

DOI: [10.34220/2311-8873-2023-30-39](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-30-39)



УДК 621.791.927.5

UDC 621.791.927.5

2.5.6 – технология машиностроения

**ВЫЯВЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ КРИВИЗНЫ ПРИЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЕДИНИЧНОГО НАПЛАВЛЯЕМОГО СЛОЯ ПРИ АДДИТИВНОМ ФОРМООБРАЗОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ В СРЕДЕ ЗАЩИТНОГО ГАЗА**

**IDENTIFICATION OF THE EFFECT OF THE CURVATURE OF THE RECEIVING SURFACE ON THE GEOMETRIC PARAMETERS OF A SINGLE DEPOSITED LAYER DURING ADDITIVE SHAPING BY AN ELECTRIC ARC IN A PROTECTIVE GAS MEDIUM**

**Щербаков Павел Сергеевич,**  
аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск.

**Shcherbakov Pavel Sergeevich,**  
postgraduate student, Southwest State University, Kursk.

**Куц Вадим Васильевич,**  
д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск.

**Kuts Vadim Vasilyevich,**  
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Southwest State University, Kursk.

**Гречухин Александр Николаевич,**  
канд. техн. наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск.

**Grechukhin Alexander Nikolaevich,**  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machine-Building Technologies and Equipment, Southwest State University, Kursk.

**Олещицкий Алексей Вячеславович,**  
аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск.

**Oleshitsky Alexey Vyacheslavovich,**  
postgraduate student, Southwest State University, Kursk.

**Аннотация.** Статья посвящена изучению влияния кривизны приемной поверхности на геометрические параметры единичного наплавленного слоя при аддитивном формообразовании электрической дугой в среде защитного газа. На основе теоретических исследований установлена математическая зависимость для расчета высоты единичного наплавленного слоя с учетом формы приемной поверхности. Установлена теоретическая закономерность изменения высоты единичного наплавленного слоя от кривизны приемной поверхности. Для подтверждения полученной теоретической зависимости были спланированы и

**Annotation.** The article is devoted to the study of the effect of the curvature of the receiving surface on the geometric parameters of a single deposited layer during additive shaping by an electric arc in a protective gas medium. Based on theoretical studies, a mathematical dependence has been established for calculating the height of a single deposited layer, taking into account the shape of the receiving surface. The theoretical regularity of the change in the height of a single deposited layer from the curvature of the receiving surface is established. To confirm the obtained theoretical dependence, a series of experiments were planned and carried out, according to the results of which, on the basis of dispersion analysis, the influence

проведены серии экспериментов, по результатам которых, на основе дисперсионного анализа, установлено влияние кривизны приемной поверхности на геометрически параметры единичного наплавленного слоя.

of the curvature of the receiving surface on the geometrically parameters of a single deposited layer was established.

**Ключевые слова:** АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ФОРМООБРАЗОВАНИЕ, ВЫПУКЛАЯ ПОВЕРХНОСТЬ, ВОГНУТАЯ ПОВЕРХНОСТЬ, ПОГРЕШНОСТЬ.

**Keywords:** ADDITIVE TECHNOLOGIES, FORM-FORMATION, CONVEX SURFACE, CONCAVE SURFACE, SINFULNESS.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

## 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В настоящее время аддитивные технологии применяются во многих сферах промышленной деятельности. Применения таких технологий позволяет сократить экономические затраты на определенных этапах технологического процесса. Благодаря разработке новых технологий и способов формирования единичных слоев, становится возможным расширение области применения технологий аддитивного формообразования [1-5].

Одним из наиболее производительных является способ аддитивного формообразования изделий, реализующий послойное построение посредством расплавления металлической проволоки электрической дугой с последующим застыванием расплавленного материала. Такой процесс происходит в среде защитного газа, имеет ряд преимуществ, обозначенных в работах [6-8].

В то же время, следует отметить некоторые недостатки способа аддитивного формообразования электрической дугой, среди которых выделяют относительно низкую точность изготовления, деформацию изделия. Однако, обозначенный выше способ является перспективным, о чем свидетельствует достаточно большое количество публикаций, посвященных изучению проблем и решению задач в области аддитивного формообразования с помощью электрической дуги.

Одной из таких проблем является проблема формирования структуры металла наплавленных валиков [9-12]. Другой, не менее важной проблемой является обеспечение точности геометрии деталей, полученных таким способом [13-20]. Авторами отмечается, что одной из причин, которая может быть связана с этим, является значительный перегрев, которому подвергаются предыдущие слои в ходе значительного долгосрочного термического воздействия. Так же, с этим фактором может быть связано изменение геометрии получаемых изделий. При увеличении высоты наплавленного изделия могут наблюдаться значительные изменения геометрии наплавленного слоя.

Другим недостатком способа аддитивного формообразования электрической дугой является анизотропия физико-механических свойств изделий, что сказывается на качестве и уровне эксплуатации этих изделий. Одним из решений данной проблемы может стать реализация заполнения внутренней структуры изделий слоями криволинейной формы. В работе [21], рассмотрены способы разделения цифровой модели на криволинейные слои для 3D печати, в частности на слои цилиндрической и конической формы, разработан алгоритм деления цифровой модели на криволинейные слои для 3D печати.

## 2 Материалы и методы

Построение изделий криволинейными слоями цилиндрической формы возможно производить, как на подготовленную ранее приемную поверхность, так и на поверхность, сформированную в процессе аддитивного формообразования. Следует отметить, что изменение геометрических параметров приемной поверхности может оказывать существенное влияние на геометрические параметры поперечного сечения единичных наплаваемых слоев, что необходимо учитывать при разработке алгоритмов разделения и заполнения их внутренней структуры. Поэтому актуальной задачей является установление влияния кривизны приемной поверхности на геометрические параметры единичных наплаваемых слоев при аддитивном формообразовании электрической дугой в среде защитного газа.

### 3 Результаты исследований

Для теоретического исследования влияния кривизны приемной поверхности на формируемый слой было составлено уравнение кривой, описывающей наружный участок наплаваемого слоя в виде эквидистанты (рис. 1)

$$\bar{r}_1(t, h) = \bar{r}_0(t) + \bar{n}(t) \cdot h, \quad (1)$$

где  $\bar{r}_0$  – векторное уравнение участка кривой приемной поверхности, вдоль которой происходит перемещение экструдера  $\bar{r}_0(t) = [x_0(t), y_0(t), 0, 1]^T$ , где  $t$  – параметр определяющий точку на кривой  $\bar{r}_0$ ;  $h$  – высота наплаваемого слоя;  $\bar{n}(t)$  – нормаль к кривой  $\bar{r}_0(t)$ , которую можно вычислить по формуле:

$$\bar{n}(t) = \frac{\begin{bmatrix} -\frac{\partial y_0(t)}{\partial t}, \frac{\partial x_0(t)}{\partial t}, 0, 0 \end{bmatrix}^T}{\left| \begin{bmatrix} -\frac{\partial y_0(t)}{\partial t}, \frac{\partial x_0(t)}{\partial t}, 0, 0 \end{bmatrix}^T \right|}. \quad (2)$$

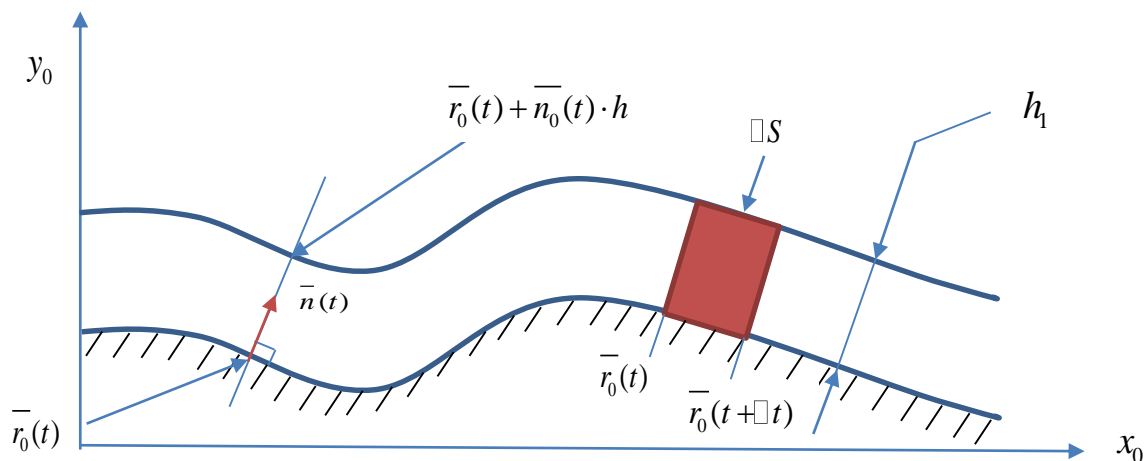


Рисунок 1 – Наплаваемый слой

Тогда, при высоте слоя, равной  $h_1$ , площадь продольного сечения наплавленного слоя при перемещении экструдера из точки  $\bar{r}_0(t)$  в точку  $\bar{r}_0(t+\Delta t)$ , где  $\Delta t$  – шаг дискретного перемещения экструдера по кривой  $\bar{r}_0(t)$  можно вычислить по формуле:

$$\Delta S = \int_0^{h_1} \int_t^{t+\Delta t} \left| \frac{\partial \bar{r}_1(t,h)}{\partial t} \right| dt dh. \quad (3)$$

Для прямолинейного участка формулу продольного сечения (3) можно представить в виде:

$$\Delta S_{II} = \Delta t \cdot h. \quad (4)$$

Если принять, что при перемещении экструдера на величину  $\Delta t$  в любой момент времени на приемную поверхность переносится одинаковое количество материала, принимая  $\Delta S = const$ , высоту наплавленного слоя ( $h_2$ ) на криволинейном участке  $\bar{r}_0(t)$  можно определить путем решения, относительно  $h_1$ , уравнения:

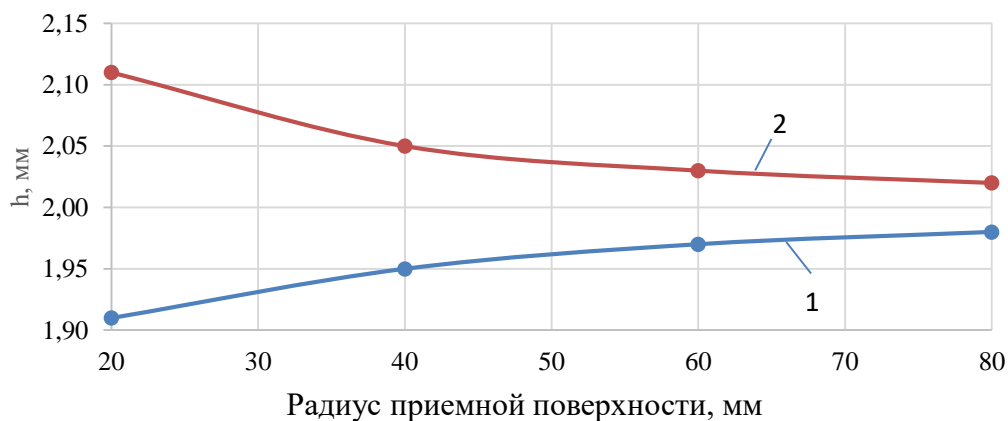
$$\Delta S = \Delta t \cdot h_1 = \int_0^{h_2} \int_{t-\Delta t/2}^{t+\Delta t/2} \left| \frac{\partial \bar{r}_1(t,h)}{\partial t} \right| dt dh. \quad (5)$$

На основании формулы (5) был проведен расчет изменения высоты наплавленного слоя на радиусных участках кривых, описанных уравнением:

$$\bar{r}_0(t) = \left[ t, \pm \sqrt{R^2 - t^2}, 0, 1 \right]^T, \quad (6)$$

где  $R$  – радиус кривизны приемной поверхности, знак «+» в формуле (6) соответствует выпуклой радиусной поверхности, а «-» вогнутой.

На основе формул (5) и (6) были выполнены вычисления с разными величинами кривизны приемной поверхности, при  $\Delta t = 0,01 \text{ мм}$  и  $h_1 = 2 \text{ мм}$ . Величина  $h_1$  — это высота единичного наплавленного слоя на плоской поверхности. Результаты вычислений представлены на графике (рис 2).



1 - Выпуклая поверхность; 2 - Вогнутая поверхность

Рисунок 2 – График зависимости высоты слоя от радиуса приемной поверхности

Из графика видно, что изменение высоты наплавляемого слоя в большей степени проявляется на вогнутых участках в диапазоне  $R$  от 20 до 60 мм. Высота может изменяться от 5,5 до 2,1 % для вогнутых кривых и от 4,6 до 1,9 % для выпуклых кривых.

Так же, в работе было выполнено экспериментальное исследование влияния радиуса кривизны приемной поверхности на изменение геометрических параметров единичного наплавляемого слоя. Эксперимент проводился на экспериментальном стенде, включающем источник питания сварочной дуги, а также мехатронную систему с возможностью управления позиционированием по пяти координатным осям (рис 3).



Рисунок 3 – Экспериментальный стенд

В качестве источника энергии для горения электрической дуги был применен сварочный полуавтомат инверторного типа модели Кедр MIG-160GDM.

За основу механизма подачи сварочной проволоки взят прижимной механизм экструдера МК8 3D принтера.

Процесс наплавления стальной проволоки производился в полуавтоматическом режиме на подготовленную приемную поверхность в среде защитного газа, закрепленную на столе стенда. В качестве материала построения использовалась стальная проволока марки Св09Г2С.

Единичные слои были наплавлены по следующей схеме:

- три образца единичного слоя на плоской поверхности;
- три образца единичного слоя на вогнутой радиусной поверхности;
- три образца единичных слоя на выпуклой радиусной поверхности.

Режимы, при которых проводилась наплавления единичного слоя представлены в (таблице 1).

Таблица 1 – Режимы наплавки единичного слоя

Защитный газ	Давление подачи газа, МПа	Скорость перемещения сварочной горелки, мм/мин	Скорость подачи проволоки, мм/мин	Напряжение на дуге, В
Смесь аргона и углекислого газа	14	200	2800	19,5

В качестве приемной выпуклой поверхности применялись образцы круглого сечения, с величиной радиуса 21,5 мм из стали, в качестве приемной вогнутой поверхности применялись образцы круглого сечения с величиной радиуса 18,5 мм. Пример наплавки единичного слоя на требуемых видах поверхностях представлен на (рис. 4).

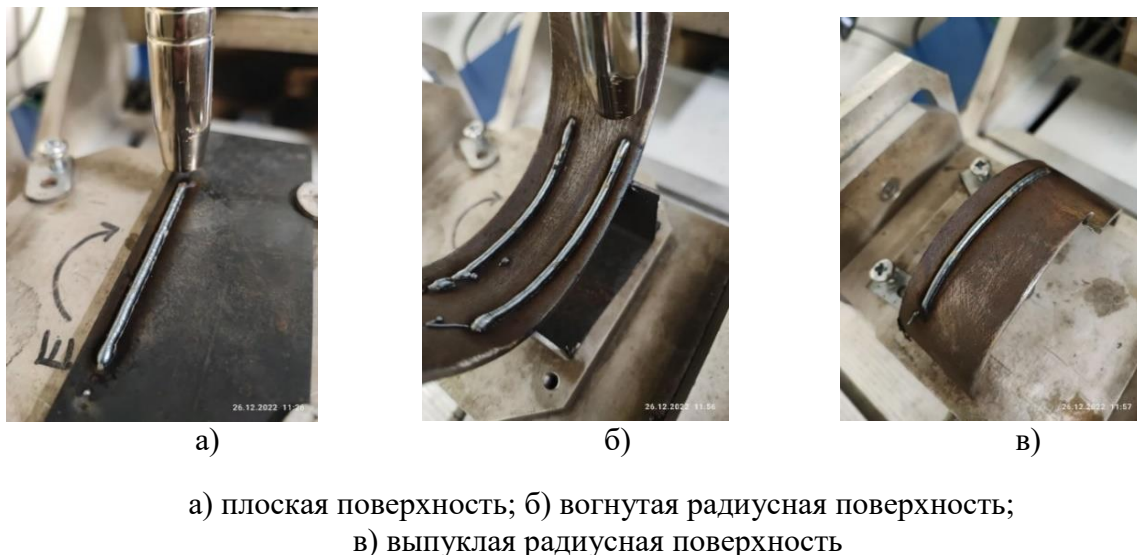


Рисунок 4 - Пример наплавки единичного слоя на разных поверхностях

После выполнения наплавки был произведен разрез заготовок (рис. 5).

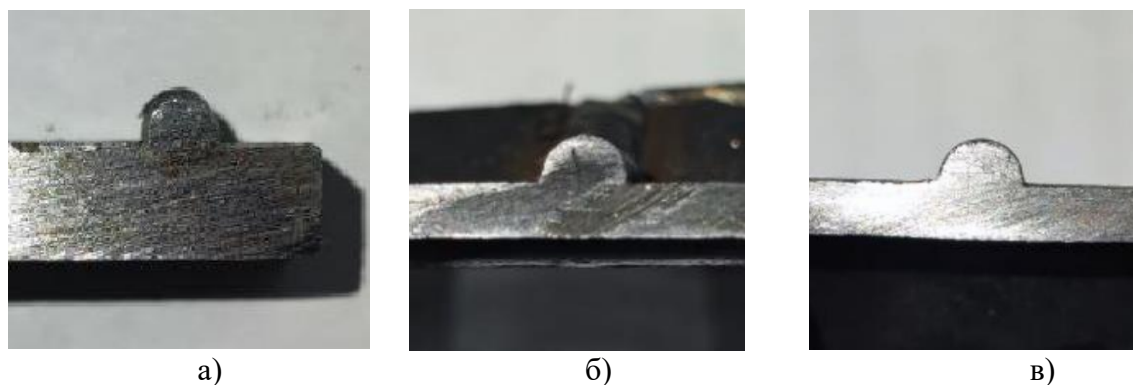


Рисунок 5 – Разрез единичного наплавляемого слоя

Далее, с помощью микроскопа малого инструментального был произведен замер сечения единичного наплавленного слоя на каждом из образцов. Результаты измерений представлены в (таблице 2).

На основе полученных результатов был проведен однофакторный дисперсионный анализ влияния кривизны принимаемой поверхности на геометрические параметры единичного наплавляемого слоя (рис. 6).

Эффект	Одномерный критерий значимости для высоты слоя				
	SS	Степени свободы	MS	F	p
Вид поверхности	0,49844	2	0,24922	81,41	0,000045
Ошибка	0,01837	6	0,00306		

а)

Эффект	Одномерный критерий значимости для ширины слоя				
	SS	Степени свободы	MS	F	p
Вид поверхности	0,64162	2	0,32081	18,219	0,002826
Ошибка	0,10565	6	0,01761		

б)

а) для высоты слоя; б) для ширины слоя

Рисунок 6 – Результаты однофакторного дисперсионного анализа

В результате проведенного анализа (см. рис. 6) установлено, что критерий значимости для высоты и ширины слоя  $p < 0,01$ . Полученные результаты свидетельствуют о том, что кривизна приемной поверхности является значимым фактором и влияет на изменение высоты и ширины единичного наплавляемого слоя.

Таблица 2 – Результаты измерения сечения валика

Вид поверхности	Ширина слоя, мм	Высота слоя, мм
Выпуклая	3,665	1,945
	3,665	1,88
	3,61	1,92
Вогнутая	3,16	2,52
	2,965	2,45
	2,975	2,45
Плоская	3,37	1,995
	2,995	2,06
	3,065	2,155

Было проведено сравнение расчета высоты единичного наплавляемого слоя с помощью формулы (5), где  $\Delta t = 0,01 \text{ мм}$  и  $h_1 = 2,07 \text{ мм}$ ,  $h_1$  – принималась равным высоте слоя наплавка которого происходила на плоской поверхности, с фактическим значением величины, полученной в результате измерения единичного наплавленного слоя. На выпуклой радиусной поверхности, при  $R = 21,5 \text{ мм}$ , высота единичного наплавляемого слоя составила 1,92 мм, а результат расчетов с помощью формулы (5) составил 1,99 мм, при этом ширина слоя составила 3,65 мм. На вогнутой радиусной поверхности, при  $R = 18,5 \text{ мм}$ , высота единичного наплавляемого слоя составила 2,47 мм, а результат расчетов составил 2,20 мм, при этом ширина слоя составила 3,03 мм. Сравнив результаты, можно увидеть, что погрешность расчетов не превышает 10%.

#### 4 Обсуждение и заключение

Выявлено, что радиус кривизны приемной поверхности значительно влияет на изменение геометрических параметров единичного наплавляемого слоя при аддитивном формообразовании электрической дугой в сфере защитного газа. Это подтвердило математическое моделирование, в результате которого была установлена математическая зависимость с помощью, которой возможно рассчитать высоту единичного наплавляемого слоя на приемной поверхности различного радиуса, а также экспериментальное исследование.

Поэтому параметр кривизны следует учитывать при разработке алгоритмов разделения и заполнения их внутренней структуры изделий криволинейными слоями цилиндрической формы.

### 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: защищена 19.11.06: утв. 13.04.07. 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. Vychkova // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Т. 11. № 24. С. 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. Nos. 1–4. P. 319–328.
- 6 Олешицкий А.В., Гаркавцева П.А., Гречухин А.Н. Создание установки для проволоочно-дугового аддитивного производства на базе фрезерного станка с чпу В сборнике: ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ: ПУТИ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ. Сборник научных статей 11-й Международной научно-практической конференции. Курск, 2022. С. 236-241.
- 7 Гречухин А.Н., Куц В.В., Щербаков П.С. Выявление влияния пространственной ориентации наплаваемых слоев, а также коэффициента их перекрытия на погрешность формы поверхности при аддитивном формообразовании электрической дугой // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 17. № 6. 2021. DOI 10.36622/VSTU.2021.17.6.017.
- 8 Гаркавцева П.А., Гречухин А.Н. Разработка устройства для аддитивного формообразования электрической дугой с повышенной точностью В сборнике: Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. Сборник научных трудов XVII Международной научно-практической конференции. Редколлегия: Разумов М.С. (отв. ред.). Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. С. 133-138.
- 9 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.
- 10 Hong S. Byun, Kwan H. Lee. Optimal part orientation of rapid prototyping using a genetic algorithm // Computers & Industrial Engineering. 2004. P. 426–431.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 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. № 1. P. 53–62.
- 14 Improving the accuracy of additive forming methods Innovation, quality and service in engineering and technology/ A.N. Grechukhin, V.V. Kuts, M.S. Razumov and others. 2018. Pp. 128-131
- 15 Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Control of spatial orientation of robot units in the process of additive forming of products Bulletin of Voronezh state technical University. 2018. 4. Pp. 122-129



16 Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Experimental determination of the cross-section parameters of a single layer in the additive forming products News of Tula state University. Technical science. 2019. 10. Pp. 264-270

17 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. Vol. 7. Pp. 128-136. DOI 10.1051/matec-conf/201822601004

18 Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Ways to reduce the error of additive methods of forming – 2018 MATEC Web of Conferences. Vol. 7. Pp.142-150. DOI 10.1051/matec-conf/201822601002

19 Grechukhin A.N., Kuts V.V., Oleshitskiy A.V. Development and Research of Technological Equipment that Implements Dynamic Control of Process of Additive Fabrication of Parts of Complex Spatial Shapes Based on Mechanisms with a Hybrid Layout. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 709(3). 033112. DOI 10.1088/1757-899X/709/3/033112

20 Investigation of the process of additive formation of fusible materials using a low-power solid-state laser/ V.V. Kuts, V.S. Merkulov, A.N. Grechukhin, A.S. Privalov// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1029(1). 012010. DOI 10.1088/1757-899X/1029/1/012010

21 Куц В.В., Гречухин А.Н., Олещицкий А.В., Привалов А.С., Щербakov П.С. АЛГОРИТМ ДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ МОДЕЛИ НА КРИВОЛИНЕЙНЫЕ СЛОИ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2021. № 5 (349). С. 39-45.

## 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. Increasing the productivity of the selective laser sintering process in the manufacture of prototypes: dis. Candidate of Technical Sciences: 05.03.01: protected 19.11.06: approved 13.04.07. Jurga: Tomsk Polytechnic University, 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. pp. 11832-11835.

4 Dobroskok V.L., Abdurayimov L.N., Chernyshov S.I. Rational orientation of elements in their layered shaping based on the initial 3d triangulation model // Scientific Notes of the Crimean Engineering Pedagogical University. 2010. No. 24. pp. 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. Nos. 1–4. P. 319–328.

6 Oleshitsky A.V., Garkavtseva P.A., Grechukhin A.N. Creation of an installation for wire-arc additive manufacturing based on a cnc milling machine In the collection: TECHNIQUE AND TECHNOLOGY: WAYS OF INNOVATIVE DEVELOPMENT. Collection of scientific articles of the 11th International Scientific and Practical Conference. Kursk, 2022. pp. 236-241.

7 Grechukhin A.N., Kutz V.V., Shcherbakov P.S. Identification of the influence of the spatial orientation of the deposited layers, as well as their overlap coefficient on the error of the surface shape during additive shaping by an electric arc //Bulletin of the Voronezh State Technical University. Vol. 17. No. 6. 2021. DOI 10.36622/VSTU.2021.17.6.017.

8 Garkavtseva P.A., Grechukhin A.N. Development of a device for additive shaping by an electric arc with increased accuracy In the collection: Modern instrumental systems, information technologies and innovations. Collection of scientific papers of the XVII International Scientific and

Practical Conference Editorial Board: Razumov M.S. (ed.). Kursk: Southwest State University, 2022. pp. 133-138.

9 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.

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

11 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.

12 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.

13 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. № 1. P. 53– 62.

14 Improving the accuracy of additive forming methods Innovation, quality and service in engineering and technology/ A.N. Grechukhin, V.V. Kuts, M.S. Razumov and others. 2018. Pp. 128-131

15 Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Control of spatial orientation of robot units in the process of additive forming of products *Bulletin of Voronezh state technical University.* 2018. 4. Pp. 122-129

16 Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Experimental determination of the cross-section parameters of a single layer in the additive forming products *News of Tula state University. Technical science.* 2019. 10. Pp. 264-270

17 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. Vol. 7. Pp. 128-136. DOI 10.1051/matec-conf/201822601004

18 Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Ways to reduce the error of additive methods of forming – 2018 *MATEC Web of Conferences.* Vol. 7. Pp.142-150. DOI 10.1051/matec-conf/201822601002

19 Grechukhin A.N., Kuts V.V., Oleshitskiy A.V. Development and Research of Technological Equipment that Implements Dynamic Control of Process of Additive Fabrication of Parts of Complex Spatial Shapes Based on Mechanisms with a Hybrid Layout. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020. 709(3). 033112. DOI 10.1088/1757-899X/709/3/033112

20 Investigation of the process of additive formation of fusible materials using a low-power solid-state laser/ V.V. Kuts, V.S. Merkulov, A.N. Grechukhin, A.S. Privalov// *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2021. 1029(1). 012010. DOI 10.1088/1757-899X/1029/1/012010

21 Kutz V.V., Grechukhin A.N., Oleshitsky A.V., Privalov A.S., Shcherbakov P.S. ALGORITHM DIVISION OF A VOLUMETRIC MODEL INTO CURVED LAYERS FOR 3D PRINTING//*Fundamental and applied problems of engineering and technology.* 2021. No. 5 (349). pp. 39-45.

© Щербаков П.С., Куц В.В., Гречухин А.Н., Олещицкий А.В., 2023