

DOI: 10.15593/2224-9877/2017.2.08

УДК 621.9.048.4

**А.А. Шумков, Т.Р. Абляз, А.А. Кочнева, Ю.Н. Мальцева,  
Н.А. Масленникова, В.И. Маталасова, Е.С. Попова, Т.А. Шардина**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

## **АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ ПОГРЕШНОСТИ ФОРМЫ ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**

Повышение эффективности электроэрозионной обработки (ЭЭО) – актуальная задача для ведущих предприятий машиностроительной отрасли. Основные затраты, увеличивающие себестоимость изготовления деталей по технологии ЭЭО, направлены на создание электродов-инструментов (ЭИ), особенно специфической сложной конфигурации с наличием поднутрений, радиусов перехода. Возможным решением данной задачи является развитие альтернативных методов изготовления ЭИ, а именно применение технологий быстрого прототипирования (БП) и литейного производства. Технологии БП позволяют на ранних этапах подготовки производства проанализировать конструкцию будущей детали, внести изменения, подготовить прототип сложной конфигурации мастер-модели ЭИ для литья металла в форму, снизить затраты на изготовление оснастки, приспособлений и механическую обработку. Однако процесс изготовления ЭИ с применением технологий БП и литейного производства обладает недостатками, связанными с нестабильностью размеров при переходе с одного этапа изготовления на другой. Основными причинами нестабильности размеров являются свойства используемых материалов. Накапливающаяся погрешность отклонений на протяжении всего цикла технологического процесса изготовления ЭИ, связанная с усадкой материала, приводит к потере точности конечной детали. Исходя из этого целью исследования является анализ эволюции погрешности отклонений формы ЭИ с возможностью последующего прогнозирования отклонений и введения припусков на усадку при проектировании ЭИ.

Программа эксперимента состоит из подготовки компьютерной модели, послойного построения прототипа мастер-модели ЭИ, изготовления отливки ЭИ, измерительного контроля ЭИ на всех этапах производства. Для изготовления прототипа использована SLA-технология (стереолитография), принцип которой заключается в послойном синтезировании фотополимерного материала SI500. Для предотвращения дефектов отливки смоделирована литниковая система и проведен численный анализ заливки металла в форму. По результатам численного расчета в программном комплексе ProCast проблем с проливаемостью формы не обнаружено, усадочная пористость выявлена в литниковой системе, которая не оказывает влияния на целостность отливки ЭИ. По итогам измерительного контроля выявлена погрешность отклонений. Максимальное отклонение отмечено в отливке ЭИ и составляет 7,3 % от заданного размера в компьютерной модели. В результате определена эволюция погрешностей на этапах прототипирования, изготовления восковки и литья металла в форму, что позволит спрогнозировать погрешность и предусмотреть мероприятия по повышению точности отливки ЭИ.

**Ключевые слова:** электроэрозионная обработка, быстрое прототипирование, электрод-инструмент, фотополимерный материал, послойный синтез, литниковая система, пористость, отклонение размеров, точность, полимеризация, мастер-модель, сложный профиль.

**A.A. Shumkov, T.R. Ablyaz, A.A. Kochneva, Iu.N. Mal'tseva,  
N.A. Maslennikova, V.I. Matalasova, E.S. Popova, T.A. Shardina**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **ANALYSIS OF THE EVOLUTION OF THE ERROR IN THE SHAPE OF THE ELECTRODE-TOOL WITH THE USE OF RAPID PROTOTYPING TECHNOLOGIES**

Increasing the efficiency of electroerosion processing (EDM) is an urgent task for the leading enterprises of the machine-building industry. The main costs that increase the cost of manufacturing parts using EDM technology are aimed at the creation of electrodes - instruments (EI), especially a specific complex configuration with the presence of undercuts, transition radii. A possible solution to this problem is the development of alternative methods of manufacturing EI, namely the use of rapid prototyping (RP) technologies and foundry. RP technologies allow to analyze the design of the future part, make changes, prepare a prototype of the complex configuration of the master EI model for casting the metal in the mold, reduce the costs of tooling, tools and machining in the early stages of production preparation. However, the process of manufacturing EI with the use of technologies of the RP and foundry has the disadvantages associated with the instability of the dimensions during the transition from one manufacturing stage to another. The main reasons for the instability of dimensions are the properties of the materials used. Accumulating error of deviations throughout the whole process cycle of manufacturing EI, associated with the shrinkage of the material, leads to loss of accuracy of the final part. Therefore, the purpose of the study is to analyze the evolution of the deviation error in the shape of the EI with the possibility of subsequent prediction of deviations and the introduction of allowances for shrinkage in the design of EI.

The program of the experiment consists of: preparation of the computer model, layered construction of the prototype master EI model, manufacturing of the EI casting, measuring control of the EI at all stages of production. For the prototype, SLA technology (stereolithography) is used, the principle of which is the layer-by-layer synthesis of photopolymer material SI500. To prevent casting defects, a gating system was modeled and a numerical analysis of the metal casting in the mold was carried out. Based on the results of numerical calculations in the ProCast software complex, there was no problem with spillage, shrinkage porosity was detected in the gating system, which does not affect the integrity of the EI casting. Based on the results of the measurement control, an error of deviations was detected. The maximum deviation is found in the casting of the EI and is 7.3% of the given size in the computer model. As a result, the evolution of errors at the stages of prototyping, fabrication of a wax and casting of metal into a mold is determined, which will predict the error and provide for measures to increase the accuracy of casting EI.

**Keywords:** EDM, rapid prototyping, electrode-tool, photopolymer material, layer-by-layer synthesis, gating system, porosity, dimensional deviation, accuracy, polymerization, master model, complex profile.

### **Введение**

Ведущие мировые предприятия машиностроительной отрасли, такие как компании Rolls Royce, General Electric, АО «ОДК – Пермские моторы» и др., используют технологии электроэрозионной обработки (ЭЭО) в технологических циклах производства выпускаемой продукции.

Одним из сдерживающих факторов эффективного распространения и применения ЭЭО в технологических процессах производства является ограничение возможности изготовления сложнопрофильных электродов-инструментов (ЭИ) цельной конструкции. При традиционном способе изготовления ЭИ методами механической обработки сложный профиль ЭИ формируется из нескольких частей, которые поочередно фрезеруются и доводятся до заданных параметров точности и шероховатости. При данном способе 60 % стоимости технологического процесса ЭЭО составляет изготовление ЭИ. Трудоемкость процесса и материальные затраты возрастают с увеличением сложности конструкции требуемой детали [1–5].

Альтернативным способом изготовления ЭИ и повышения экономической эффективности ЭЭО является применение методов быстрого прототипирования (БП) с последующим процессом литья металла. Технология БП позволяет изготавливать сложные по конфигурации прототипы изделий, которые используются как функциональные прототипы и мастер-модели для литейного производства. Снижение экономических затрат, изготовление ЭИ с профилем любой сложности обуславливают целесообразность применения технологий БП.

Цикл изготовления ЭИ с применением технологии БП и литейного производства сопровождается возникновением погрешностей размеров, связанных с усадочными процессами используемых материалов [6–9]. Изучение и прогнозирование отклонений с целью повышения точности воспроизведения сложнопрофильных ЭИ является актуальной задачей [10–13].

Цель работы – изучить и проанализировать эволюцию погрешности формы сложнопрофильного ЭИ, изготовленного с применением технологии БП и литейного производства.

### **Материалы и методы исследования**

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Построение компьютерной модели (CAD) модели ЭИ и литниковой системы для литья металла в гипсовую форму.
2. Построение функциональной мастер-модели по технологии БП.
3. Измерение и изучение отклонений профиля прототипа ЭИ.
4. Изготовление восковки и измерительный контроль отклонений профиля ЭИ.

5. Изготовление гипсовой формы, вытопка воска, прокалка и заливка металла с последующим измерительным контролем профиля металлической отливки ЭИ.

В качестве технологии БП для создания функционального прототипа ЭИ использована технология стереолитографии (SLA) компании Envisiontec. Суть технологии заключается в послойном синтезировании фотополимерного материала SI500. Таким образом, в поверхностном слое возникает реакция полимеризации, и материал затвердевает под действием УФ-излучения. Основное отличие от классической SLA-технологии заключается в создании маски изображения всего сечения выращиваемого прототипа. После определенного времени засветки сечения модели платформа, на которой формируются слои, опускается вниз на толщину следующего слоя, и процесс повторяется до полного выращивания прототипа. Построенный прототип ЭИ из фотополимерного материала представлен на рис. 1.

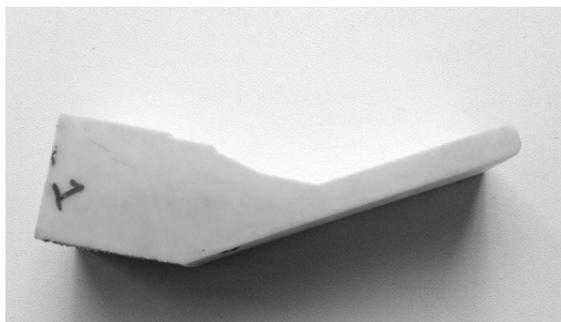


Рис. 1. Прототип ЭИ, изготовленный с применением SLA-технологии

На основе изготовленного прототипа ЭИ формируется модельный комплект из литейного воска, в который входят литейная модель ЭИ и литниково-питающая система (ЛПС). Для предотвращения возникновения дефектов на этапе заливки формы металлом предварительно смоделирована и рассчитана ЛПС. С помощью программного комплекса ProCast проведен численный анализ процесса заливки ЭИ.

В подготовленную металлическую опоку устанавливается модельный комплект и заливается формовочным материалом (гипс). После затвердевания из формы вытапливается модельный комплект и проводится прокалка до температуры 750 °С.

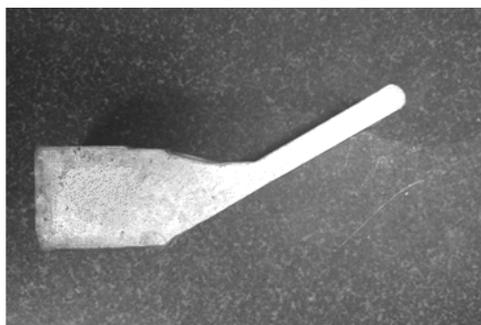


Рис. 2. Металлическая отливка ЭИ

Для плавки металла используется индукционная тигельная печь. Заливка производится в подогретую форму с температурой 450 °С). После затвердевания металла готовую отливку извлекают из формы (рис. 2). В качестве материала отливки ЭИ использован сплав латуни ЛЦ40С.

Измерение прототипа, восковки и отливки производилось на координатно-измерительной машине Contura Carl Zeiss G2 [14]. Для изучения эволюции погрешности выбраны рабочие плоскости ЭИ, участвующие в процессе ЭЭО. В качестве измерения и оценки погрешности формы ЭИ выбраны следующие контролируемые параметры:

1. Неплоскостность (плоскость 1, плоскость 2, плоскость 3).
  2. Неперпендикулярность (плоскость 1 и плоскость 3, плоскость 1 и плоскость 4).
  3. Непараллельность (плоскость 3 к плоскости 4).
  4. Расстояние между плоскостями 3.
- Обозначения измеряемых плоскостей показаны на рис. 3.

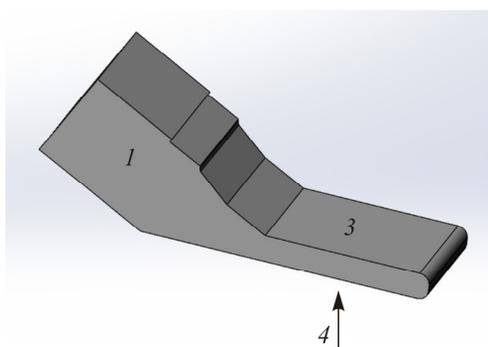


Рис. 3. Схема измерения контролируемых показателей точности на этапах изготовления ЭИ

Плоскость 2, которая находится параллельно плоскости 1, в контроле измеряемых показателей точности не участвует. В данной конфигурации ЭИ рабочими участками являются плоскости 1, 3, 4.

## Результаты исследования

Для снижения дефектов на этапе заполнения формы и при кристаллизации металла произведен численный анализ заливки в программном комплексе ProCAST. Результаты распределения температурных полей и кристаллизация металла в определенный момент времени показаны на рис. 4.

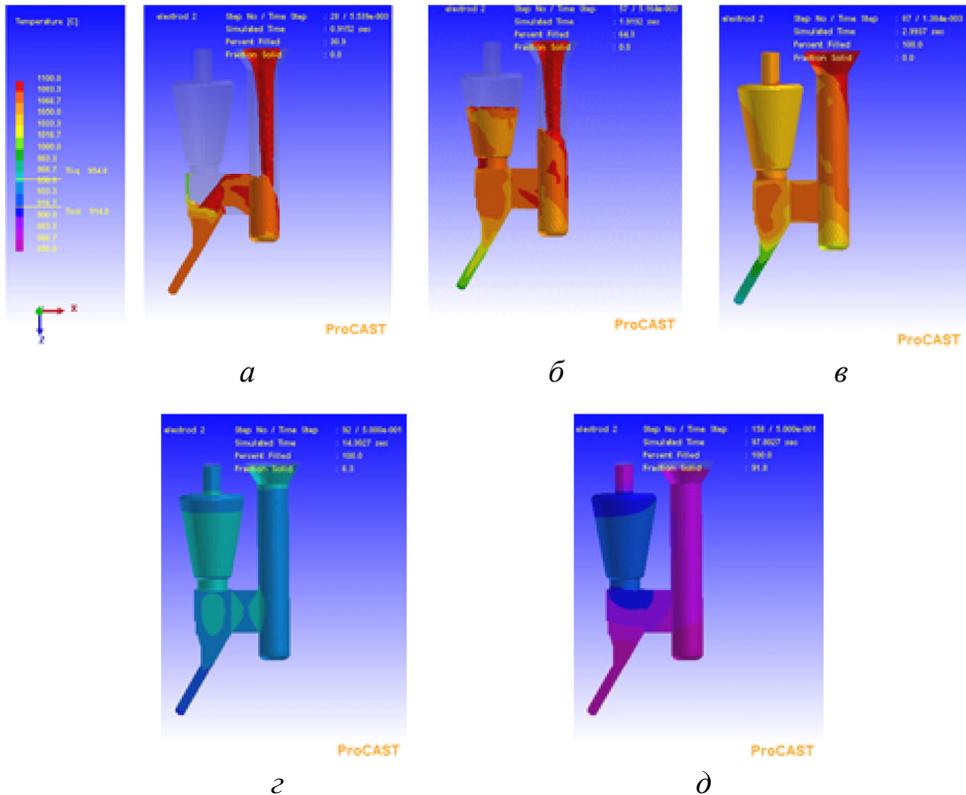


Рис. 4. Распределение температурных полей и кристаллизация металла в отливке ЭИ в момент времени: *a* – 1 с; *б* – 2 с; *в* – 3 с; *z* – 14 с; *д* – 98 с

Заполнение формы расплавами начинается снизу, металл через щелевидный питатель заполняет менее массивную часть отливки ЭИ, поднимаясь вверх к прибыли. Данный тип ЛПС способствует благоприятному удалению газа и препятствует образованию усадочных пор в теле отливки.

Распределение пор в теле отливки ЭИ представлено на рис. 5. По рис. 5 видно, что основное скопление пористости сосредоточено

в прибыли отливки и в ЛПС. Дефект не затрагивает ответственную часть отливки ЭИ, обеспечивая качество поверхности и плотность металла.

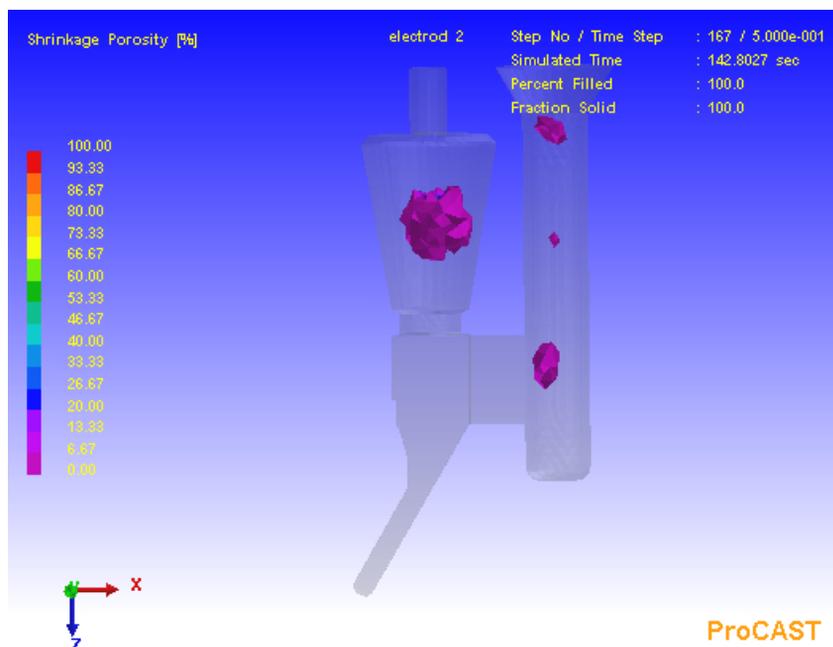


Рис. 5. Распределение пористости в теле отливки ЭИ

По результатам эксперимента по изготовлению ЭИ с использованием SLA-технологии и литья металла в форму получены отливка, прототип мастер-модели и восковка. По программе эксперимента произведены измерения и анализ геометрических параметров исследуемых объектов. Результаты измерений представлены в таблице.

При анализе результатов измерений следует отметить изменение геометрических параметров ЭИ при прохождении всех этапов технологического процесса. Уменьшение значений неплоскостности, непараллельности, перпендикулярности и расстояния между плоскостями свидетельствует об изменении свойств используемых материалов, а именно наличии усадки.

## Результаты измерений ЭИ

Измеряемые поверхности	Параметры, мм		
	Мастер-модель	Восковая модель	Металлическая отливка
Неплоскостность			
Плоскость 1	0,2319	0,1276	0,1355
Плоскость 3	0,1030	0,0996	0,0294
Плоскость 4	0,2316	0,1212	0,1038
Неперпендикулярность			
Плоскость 1 и 3	0,1582	0,3661	0,2100
Плоскость 1 и 4	0,3809	0,1408	0,2006
Непараллельность			
Плоскости 3 к 4	0,3368	0,4920	0,4714
Расстояние между плоскостями 3 и 4	7,8841	7,2956	7,1277

При моделировании ЭИ заданное расстояние между плоскостями 3 и 4 составляло 7,68 мм. При изготовлении прототипа мастер-модели по SLA-технологии отклонение от заданного размера составило 2,6 % в размере 0,2 мм. Данное отклонение удовлетворяет точности технологии, которое составляет от  $\pm 0,05$  до  $\pm 0,1$  мм на  $2,54 \text{ см}^3$ . Объем прототипа мастер-модели составляет  $53 \text{ см}^3$ .

Отклонение восковки от компьютерной модели составляет 5 %. Дополнительную усадку на восковку оказывает используемый для формы силикон. Отклонение отливки ЭИ от компьютерной модели составляет 7,3 %.

Результаты исследования показывают возможность прогнозирования эволюции отклонений от этапа моделирования компьютерной модели до конечного продукта.

Для снижения отклонений в отливке ЭИ необходимо на этапе моделирования отливки предусмотреть припуски на усадку материалов, используемых в технологическом процессе изготовления сложно-профильного ЭИ, и обеспечить использование материалов с минимальной усадкой.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-5310.2016.8.*

### **Список литературы**

1. Абляз Т.Р., Шумков А.А. Изготовление сложнопрофильных инструментов с применением технологии быстрого прототипирования // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, № 2. – С. 160–169.
2. Дорошенко В.С. Получение металлических отливок арматуры по ледяным моделям // Криотехнология. – 2012. – № 2. – С. 66–68.
3. Состояние и перспективы развития технологий быстрого прототипирования в промышленности (часть 2) / Л.А. Колесников, Г.П. Манжула, В.К. Шелег, А.М. Якимович // Наука и техника. – 2013. – № 6. – С. 25–34.
4. Гусев Д.В., Куликов М.Ю., Ларионов М.А. Погрешность формообразования тел вращения при использовании технологий быстрого прототипирования // Вестник Брянск. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 2, № 3. – С. 177–183.
5. Meshram D., Puri Y. EDM electrodes manufacturing using rapid tooling concept // International Journal of Engineering Research and Development. – 2012. – Vol. 3, iss. 4. – P. 58–70.
6. Mahdi Emami M., Barazandeh F., Yaghmaie F. Scanning-projection based stereolithography: Method and structure // Sensors and Actuators A. – 2014. – Vol. 218. – P. 116–124.
7. Mahdi Emami M., Barazandeh F., Yaghmaie F. An analytical model for scanning-projection based stereolithography // Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – Vol. 219. – P. 17–27.
8. Hyun-Wook Kang, Jeong Hun Park, Dong-Woo Cho. A pixel based solidification model for projection based stereolithography technology // Sensors and Actuators A. – 2012. – Vol. 178. – P. 223–229.
9. Limaye A., Rosen D.W. Process planning to build mask projection stereolithography parts with accurate vertical dimensions // Proceedings of the 17th Solid Freeform Fabrication Symposium. – Austin, 2007. – P. 159–173.
10. Gibson I., Rosen D.W., Stucker B. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. – New York: Springer, 2010. – 473 p.
11. Kumara S., Batra U. Surface modification of die steel materials by EDM method using tungsten powder-mixed dielectric // J. Manuf. Process. – 2012. – Vol. 14. – P. 35–40.
12. Patowari P.K., Saha P., Mishra P.K. Taguchi analysis of surface modification technique using W-Cu powder metallurgy sintered tools in EDM and characterization of the deposited layer // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2011. – Vol. 54. – P. 593–604.
13. Establishment of Process model for rapid prototyping technique (Stereolithography) to enhance the part quality by Taguchi method / B.S. Raju, U.C. Shekar, K. Venkateswarlu, D.N. Drakashayani // Procedia Technology. – 2014. – Vol. 14. – P. 380–389.

14. Шумков А.А., Абляз Т.Р. Экспериментальное определение деформаций поверхностей литьевых мастер-моделей при послойном синтезе фотополимерного материала // *Металлообработка*. – 2015. – № 3(87). – С. 54–57.

### References

1. Abliaz T.R., Shumkov A.A. Izgotovlenie slozhnoprofil'nykh instrumentov s primeneniem tekhnologii bystrogo prototipirovaniia [Production of figurine tools with use of technology of fast prototyping]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2016, vol. 18, no. 2, 160–169 pp.

2. Doroshenko V.S. Poluchenie metallicheskiikh otливok armatury po ledianym modeliam [Receiving metal castings of fittings on ice models]. *Kriotekhnologiya*, 2012, no. 2, 66–68 pp.

3. Kolesnikov L.A., Manzhula G.P., Sheleg V.K., Iakimovich A.M. Sostoianie i perspektivy razvitiia tekhnologii bystrogo prototipirovaniia v promyshlennosti (chast' 2) [State and the prospects of development of technologies of fast prototyping in the industries (part 2)]. *Nauka i tekhnika*, 2013, no. 6, 25–34 pp.

4. Gusev D.V., Kulikov M.Iu., Larionov M.A. Pogreshnost' formoobrazovaniia tel vrashcheniia pri ispol'zovanii tekhnologii bystrogo prototipirovaniia [Error of a shaping of bodies of rotation when using technologies of fast prototyping]. *Vestnik Brianskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, vol. 2, no. 3, 177–183 pp.

5. Meshram D., Puri Y. EDM electrodes manufacturing using rapid tooling concept. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2012, vol. 3, iss. 4, 58–70 pp.

6. Mahdi Emami M., Barazandeh F., Yaghmaie F. Scanning-projection based stereolithography: Method and structure. *Sensors and Actuators A*, 2014, vol. 218, 116–124 pp.

7. Mahdi Emami M., Barazandeh F., Yaghmaie F. An analytical model for scanning-projection based stereolithography. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 219, 17–27 pp.

8. Hyun-Wook Kang, Jeong Hun Park, Dong-Woo Cho. A pixel based solidification model for projection based stereolithography technology. *Sensors and Actuators A*, 2012, vol. 178, 223–229 pp.

9. Limaye A., Rosen D.W. Process planning to build mask projection stereolithography parts with accurate vertical dimensions. *Proceedings of the 17th Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin, 2007, 159–173 pp.

10. Gibson I., Rosen D.W., Stucker B. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer, 2010, 473 p.

11. Kumara S., Batra U. Surface modification of die steel materials by EDM method using tungsten powder-mixed dielectric. *Journal Manuf. Process*, 2012, vol. 14, 35–40 pp.

12. Patowari P.K., Saha P., Mishra P.K. Taguchi analysis of surface modification technique using W-Cu powder metallurgy sintered tools in EDM and characterization of the deposited layer. *International Journal Adv. Manuf. Technol.*, 2011, vol. 54, 593–604 pp.

13. Raju B.S., Shekar U.C., Venkateswarlu K., Drakashayani D.N. Establishment of Process model for rapid prototyping technique (Stereolithography) to enhance the part quality by Taguchi method. *Procedia Technology*, 2014, vol. 14, 380–389 pp.

14. Shumkov A.A., Ablyaz T.R. Eksperimental'noe opredelenie deformatsii poverkhnostei lit'evykh master-modelei pri posloinom sinteze fotopolimernogo materiala [Experimental definition of deformations of surfaces of molding master models at layer-by-layer synthesis of photopolymeric material]. *Metalloobrabotka*, 2015, no. 3(87), 54–57 pp.

Получено 31.03.2017

### **Об авторах**

**Шумков Алексей Александрович** (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: Shumkov\_89@mail.ru.

**Абляз Тимур Ризович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

**Кочнева Анастасия Андреевна** (Пермь, Россия) – магистрант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

**Мальцева Юлия Николаевна** (Пермь, Россия) – магистрант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

**Масленникова Наталья Алексеевна** (Пермь, Россия) – магистрант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

**Маталасова Вероника Игоревна** (Пермь, Россия) – магистрант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

**Попова Екатерина Сергеевна** (Пермь, Россия) – магистрант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

**Шардина Татьяна Алексеевна** (Пермь, Россия) – магистрант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

### **About the authors**

**Aleksei A. Shumkov** (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Materials, Technologies and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: Shumkov\_89@mail.ru.

**Timur R. Ablyaz** (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials, Technologies and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

**Anastasiia A. Kochneva** (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

**Iuliia N. Mal'tseva** (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

**Natal'ia A. Maslennikova** (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

**Veronika I. Matalasova** (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

**Ekaterina S. Popova** (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

**Tat'iana A. Shardina** (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.