



УДК 621.9.06

2.5.6 – технология машиностроения

**НОВЫЙ ПОДХОД К АВТОМАТИЗАЦИИ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ СРЕДСТВ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ  
ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ  
ОБРАБОТКИ**

**Алешина Анастасия Эдуардовна**

ассистент кафедры графики,  
конструирования и информационных  
технологий в промышленном дизайне  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
технический университет», РФ

✉<sup>1</sup>**Кузовкин Алексей Викторович**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры графики,  
конструирования и информационных  
технологий в промышленном дизайне  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
технический университет», РФ  
e-mail: [akuzovkin@mail.ru](mailto:akuzovkin@mail.ru)

**Суворов Александр Петрович**

кандидат технических наук, доцент  
кафедры графики, конструирования и  
информационных технологий в  
промышленном дизайне ФГБОУ ВО  
«Воронежский государственный  
технический университет», РФ

**Аннотация.**

Исследование направлено на расширение технологических возможностей электрических методов обработки за счет применения систем программирования технических характеристик электродов-инструментов (ЭИ) непосредственно в цифровой модели с последующим их изготовлением аддитивными методами. В статье рассматриваются вопросы получения деталей сложной формы. Это реализовано методом предварительной 3D печати электрода-инструмента с последующей металлизацией рабочих поверхностей, что исключает финишную обработку с использованием дорогостоящего оборудования. Однако процесс проектирования такого инструмента связан со сложностью его реализации для условий

**A NEW APPROACH TO  
AUTOMATING THE DESIGN OF  
TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR  
ELECTRICAL PROCESSING  
METHODS**

**Aleshina Anastasia Eduardovna**

assistant department of graphics,  
design and information technologies  
in the industrial design of the  
FSBEI in the Voronezh State  
Technical University, RF

✉<sup>1</sup>**Kuzovkin Aleksey Viktorovich**

doctor of technical sciences,  
professor, professor of the Department  
of Graphics, Design and Information  
Technologies in the Industrial Design  
of the FSBEI in the Voronezh State  
Technical University, RF  
e-mail: [akuzovkin@mail.ru](mailto:akuzovkin@mail.ru)

**Suvorov Alexander Petrovich**

candidate of technical sciences, associate  
professor of the department of graphics,  
design and information technology in the  
industrial design of the Federal State  
Budgetary Institution “Voronezh State  
Technical University”, RF

**Annotation.**

The research is aimed at expanding the technological capabilities of electrical processing methods through the use of programming systems for the technical characteristics of electrode tools (EI) directly in a digital model with their subsequent production by additive methods. The article discusses the issues of obtaining parts of complex shape. This is realized by the method of preliminary 3D printing of the electrode-tool with subsequent metallization of the working surfaces, which excludes finishing with the use of expensive equipment. However, the process of designing such a tool is associated with the complexity of its implementation for the conditions of a single or pilot production.

единичного или опытного производства. Предложенный авторами подход к проектированию и изготовлению комбинированного ЭИ сложной формы позволяет существенно снизить его себестоимость, особенно на этапе отладки технологического процесса в условиях запуска изделия в производство.

**Ключевые слова:** СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ, АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ.

The approach proposed by the authors to the design and manufacture of a complex-shaped combined EI makes it possible to significantly reduce its cost, especially at the stage of debugging the technological process in the conditions of launching the product into production.

**Keywords:** COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS, ADDITIVE TECHNOLOGIES, ELECTRODE-TOOL, ELECTRICAL PROCESSING METHODS.

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

### 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В настоящее время в машиностроении наблюдается тенденция к постоянному усложнению формы и геометрической структуры поверхностей изготавливаемых деталей. При этом повышаются требования к точности их формообразования. Это, в первую очередь, связано с расширением функционала выпускаемых изделий и применяемых материалов. С другой стороны, постоянно совершенствуемые системы автоматизированного проектирования (САПР) предлагают конструкторам и технологам новые программные инструменты по проектированию поверхностей высокой степени кривизны. Такие поверхности не только обеспечивают эстетическую и эргономическую составляющую внешнего вида изделий, но и существенно, порой до 20 %, повышают прочностные характеристики за счет исключения мест концентрации внутренних напряжений в нагруженных конструкциях. Это приводит к появлению проблем по обработке таких поверхностей с применением традиционного механообрабатывающего оборудования. Методы формообразования поверхности с применением электрического поля (электрохимическая (ЭХО) и электроэрозионная (ЭЭО) обработки) показывают хорошие результаты по обработке криволинейных поверхностей. Однако, есть и нерешенные проблемы, которые тормозят технологическое использование электрических методов. К основным факторам, негативно влияющим на расширение области технологического использования электрических методов применительно к обработке указанных поверхностей, является то, что в силу характера процесса формирования профиля детали рабочий профиль электрода-инструмента (ЭИ) должен быть выполнен в виде точно такой же криволинейной поверхности с корректировкой на величину межэлектродного зазора. То есть, уходя от сложности обработки поверхности детали, конструкторы и технологи сталкиваются с проблемой механообработки лезвийным инструментом криволинейной поверхности ЭИ.

Для решения данной проблемы предлагается:

- формализовать и описать в виде алгоритма проектирование рабочей части ЭИ с учетом величины межэлектродного зазора (МЭЗ);
- методами САПР спроектировать толщину электрического покрытия, наносимого на диэлектрическую поверхность заготовки ЭИ, необходимую и достаточную для протекания электрических процессов при электрических методах обработки;
- подготовить алгоритм и, на его основе, управляющую программу для 3D-печати диэлектрической основы ЭИ;
- выработать технологические рекомендации по выбору режимов нанесения токопроводящего покрытия для окончательного изготовления ЭИ.

### 2 Материалы и методы

К объективным причинам усложнения формы детали в современном машинострое-

нии, как правило, относятся [1-2]:

- снижение массогабаритных параметров изделия с сохранением или увеличением их прочности, что активно применяется в авиастроении, двигателестроении, космической отрасли;
- снижение себестоимости изготовления изделия за счет применения специализированного инструмента.

В настоящее время для получения таких объектов и поверхностей, имеющих сложную форму, применяется несколько методов формообразования:

- для частичного решения этой проблемы – использование обрабатывающего оборудования, инструмент которого способен перемещаться в 2-х и 3-х координатах по командам стойки с числовым программным управлением (ЧПУ);
- использование методов литья и пластического деформирования, что оправдано в заготовительном производстве и, как правило, требует дополнительной финишной обработки.

Еще одним методом решения этих задач является применение электрических методов обработки [3-4]. Однако для этого требуется сложнопрофильный рабочий инструмент, а его поверхности нуждаются в механообработке на станках с ЧПУ. Без применения такого оборудования ЭИ может быть получен путем ЭХО или ЭЭО фасонным ЭИ с простым поступательным или вращательным движением [5].

В этом случае рабочая поверхность ЭИ должна иметь сложную геометрию. При этом она, геометрия, повторяет профиль обрабатываемой детали, но отличается на величину МЭЗ. Затраты на изготовление такого ЭИ в большинстве случаев сопоставимы и / или превышают стоимость изготовления детали с применением традиционных процессов резания. Для снижения стоимости таких ЭИ авторы предлагают методику их проектирования в САПР. При этом ЭИ изготавливают методами 3D-печати по готовым цифровым моделям из диэлектрического материала, а в дальнейшем производится металлизация рабочих поверхностей и мест подвода электрической энергии.

### 3 Результаты и их обсуждение

На примере ЭХО сформулирована задача в виде математических зависимостей для расчета геометрических размеров математически рационального профиля ЭИ (рис. 1). На рисунке 1 введены следующие обозначения: 1 – деталь; 2 – ЭИ;  $L_{дет}$  – требуемый размер детали;  $L_{ЭИ}$  – размер ЭИ;  $L_{мод}$  – размер ЭИ после 3D-печати без токопроводящего покрытия;  $h_{пок}$  – величина токопроводящего слоя;  $h_{покб}$  – величина токопроводящего слоя на боковой поверхности;  $S$  – величина МЭЗ;  $S_б$  – боковой МЭЗ.

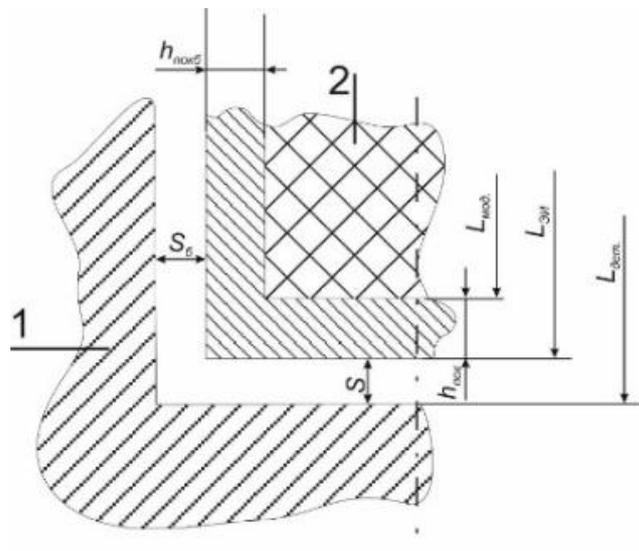


Рисунок 1 – Схема расчета геометрии ЭИ

Исходя из схемы, представленной на рисунке 1, размер ЭИ после 3D-печати без токопроводящего покрытия определяется по выражению:

$$L_{\text{мод}} = L_{\text{дет}} - S - h_{\text{пок}}, \quad (1)$$

В этой формуле  $L_{\text{дет}}$  – параметр, заданный чертежом детали. Формула для расчета МЭЗ описана в литературе [6]:

$$S = \frac{\eta \cdot \varepsilon \cdot \chi \cdot U}{\rho \cdot v_u}, \quad (2)$$

где  $\eta$  – выход по току (конкретные данные приведены в [3, 4]);  $\varepsilon$  – электрохимический эквивалент обрабатываемого материала;  $\chi$  – удельная проводимость электролита;  $U$  – рабочее напряжение на электродах;  $\rho$  – плотность материала детали;  $v_u$  – скорость подачи ЭИ для поддержания постоянства зазора ( $S = \text{const}$ ).

Величина токопроводящего слоя  $h_{\text{пок}}$  зависит от электрической мощности в зоне ЭХО. В современном оборудовании плотность тока варьируется в диапазоне 0,4 ... 1 А/мм<sup>2</sup>. Тогда величина постоянного тока  $I_m$  (по [7-9]) определяется по формуле:

$$I_m = F_o \frac{\chi(U - \Delta U)}{S}, \quad (3)$$

где  $F_o$  – площадь обрабатываемой поверхности;  $\Delta U$  – потери напряжения (по данным [10, 11] ~5В). Учитывая, что для большинства материалов и схем обработки  $U = 10 \dots 18$  В, выражение (3) принимает вид:

$$I_m = F_o \frac{0,7\chi U}{S}, \quad (4)$$

С другой стороны, сила тока связана с предельной плотностью тока  $J_{\text{пр}}$ , которая может быть передана через определенную площадь поперечного сечения электрического проводника:

$$I_m = S_{\text{покр}} \cdot J_{\text{пр}}, \quad (5)$$

где  $S_{\text{покр}}$  – площадь поперечного сечения покрытия (проводника электрического тока). Данная площадь определяется исходя из схемы на рис. 2.

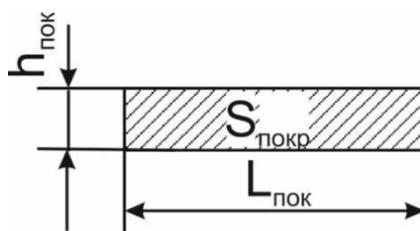


Рисунок 2 – Схема для определения  $h_{\text{пок}}$

Учитывая изложенное, преобразуем формулу (5) в выражение:

$$I_m = h_{\text{пок}} \cdot L_{\text{пок}} \cdot J_{\text{пр}}. \quad (6)$$

Линейную величину  $L_{\text{пок}}$  можно представить в виде:

$$L_{\text{пок}} = L_{\text{дет}} - S_{\text{пок}},$$

Из равенства левых частей формул (3) и (6) следует:

$$F_o \frac{\chi(U - \Delta U)}{S} = h_{\text{пок}}(L_{\text{дет}} - S_{\text{пок}})J_{\text{пр}}, \quad (7)$$

Преобразование этого выражения дает возможность связать толщину токопроводящего покрытия с технологическими и электрическими параметрами ЭХО:

$$h_{\text{пок}} = F_0 \frac{\chi(U-\Delta U)}{S \cdot J_{\text{пр}}(L_{\text{дет}}-S_{\text{пок}})} \quad (8)$$

Приведенные выражения позволяют говорить о том, что полученный с их помощью размер ЭИ для 3D-печати является функцией геометрии детали. При этом в данной цифровой модели ЭИ есть зависимость от величины МЭЗ и толщины покрытия. Также следует указать, что и МЭЗ и толщина покрытия определяются технологическими режимами обработки:

$$L_{\text{мод}} = f(L_{\text{дет}}, S, h_{\text{пок}}) \quad (9)$$

Из полученных зависимостей можно записать выражение для определения геометрии ЭИ для 3D-печати:

$$L_{\text{мод}} = L_{\text{дет}i} - S_i - F_0 \frac{\chi(U-\Delta U)}{S \cdot J_{\text{пр}}(L_{\text{дет}i}-S_i)} \quad (10)$$

Полученные выражения позволили разработать алгоритм проектирования ЭИ в САПР. Основные достоинства создания цифровой модели ЭИ на примере продукта Autodesk Inventor и встроенного инструмента Logic, позволяющего вносить изменения в модель в зависимости от технологических параметров обработки, заключаются в следующем.

Во-первых, на первом шаге алгоритма проектирования создается параметрический образ ЭИ, который обеспечивает: возможность при проектировании различных форм находиться в пределах геометрии детали; сократить время проектирования; осуществлять изменение параметров ЭИ с использованием технологии Logic.

Во-вторых, это дало возможность создать на основе технологии Logic подсистему, позволяющую инженеру-технологу: изменять модель ЭИ; выбирать режимы аддитивной технологии в зависимости изменения материала 3D-печати.

В-третьих, технология Logic позволяет управлять поведением атрибутов, элементов и компонентов модели ЭИ. Значения и правила этого поведения хранятся в файле модели ЭИ (рис. 3). Также в этих правилах содержатся пользовательские настройки, которые соотносятся с конкретными условиями проектирования [6, 12-14].

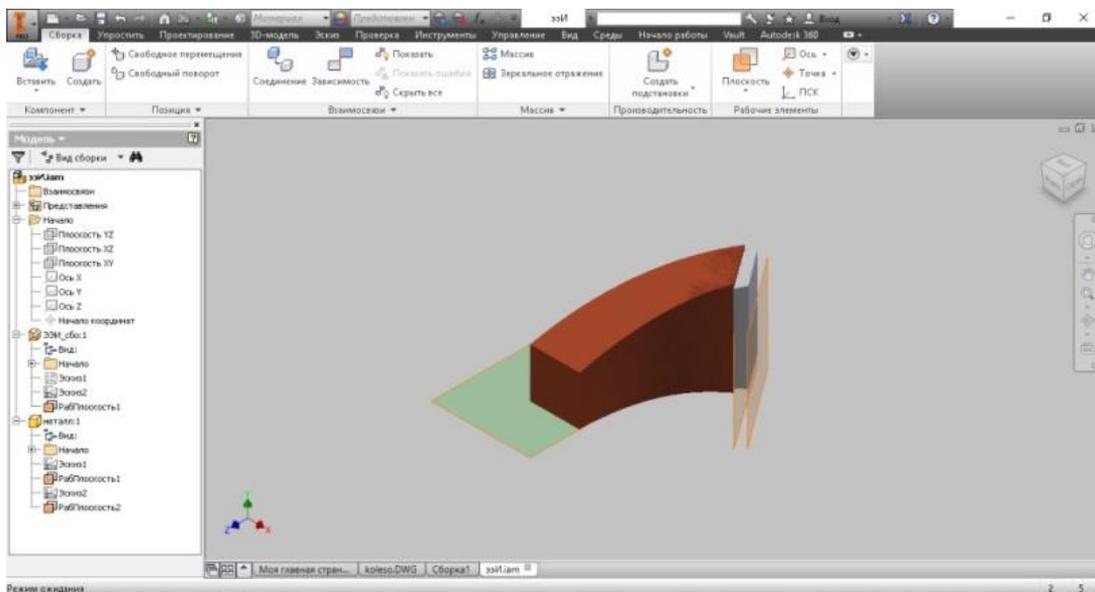


Рисунок. 3 – Цифровая модель ЭИ с применением технологии Logic

Полученная в результате проектирования цифровая модель ЭИ реализуется методами аддитивных технологий [15-17]. Рабочая поверхность и проводники тока формируются путем металлизации (толщина покрытия обеспечивает стабильность протекания процессов в МЭЗ) (рис. 4).



Рисунок 4 – Визуализация 3D печати ЭИ

Получение токопроводящего покрытия может быть реализовано как с использованием различных методов химической металлизации пластмасс, так и с применением композиционных материалов [18, 19].

На этапе экспериментальной проверки методики авторы предложили форму ЭИ, которая позволяет удалять заусенцы и скруглять кромки на сложнопрофильных участках рабочего колеса турбонасосного агрегата (рис. 5).



Рисунок 5 – ЭИ для экспериментальных исследований

#### 4 Заключение и обсуждение

Описанная авторами методика проектирования и параметризации комбинированного ЭИ позволяет существенно снизить стоимость его изготовления аддитивными методами и нанесения покрытий, что расширяет область технологического использования электрических методов обработки на получение поверхностей с высокой степенью кривизны с обеспечением заданных параметров и низкой себестоимостью процессов обработки деталей.

Приведен опыт практического применения комбинированного ЭИ в промышленном производстве при финишной обработке поверхностей с высокой степенью кривизны, показавший высокую стойкость инструмента (в пределах 10-30 минут), достаточной для их использования в условиях единичного и опытного производства. За счет снижения технико-экономических затрат на производство ЭИ появляется реальная возможность расширения области технологического применения электрических методов.

#### Список литературы

- 1 Баранчиков, В. И. Обработка специальных материалов в машиностроении: Справочник / В. И. Баранчиков, А. С. Тарапанов, Г. А. Харламов. – М. : Машиностроение, 2002. – 264 с.
- 2 Верещака, А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М. : Машиностроение, 1983. – 336 с.
- 3 Волосатов, В. А. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки. – М. : Машиностроение, 1988. – 718 с.
- 4 Смоленцев, В. П. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. – М. : Высшая школа, 1983. –Т. 1: 2 : С. 247.
- 5 Смоленцев, В. П. Изготовление инструмента непрофилированным электродом – М. : Машиностроение, 1974. – С. 163.

6 Suvorov A. P. Design combined electrode-tool for electric methods of processing by means of its parameterization of CAD / A. P. Suvorov // Инфографика и информационный дизайн : визуализация данных в науке материалы Международной научно-практической конференции. Омск, 2017. С. 148-152.

7 Azhari, A., Marzbanrad, E., Yilman, D., Toyserkani, E., & Pope, M. A. (2017). Binder-jet powder-bed additive manufacturing (3D printing) of thick graphene-based electrodes. Carbon, 119, 257-266. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.04.028>.

8 Суворов А. П., Кузовкин А. В. Использование аддитивных технологий в производстве фасонных поверхностей // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. 2017. № 2. С. 9-15.

9 Суворов А. П., Кузовкин А. В. Параметрическое проектирование электрод-инструмента для электрообработки с помощью модуля ilogic // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. – № 3. – С. 105-109.

10 Mendible, G. A., Rulander, J. A., & Johnston, S. P. (2017). Comparative study of rapid and conventional tooling for plastics injection molding. Rapid Prototyping Journal, 23(2), 344-352. <https://doi.org/10.1108/rpj-01-2016-0013>.

11 Achillas, C., Tzetzis, D., & Raimondo, M. O. (2017). Alternative production strategies based on the comparison of additive and traditional manufacturing technologies. International Journal of Production Research, 55(12), 3497-3509. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1282645>.

12 Суворов А. П., Кузовкин А. В. Перспективы использования современных информационных технологий в обработке сложных поверхностей // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. – № 1. – С. 83-87.

13 Смоленцев, В. П. Проектирование технологической оснастки для электрических методов обработки / В. П. Смоленцев, А. В. Кузовкин, М. Г. Поташников – Воронеж : ВГТУ, 2006. – С. 149.

14 Кузовкин, А. В. Технология изготовления комбинированного электрода-инструмента аддитивными методами // Кузовкин А. В., Суворов А. П., Норман А. В., Поташников М. Г. В сб. : Современные технологии производства в машиностроении. Межвузовский сборник научных трудов. Воронеж, 2021. – С. 135-142.

15 Leal, R., Barreiros, F. M., Alves, L., Romeiro, F., Vasco, J. C., Santos, M., & Marto, C. (2017). Additive manufacturing tooling for the automotive industry. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92(5-8), 1671-1676. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0239-8>.

16 Traxel, K. D., & Bandyopadhyay, A. (2019). First Demonstration of Additive Manufacturing of Cutting Tools using Directed Energy Deposition System: Stellite™-Based Cutting Tools. Additive Manufacturing, 25, 460-468. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.019>.

17 Kurra, N., Jiang, Q., Nayak, P., & Alshareef, H. N. (2019). Laser-derived graphene: A three-dimensional printed graphene electrode and its emerging applications. Nano Today, 24, 81-102. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2018.12.003>.

18 Кузовкин, А. В. Методика проектирования комбинированного электрода-инструмента с целью изготовления по аддитивной технологии // Кузовкин А. В., Суворов А. П., Норман А. В., Котуков В. И. В сб. : Современные технологии производства в машиностроении. Межвузовский сборник научных трудов. Воронеж. – 2021. – С. 129-134.

19 Шалкаускас М. И., Вашкялис А. И. Химическая металлизация пластмасс. – [б.м.] : Химия, 1985.

## References

1 Baranchikov, V. I. Processing of special materials in mechanical engineering: a Handbook / V. I. Baranchikov, A. S. Tarapanov, G. A. Kharlamov. – М. : Mashinostroenie, 2002. – 264 p.

2 Vereshchaka, A. S. Performance of cutting tools with wear-resistant coatings. – М. : Mashinostroenie, 1983. – 336 p.

3 Volosatov, V. A. Handbook of electrochemical and electrophysical processing methods. – М. : Mashinostroenie, 1988. – 718 p.

4 Smolentsev, V. P. Electrophysical and electrochemical methods of material processing [Text]. – М. : Higher school, 1983. – Т.1 : 2 : p. 247.

5 Smolentsev, V. P. Making a tool with a non-profiled electrode – М. : Mashinostroenie, 1974. – p. 163.

6 Suvorov A. P. Design combined electrode-tool for electric methods of processing by means of its parameterization of CAD / A. P. Suvorov // Infographics and information design : data visualization in science Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Omsk, 2017, pp. 148-152.

7 Azhari, A., Marzbanrad, E., Yilman, D., Toyserkani, E., & Pope, M. A. (2017). Binder-jet powder-bed additive manufacturing (3D printing) of thick graphene-based electrodes. Carbon, 119, 257-266. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.04.028>.

8 Suvorov A. P., Kuzovkin A. V. The use of additive technologies in the production of shaped surfaces // Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy. P. A. Solovyova. 2017. № 2. С. 9-15.

9 Suvorov A. P., Kuzovkin A. V. Parametric design of an electric tool for electrical machining using the ilogic module // Bulletin of the Bryansk State Technical University. 2017. – № 3. – С. 105-109.

10 Mendible, G. A., Rulander, J. A., & Johnston, S. P. (2017). Comparative study of rapid and conventional tooling for plastics injection molding. Rapid Prototyping Journal, 23(2), 344-352. <https://doi.org/10.1108/rpj-01-2016-0013>.

11 Achilles, C., Tzetzis, D., & Raimondo, M. O. (2017). Alternative production strategies based on the comparison of additive and traditional manufacturing technologies. International Journal of Production Research, 55(12), 3497-3509. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1282645>.

12 Suvorov A. P., Kuzovkin A. V. Prospects for the use of modern information technologies in the processing of complex surfaces // Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies. 2016. – № 1. – С. 83-87.

13 Smolentsev, V. P. Design of tooling for electrical processing methods / V. P Smolentsev, A. V. Kuzovkin, M. G. Potashnikov – Voronezh : VSTU, 2006. – p. 149.

14 Kuzovkin, A. V. Manufacturing technology of a combined electrode-tool by additive methods // Kuzovkin A. V., Suvorov A. P., Norman A. V., Potashnikov M. G. In : Modern production technologies in mechanical engineering. Interuniversity collection of scientific papers. Voronezh, 2021. – S. 135-142.

15 Leal, R., Barreiros, F. M., Alves, L., Romeiro, F., Vasco, J. C., Santos, M., & Marto, C. (2017). Additive manufacturing tooling for the automotive industry. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92(5-8), 1671-1676. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0239-8>.

16 Traxel, K. D., & Bandyopadhyay, A. (2019). First Demonstration of Additive Manufacturing of Cutting Tools using Directed Energy Deposition System : Stellite™-Based Cutting Tools. Additive Manufacturing, 25, 460-468. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.019>.

17 Kurra, N., Jiang, Q., Nayak, P., & Alshareef, H. N. (2019). Laser-derived graphene : A three-dimensional printed graphene electrode and its emerging applications. Nano Today, 24, 81-102. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2018.12.003>.

18 Kuzovkin, A. V. Method for designing a combined electrode-tool for the purpose of manufacturing using additive technology // Kuzovkin A. V., Suvorov A. P., Norman A. V., Kotukov V. I. In : Modern technologies production in mechanical engineering. Interuniversity collection of scientific papers. Voronezh. – 2021. – S. 129-134.

19 Shalkauskas M. I., Vashkylis A. I. Chemical metallization of plastics. – [b.m.] : Chemistry, 1985.

© Алешина А.Э., Кузовкин А.В., Суворов А.П., 2022