M.S. Upravlenie prostranstvennoj orientaciej uzlov robota v processe additivnogo formoobrazovanija izdelij. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2018, vol. 14, no. 4, pp. 122-129.
25. Grechuhin A.N., Kuc V.V., Razumov M.S. Jeksperimental'noe opredelenie parametrov poperechnogo sechenija edinichnogo sloja pri additivnom formoobrazovanii izdelij. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehniceskie nauki*, 2018, no. 10, pp. 264-270.
26. 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, Nomer stat'i 0100214th International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems", DTS 2018; Don State Technical University Rostov-on-Don; Russian Federation; 12 September 2018 do 14 September 2018; Kod 141842.
27. 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, Nomer

stat'i 0100214th International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems", DTS 2018; Don State Technical University Rostov-on-Don; Russian Federation; 12 September 2018 do 14 September 2018; Kod 141842.

28. Grechukhin A.N., Kudelina D.V., Razumov M.S. Development of informationanalytical system for technological requests monitoring, taking intoaccount regional specifics. International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering, vol. 157, pp. 198-202.

Received 05.02.2019

Accepted 04.03.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

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

Aleksandr N. Grechukhin, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: agrechuhin@mail.ru

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

Vadim V. Kuts, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Разумов Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: mika_1984_@mail.ru

Mikhail S. Razumov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: mika_1984_@mail.ru

Ванин Иван Валерьевич, аспирант кафедры машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: ivan606@ro.ru

Ivan V. Vanin, Post-Graduate Student, Department of engineering technologies and equipment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: ivan606@ro.ru