

УДК 621.74.046 : 004

**В. А. ОЛЕЙНИК, О. Н. СИЗОНЕНКО, Г. Ф. МЯЛЬНИЦА****ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ 3D-ПРИНТЕРА PROJET460 PLUS В СЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ТОЧНОГО ЛИТЬЯ**

Рассмотрена возможность повышения технологичности процесса точного литья в серийном производстве предприятия за счет полномасштабного внедрения технологии быстрого прототипирования, на базе 3D-принтера ProJet460 Plus. Переход на изготовление керамических стержней охлаждаемых лопаток ГТД методом 3D-печати позволяет снизить количество технологических операций и сократить время, необходимое для устранения недочетов в случае их выявления при испытаниях.

**Ключевые слова:** 3D-принтер, 3D-печать, аддитивные технологии, трехмерная печать, стержни охлаждаемых лопаток.

**Введение.** В наше время в условиях жесткой международной рыночной экономики актуальными для предприятия являются сроки изготовления и стоимость газотурбинных двигателей (ГТД), как морского применения, так и газоперекачивающих станций. Возможность снизить срок изготовления и себестоимость двигателей позволит качественно выделиться на мировом рынке. Одним из механизмов достижения данных целей, несомненно, является переоснащение и модернизация оборудования на предприятии.

В настоящее время одним из перспективных направлений в области производства машиностроительной продукции являются технологии «трехмерной печати» с применением 3D-принтеров, позволяющие получить готовое изделие на основе разработанных ранее трехмерных компьютерных моделей, что позволяет полностью или частично исключить трудоемкий и длительный процесс изготовления различной оснастки [1]. Тогда становится реальной ситуация, когда для получения конечного изделия достаточно ее 3D-модели.

Развитие аддитивных технологий привело к широкому ассортименту как самих 3D-принтеров, так и методов печати. В данное время на предприятии ГП НПКГ «Зоря» – «Машпроект» работает 3D-принтер ProJet 460 Plus (далее 3D-принтер), который используется для изготовления моделей, деталей и узлов, с целью их визуализации после 3D-проектирования. Наглядность позволяет конструкторам и технологам определить технологичность изделия до внедрения в производство.

**Описание процесса.** Данный 3D-принтер работает по технологии струйной трехмерной печати. ProJet 460 Plus является профессиональным 3D-принтером, использующим струйную послойную технологию печати (CJP) и порошок на основе гипса (около 40 %) в качестве материала для построения. Он идеально подходит для быстрого изготовления полноцветных прототипов [2].

Применение специального порошкообразного вещества для создания трехмерных моделей позволяет достичь высокой детализации всех, даже имеющих сложную геометрию, элементов. 3D-принтер ProJet460 Plus имеет самую большую рабочую камеру среди прочих принтеров этой серии. Также необходимо отметить высококачественную передачу цвета и высокое разрешение. Это позволяет создавать качественные

полноцветные модели за считанные часы, либо множество небольших моделей одновременно, что практически невозможно в случае, где для создания моделей необходимо наличие поддержек.

Указанная технология была разработана в Массачусетском технологическом институте (MIT) в 1993 году. Технология получила коммерческое распространение в 1995 году с помощью компании Z Corporation, приобретенной корпорацией 3D Systems в 2012 году [3].

**Суть метода** заключается в том, что контуры модели вычерчиваются печатной головкой, наносящей связующее вещество на порошковый материал [4-8]. Таким образом, частицы каждого нового слоя после просыпки и утрямбовки склеиваются между собой и с предыдущими слоями специальным связующим веществом до образования готовой трехмерной модели. Затем происходит сушка модели в 3D-принтере и очистка от остатков порошка.

**Постановка задачи.** При внедрении 3D-принтера ProJet 460 Plus на предприятии рассматривались направления для внедрения данного оборудования в производственный технологический цикл. Были намечены следующие этапы дальнейших исследований:

- изготовление стержней охлаждаемых лопаток газотурбинных двигателей (ГТД);
- изготовление пресс-форм;
- изготовление мастер-моделей;
- изготовление различных литниковых элементов.

Основным и самым перспективным направлением применения данного 3D-принтера является изготовление керамических стержней для охлаждаемых лопаток ГТД. Материалы поставляемые с принтером не подходят для данных целей, в связи с тем, что при повышенных температурах (выше 150 °С) происходит выгорание связующего материала и изменение геометрической формы. Поэтому прорабатывается вопрос ухода от материалов, поставляемых фирмой 3D Systems и переход на материалы, используемые на предприятии.

ProJet 460 Plus работает с материалами VisiJet PXL Core – высококачественный композиционный материал на основе гипса и VisiJet PXL Binder – жидкое связующее вещество, используемое для окрашивания и склеивания слоев модельного материала. Для ухода от этих материалов рассматривались следующие аналоги. Аналогом замены гипса рассматрива-

лись порошковые материалы, в основе которых электро-корунды марок F280, F320, F800 (фирмы Enpmex), маршалит и кварц. В качестве связующего материала к ним рассматривались вещества типа Ludox-SK, гидролизный этилсиликат ЭТС-40, и связующее КП-1 по ТУ 6.02-5-38.

Были проведены теоретические и экспериментальные исследования по применению вышеупомянутых материалов для 3D-принтера ProJet 460 Plus [9-11]. Экспериментальные образцы проходили исследования по методике предприятия для керамических стержней. Полученные образцы проходили испытания на прочность, коробление, температурную стойкость при заливке металлом и выщелачивание, согласно технологического процесса предприятия.

**Результаты и обсуждение.** По результатам экспериментов был сделан вывод о возможности применения материалов используемых на предприятии для печати керамических стержней охлаждаемых лопаток. Это позволяет значительно сократить сроки изготовления стержней и частично уйти от изготовления дорогостоящей оснастки. Увеличение количества принтеров данной модели в дальнейшем позволит полностью обеспечить предприятие необходимым количеством стержней.



Рисунок 1 – Готовая пресс-форма, распечатанная на 3D-принтере

Также рассматривался вариант применения 3D-принтера ProJet 460 Plus для изготовления элементов пресс-форм в литейном производстве. Была напечатана пресс-форма для модели поворотного штуцера (см. рис. 1). После печати пресс-форма, для придания ей остаточной прочности, была пропитана составом на основе эпоксидной смолы. Затем прошла стадию доводки для придания конечной шероховатости. После этого на модельном участке модельным составом КС-5А были запрессованы штуцера (см. рис. 2). Качество изготовления (шероховатость, точность) удовлетворительное. На распечатанных вставках были проведены исследования механических свойств материала. Определены возможность механической постобработки

(фрезерование, шлифование, полировка, сверление, нарезка резьбы), и сделан вывод о возможности доработки пресс-форм.



Рисунок 2 – Готовые вставки с полученными моделями штуцеров из модельной массы, запрессованными по серийной технологии

Подтверждена возможность использования распечатанных вставок для запрессовки моделей из различных модельных составов. Что, в свою очередь, позволяет сделать вывод о возможности применения технологии 3D-печати для изготовления пресс-форм. И хотя ресурс пресс-формы, выполненной из гипса, значительно меньше, чем из металла, данная технология актуальна на стадии внедрения новых изделий. На данный момент от стадии изготовления чертежей и до получения пресс-формы из металла может пройти 6-8 месяцев. На 3D-принтере данный процесс может занять несколько недель.

Также прорабатывался вопрос о применении 3D-принтера ProJet 460 Plus для изготовления мастер-моделей, по которым в дальнейшем изготавливались отливки. Были напечатаны неохлаждаемые лопатки двигателя 3 ступени. После изготовления мастер-моделей (неохлаждаемой лопатки ГТД) и их упрочнения английской солью (epsom salt) или эпоксидной смолой, они передавались в серийное производство для изготовления оболочковых керамических форм и для последующего литья. В цехе осуществлялось изготовление форм по отработанной на предприятии технологии, за исключением воскования (окувание в расплавленный воск) моделей для обеспечения требуемой шероховатости поверхности.

Полученные на основании моделей огнеупорные керамические блоки проходили дальнейшую обработку согласно отработанного на предприятии техпроцесса, после чего осуществлялась заливка жаропрочного сплава в вакуумных печах. Полученные опытные детали проходили обработку по технологии предприятия. После проведенных работ принято решение о возможности применения данной технологии в том случае, когда есть необходимость быстро изготовить небольшую партию изделий. В частности, когда для ремонтного двигателя не нужна партия лопаток, а есть

необходимость в небольшом количестве лопаток.

Также рассматривалась возможность изготовления отдельных элементов для создания блоков при литье по выплавляемым моделям. На 3D-принтере были распечатаны геликоиды, которые применялись при создании блоков для изготовления монокристалльных лопаток методом направленной кристаллизации. После изготовления оболочковых форм и выплавления модельной массы в бойлерклаве при прокатке формы в печи по технологии цеха связующее вещество гипсовых элементов выгорало, а оставшейся порошок удалялся путем продувки формы сжатым воздухом. По данным работам был сделан вывод о возможности применения данной технологии в литейном производстве.

Данные работы целесообразно проводить, когда разработчиком выполнено проектирование 3D изделия и нет готовой оснастки, пресс-форм для изготовления деталей, которые должны проходить натурные испытания. Данная технология 3D-печати позволяет сократить время от разработки до испытаний готового изделия от 10 до 12 месяцев. И на базе проведенных испытаний сделать соответствующие выводы о применении данных деталей и о запуске их в серийное производство. В случае обнаружения недочетов в чертежах, ошибок или неудовлетворительных результатов испытаний, есть возможность в кратчайшие сроки устранить недостатки и изготовить новые опытные образцы для испытаний, с минимальными затратами не привлекая к данной работе основные цеха предприятия.

**Выводы.** Применение 3D-принтера ProJet 460 Plus в литейном производстве для изготовления стержней охлаждаемых лопаток, элементов пресс-форм, литниковых элементов и моделей для отливок позволяет:

1. Уйти от изготовления дорогостоящей оснастки, что в свою очередь позволит сократить сроки от разработки до внедрения готового изделия с 10-12 месяцев до нескольких недель. То есть сократить сроки передачи новых ГТД в серийное производство.

2. Модернизация производства за счет комплексного внедрения 3D-принтеров позволит сократить технологические процессы изготовления изделий и удешевить продукцию, выпускаемую серийным производством.

3. Для расширения сферы деятельности и обеспечения конкурентоспособности предприятия на международных рынках сбыта следует расширить ассортимент 3D-принтеров и интегрировать разработанную технологию изготовления керамических стержней в технологический процесс предприятия.

**Список литературы:** 1. Довбыши В. М. Аддитивные технологии и изделия из металла / В. М. Довбыши, П. В. Забеднов, М. А. Зеленко // Библиотека литейщика. – 2014. – № 8. – С. 40 – 52. 2. 3D Today [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://3dtoday.ru/wiki/3D\\_print\\_technology/](http://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology/) 3. Технология 3D печати Z Corporation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cybercom.ru>. 4. Довбыши В. М. Аддитивные технологии и изделия из металла / В. М. Довбыши, П. В. Забеднов, М. А. Зеленко // Библиотека литейщика. – 2014. – № 9. – С. 31-45. 5. Довбыши В. М. Аддитивные технологии и изделия из металла / В. М. Довбыши, П. В. Забеднов, М. А. Зеленко // Библиотека литейщика. – 2014. – № 11. – С. 57-69. 6. Зеленко М. А. Аддитивные технологии в опытном литейном производстве. Технологии литья металлов и пластмасс с использованием синтез-моделей и синтез-форм / М. А. Зеленко, П. В. Забеднов // Металлургия машиностроения. – 2013. – № 5. – С. 37-45. 7. Изготовление объектов с использованием ламинирования [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://3dpr.ru/izgotovlenie-obektov-s-ispolzovaniem-laminirovaniya>. 8. Технологии 3D-печати [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://q99.it/7zINk1p> 9. Иванова А. М. Физические особенности селективного лазерного спекания порошковых металл-полимерных композиций / А. М. Иванова, С. П. Котова, Н. Л. Курпиров и др. // Квантовая электроника. – 1998. – № 5. – С. 433-438. 10. Антонов Е. Н. Разработка метода поверхностного селективного лазерного спекания для формирования матриц тканей инженерных конструкций / Е. Н. Антонов, В. Н. Баграташвили, В. К. Попов, А. В. Попова, С. А. Бочкова, Л. И. Кротова, Дж. Барри, Р. Орэффо, С. М. Хоудл // 30 лет ИПЛИТ РАН. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.laser.ru/30/PSLS\\_VKP\\_new.pdf](http://www.laser.ru/30/PSLS_VKP_new.pdf) 11. Кривилев М. Д. Управление лазерным спеканием металлических порошковых смесей / М. Д. Кривилев, Е. В. Харанжевский, Г. А. Гордеев, В. Е. Анкудинов // Управление большими системами. – 2010. – Вып. 31. – С. 299-322.

**References (transliterated):** 1. Dovbyish V. M. et al. Additivnyie tehnologii i izdeliya iz metalla. Biblioteka liteyschika. No. 8. 2014. pp. 40-52. 2. 3D Today. Web. <[http://3dtoday.ru/wiki/3D\\_print\\_technology/](http://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology/)> 3. Z Corporation 3D print Technology. Web. <<http://www.cybercom.ru>> 4. Dovbyish V. M. et al. Additivnyie tehnologii i izdeliya iz metalla. Biblioteka liteyschika. No. 9. 2014. pp. 31-45. 5. Dovbyish V. M. et al. Additivnyie tehnologii i izdeliya iz metalla. Biblioteka liteyschika. No. 11. 2014. pp. 57-69. 6. Zelenko M. A., P. V. Zabednov. Additivnyie tehnologii v opytном lityemom proizvodstve. Tehnologii litya metallov i plastmass s ispolzovaniem sintez-modeley i sintez-form. Metallurgiya mashinostroyeniya. No. 5. 2013. pp. 37-45. 7. Production of objects using lamination. Web. <<http://3dpr.ru/izgotovlenie-obektov-s-ispolzovaniem-laminirovaniya>> 8. Technologies of 3D-print. Web. <<http://q99.it/7zINk1p>> 9. Ivanova A. M. et al. Fizicheskie osobennosti selektivnogo lazernogo spekaniya poroshkovyih metall-polimernyih kompozitsiy. Kvantovaya elektronika. No. 5. 1998. pp. 433-438. 10. Antonov, E. N. et al. Razrabotka metoda poverhnostnogo lazernogo spekaniya dlya formirovaniya matrits tkaney inzhenernyih konstruksiy. 30 let IPLIT RAN. Web. <[http://www.laser.ru/30/PSLS\\_VKP\\_new.pdf](http://www.laser.ru/30/PSLS_VKP_new.pdf)> 11. Krivilev M. D. et al. Upravlenie lazernym spekaniem metallicheskikh poroshkovyih smesey. Upravlenie bolshimi sistemami. Vol. 31. 2010. pp. 299-322.

Поступила (received) 06.04.2016

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Олейник Виталий Анатольевич** – инженер-технолог группы подготовки и обеспечения 3D-принтеров отдела металлургии; ГП НПКГ «Зоря» – «Машпроект», Николаев, тел.: (050) 493-41-66; e-mail: ova223@gmail.com.

**Oliinyk Vitalii Anatoliyovich** – engineer-technologist of group of preparation and maintainance of 3D-printers of metallurgy departmnet; SE GTSPC «Zorya» – «Mashproekt», Mykolaiv, tel.: (050) 493-41-66; e-mail: ova223@gmail.com.

**Сизоненко Ольга Николаевна** – ведущий научный сотрудник; доктор технических наук, профессор, Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины, г. Николаев, тел.: (066) 341-08-89; e-mail: sizonenko43@rambler.ru.

**SyzonenkoOlhaMykolayivna** – Leading Researcher; Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv, tel.: (066) 341-08-89; e-mail: sizonenko43@rambler.ru.

**Мяльница Георгий Филлипович** – главный металлург комплекса; Академик АИН Украины, кандидат технических наук, доцент, ГП НПКГ «Зоря» – «Машпроект», г. Николаев, тел.: (050)418-22-30; e-mail: bas@zorya.com.ua.

**Myalnytsya Heorhii Pylypovych** – Main Metallurgist of Complex; Academician of Ac.Eng.Sc., PhD, assistant professor, SE GTSPC «Zorya» – «Mashproekt», Mykolaiv, tel.: (050)418-22-30; e-mail: bas@zorya.com.ua.

УДК 551.594

**А. А. ПЕТКОВ**

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОРАЖЕНИЯ СТЕРЖНЯ РАЗРЯДОМ ДЛИННОЙ ИСКРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОШАГОВОЙ МОДЕЛИ

Разработана многошаговая модель для определения вероятности поражения стержневого электрода, расположенного на плоскости, в полеобразующей системе электродов «стержень – плоскость». Показано, что предложенная модель позволяет адекватно описывать вероятность поражения стержневого объекта в разрядном промежутке длиной  $H = 3 - 15$  м при соосном расположении электродов-стержней в полеобразующей системе. Близкие значения вариативного параметра  $K_s$  при моделировании наблюдаемых в экспериментах значениях вероятности поражения  $p^* = 1$  позволяют считать одинаковыми процессы, приводящие к поражению стержня вне зависимости от размеров электродной системы и параметров импульсов напряжения, применяемых при испытаниях. Материалы работы могут быть использованы для дальнейших исследований поражения длинной искрой объектов, расположенных на плоской поверхности.

**Ключевые слова:** математическая модель, вероятность поражения, доверительный интервал, разряд длинной искры.

**Введение.** В настоящее время защите от прямого поражения молнией различных объектов и, в первую очередь, электроэнергетических систем уделяется большое внимание, что отражено в ряде национальных [1, 2] и международных нормативных документах [3]. Следует отметить неоднозначность подходов к вопросам молниезащиты в различных документах. Последнее обстоятельство свидетельствует о необходимости совершенствования моделей поражения молнией объектов, на основании которых формируются требования к молниезащите.

**Анализ предварительных исследований и литературы.** Исследованиям поражения стержневого объекта разрядом длинной искры, имитирующем разряд молнии, посвящен ряд работ. Традиционно такие исследования проводятся с использованием системы электродов «стержень – плоскость» с размещением на плоскости стержня-объекта. В дальнейшем анализируются работы, содержащие результаты испытаний, при проведении которых стержень-объект располагался соосно с высоковольтным стержнем-электродом, с которого развивался разряд длинной искры.

В работе [4] приведены данные испытаний по поражению стержневого объекта в разрядном промежутке длиной 15 м. На рис. 1 (график 1) показана зависимость вероятности поражения стержня-объекта от отношения длины разрядного промежутка  $H$  к высоте

объекта стержня  $h$  (диаметр стержня-объекта равнялся  $d_s = 10$  мм).

В работе [5] приведены данные (рис. 1, график 2) по поражению стержневого объекта в разрядном промежутке длиной 5 м. При исследованиях использовались в основном импульсы напряжения положительной полярности: аperiodические импульсы 250/2500 мкс и колебательные импульсы 4000/6500 мкс.

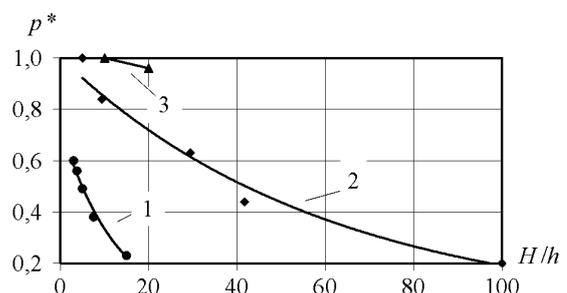


Рисунок 1 – Наблюдаемая вероятность поражения стержневого объекта в различных экспериментах

Наряду с обширными данными испытаний, результаты которых приведены в [4, 5], в литературе имеется информация по поражению стержневых объектов при ограниченном ряде значений отношения  $H/h$ .

В [6] указано, что в проведенных экспериментах