

УДК 621.01

**Толочко Н.К.**, доктор физико-математических наук, профессор;

**Романюк Н.Н.**, кандидат технических наук, доцент;

**Сокол О.В.**, старший преподаватель

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»*,

*г. Минск, Республика Беларусь*

## **АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РЕМОНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

***Аннотация.** Рассмотрены особенности применения аддитивных технологий для изготовления и восстановления деталей машин.*

Аддитивные технологии (АМ-технологии – от англ. Additive Manufacturing – аддитивное производство) или, как их еще называют, технологии 3D-печати, благодаря своим уникальным возможностям быстро создавать изделия сложных форм, получают все большее применение в ремонтном производстве для изготовления запасных деталей, а также для восстановления деталей, вышедших из строя. Изготовление деталей с помощью АМ-технологий может быть прямым и косвенным. Прямое изготовление предполагает, что готовую деталь получают непосредственно с помощью АМ-технологий. Косвенное изготовление предполагает, что сначала с помощью АМ-технологий создают формообразующую оснастку или инструменты, которые затем используют для получения деталей известными способами.

В данной статье кратко рассмотрены особенности применения разных видов АМ-технологий для изготовления и восстановления деталей машин, включая как металлические, так и пластмассовые детали.

Прямое изготовление металлических деталей. Для создания металлических деталей применяют в основном SLM-технологию (Selective Laser Melting) – разновидность АМ-технологий, основанную на селективном лазерном сплавлении металлических порошков. Эта технология позволяет создавать детали, превосходящие по своим качествам

аналогичные детали, получаемые литьем [1]. В частности, с ее помощью изготавливают лопатки газовых турбин, имеющие внутреннюю систему охлаждения сложной геометрии [2, 3].

Металлические детали также можно создавать с помощью FDM-технологии (Fused Deposition Modeling), основанной на экструзии легкоплавких металлов, например, свинца или олова (эта технология также позволяет работать с пластиками) [4]. Однако изделия из таких металлов имеют низкую прочность. В одном из вариантов FDM-технологии используют волокна из стального порошка с полимерным связующим [5]. В процессе экструзии создается деталь из металлополимерного композита. При последующей термообработке полимер удаляется, а образовавшийся пористый металлический каркас спекается.

Для создания металлических деталей также применяют один из вариантов LOM-технологии (Laminated Object Manufacturing), согласно которому для построения изделий служит тонкая алюминиевая фольга, она вырезается по контуру слой за слоем, затем слои соединяются под действием ультразвука [6].

Прямое изготовление пластмассовых деталей. Для получения разнообразных пластмассовых деталей (шестерни, валы, шкивы, заглушки, корпуса, разъемы и т.п.) используют FDM-технологии, основанную на экструзии полимеров [7]. С ее помощью можно создавать детали ответственных конструкций, например, малоразмерных газотурбинных двигателей для беспилотных летательных аппаратов (крышки и колеса компрессоров, диффузоры, корпуса камер сгорания из термостойких пластиков) [8].

Восстановление металлических деталей. Для восстановления металлических деталей используют AM-технологии, основанные на лазерной наплавке, в частности, LENS-технологии (Laser Engineered Net Shaping), согласно которой присадочный металлический порошок подается непосредственно в зону действия луча лазера [9]. Эта технология позволяет использовать одновременно два или более разных материалов (за счет подачи порошков из нескольких сопел), благодаря чему можно наносить покрытия с градиентом свойств по толщине. Так, можно формировать наружную приповерхностную часть покрытия из материала с повышенной прочностью, совмещая, таким образом, восстановление с упрочнением.

Достоинством этой технологии является возможность восстанавливать тонкостенные элементы деталей. Детали, получаемые с ее помощью, превосходят по прочностным свойствам аналогичные детали, получаемые литьем, а также сопоставимы с коваными деталями. Быстрое отверждение наплавляемого металла позволяет формировать субмикронную микроструктуру, а в случае градиентной наплавки можно получать участки наплавляемого слоя с требуемой макро-, микро- или нанозернистой структурой. Дополнительные возможности этой технологии по улучшению свойств восстанавливаемых деталей связаны с формированием наплавляемых слоев из композитных материалов. Так, в процессе наплавки в состав наносимого основного порошка можно вносить углеродные нанотрубки, фуллерены, карбид бора и другие упрочняющие добавки [9]. Типичные примеры применения LENS-технологии – восстановление корпуса подшипника из сплава Ti-6Al-4V, лабиринтного уплотнения компрессора из сплава Inconel 718, стального приводного вала и др. [10].

Для восстановления металлических деталей, наряду с LENS-технологией, применяют и другие АМ-технологии, основанные на наплавке, в частности, EBDM (Electron Beam Direct Manufacturing) и IFF (Ion Fusion Formation) [2]. Согласно EBDM-технологии изношенные поверхности деталей восстанавливают послойным наплавлением материала с помощью электронного луча, а согласно IFF-технологии – с помощью потока плазмы. В качестве исходного материала используют прутки из алюминиевых и титановых сплавов, инконеля, сталей.

Восстановление пластмассовых деталей. Обычно детали из пластмасс восстанавливают методами механического, клеевого или сварного соединения. Более эффективно использовать АМ-технологии. Например, с помощью FDM-технологии ремонтируют шестерни, ручки механизма раскладывания заднего сиденья, крышки зеркал, корпусные и другие детали автомобилей [11].

Изготовление технологической оснастки. Для получения деталей путем литья или штамповки требуется специальная формообразующая оснастка [12]. Для снижения стоимости оснастки и ускорения процесса ее создания перспективно применять АМ-технологии.

Для получения единичной литой детали из металла, сначала с помощью 3D-принтера изготавливают литейную модель детали, на которую затем наносят керамическую оболочку. В эту оболочку заливается расплав металла и формируется готовая литая деталь (при этом литейная модель выжигается или выплавляется) [12]. Выжигаемые модели получают из полистирола по SLS-технологии (Selective Laser Sintering), полиметилметакрилата по Ink-Jet-технологий или фотополимеров по SLA-технологии (Steriolithography Apparatus) [13]. Выплавленные модели получают из модельного материала на основе литейного воска с фотополимерным связующим по MJM-технологии (Multi-Jet Modeling) [13]. Также выплавляемые модели можно получать из ПВХ-пленок по одному из вариантов LOM-технологии [14].

Для получения небольшой партии литых металлических деталей с помощью 3D-принтера создают прототип детали (мастер-модель), который затем заливают силиконом. После застывания силикона образуется эластичная форма, которая разрезается на две половинки. В полученную разъемную форму заливается литейный воск, в результате чего получается литейная модель. Такую форму можно использовать многократно [12].

AM-технологии применяют для изготовления песчаных литейных форм [13]. Их получают с помощью SLS-технологии из литейного песка с полимерным связующим или с помощью Ink-Jet-технологии, когда связующее подается каплями на последовательно формируемые слои песка.

AM-технологии позволяют создавать непосредственно металлическую оснастку. Пример тому – деятельность компании InssTek (Южная Корея), которая производит пресс-формы из стали и никель-молибденовых сплавов с помощью DMD-технологии (Direct metal deposition) [15]. Пресс-формы предназначены для литья алюминиевых головки блоков цилиндров двигателя. Используя DMD-технологии, за счет варьирования состава осаждаемых металлических порошков, можно получать пресс-формы, в которых рабочая поверхность выполнена из инструментальной стали, а конформные каналы охлаждения – из меди, причем сталь плавко переходит в медь [12]. Такие пресс-формы позволяют существенно сократить время охлаждения детали при литье.

Изготовление инструмента. Копировально-прошивные электроэрозионные станки имеют ограниченные возможности изготовления сложнопрофильных электродов-инструментов (ЭИ) цельной конструкции [16]. При традиционном изготовлении их конструкцию разделяют на участки, которые изготавливают по отдельности, а затем собирают в один инструмент. Создание сложнопрофильных ЭИ упрощается благодаря применению АМ-технологий. Так, сначала с помощью SLA-технологии создается прототип ЭИ, на основе которого затем формируется модельный комплект из литейного воска. Далее по обычной литейной технологии получается отливка ЭИ [16]. Другой путь получения ЭИ – создание заготовки с помощью SLA-технологии и последующее нанесение на нее токопроводящего покрытия [17]. Также можно прямо получать ЭИ – на основе SLM-технологии [16]. АМ-технологии позволяют создавать медные ЭИ с микроэлементами на рабочей поверхности – для микроэлектроэрозионной обработки [18].

АМ-технологии также позволяют получать режущие инструменты, которые невозможно создавать по традиционным технологиям. Так, SLM-технология позволяет получать режущий инструмент, прочный снаружи и пластичный внутри [19]. Также с ее помощью можно выборочно задавать параметры определенных участков детали с последующей закалкой их поверхности, а также формировать спиральный канал для подачи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), что позволяет более эффективно охлаждать его. С помощью АМ-технологий можно воспроизводить любую по сложности форму режущего инструмента, например, создавать фрезы, имеющие режущие зубья с оптимизированным геометрией [20].

#### Список использованной литературы

1. Аддитивные технологии и аддитивное производство // [Электронный ресурс] – 2017. – Режим доступа: [http://3d.globatek.ru/world3d/additive\\_tech/](http://3d.globatek.ru/world3d/additive_tech/) – Дата доступа: 05.10.2017.
2. Аддитивные технологии в авиакосмическом и энергетическом машиностроении / Е.Ю. Степанова [и др.] // [Электронный

ресурс] – 2017. – Режим доступа: [oreluniver.ru/public/file/science/](http://oreluniver.ru/public/file/science/) – Дата доступа: 14.10.2017.

3. Закончены испытания турбины Siemens с лопатками, изготовленными с применением аддитивных технологий [Электронный ресурс] – 2017. – Режим доступа: <http://www.turbine-diesel.ru/rus/node/4479> – Дата доступа: 6.12.2017.

4. Аддитивные технологии // [Электронный ресурс] – 2017. – Режим доступа: [progress.institute/pdf/03.pdf](http://progress.institute/pdf/03.pdf) – Дата доступа: 05.10.2017.

5. 3D printer metal filament: Create 100% metal parts // [Электронный ресурс] – 2017. – Режим доступа: <http://www.makepartsfast.com/get-100-metal-parts-filament-metal-3d-printing/> – Дата доступа: 05.10.2017.

6. Аддитивные технологии 3D печати // [Электронный ресурс] – 2017. – Режим доступа: <http://mozgochiny.ru/idei-dlya-biznesa/additivnyie-tehnologii-3d-pechati/> – Дата доступа: 11.12.2017.

7. Перспективное развитие технологии 3D-печати в изготовлении пластмассовых запчастей для автомобилей // [Электронный ресурс] – 2017. – Режим доступа: <https://www.scienceforum.ru/2016/1416/16668> – Дата доступа: 07.11.2017.

8. Побелянский, А.В. Исследование возможности применения деталей из термостойких пластиков и их испытание в составе малоразмерного газотурбинного двигателя / А. В. Побелянский [и др.] // Исследования наукограда. – 2017. – Том. 1. – №2. – С. 76-81.

9. 3D-принтер и металл – настоящее и будущее трехмерной печати металлом // [Электронный ресурс] – 2014. – Режим доступа: <http://3dtoday.ru/industry/a-3d-printer-and-metal-present-and-future-three-dimensional-printing-metal.html> – Дата доступа: 05.10.2017.

10. Татоян, Г.А. Обзор международного опыта в области применения аддитивных технологий / Г.А. Татоян, С.И. Ультан // Современный вектор: мировая экономика, менеджмент и маркетинг: сб. тр. междунар. научно-практ. форума (Омск, 27-29 апр. 2016 г.) – Омск : Изд-во Ом. гос. ун-та, 2016. С. 134-142.

11. Сферы применения 3D-печати // [Электронный ресурс] – 2017. – Режим доступа: <http://allbriarey.com/3D/3D-print-application.html> – Дата доступа: 05.10.2017.

12. Колесников, Л.А. Состояние и перспективы развития технологий быстрого прототипирования в промышленности (Часть 2) / Л.А. Колесников // Наука и техника. – 2013. – № 6. – С. 8-16.

13. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. – 220 с.

14. Баурова, Н.И. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учеб. пособие / Н.И. Баурова, В.А. Зорин. – М.: МАДИ, 2016. – 264 с.

15. Аддитивные технологии 3D-печати и 3D-сканирование // [Электронный ресурс] – 2017. – Режим доступа: <http://www.dipaul.ru> – Дата доступа: 05.10.2017.

16. Абляз, Т.Р. Изготовление сложнопрофильных электродов-инструментов с применением технологии быстрого прототипирования / Т.Р. Абляз, А.А. Шумков // Вестник Перм. нац. исслед. политех. ун-та. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18. – № 2. – С. 160-169.

17. Норошьян, М.В. Изготовление технологической оснастки для электроэрозионной и электрохимической обработки методом быстрого прототипирования / М.В. Норошьян // Гагаринские чтения – 2016: XLII Междунар. молодёж. науч. конф.: Сб. тез. докл.: Т. 1: М.: Моск. авиацион. ин-т, 2016. – С. 32-33.

18. Кувшинов, К.В. Технология создания электродов-инструментов для микроэлектроэрозионной обработки. Автореф. дис. ...канд. тех. наук: 05.02.07. – Тула, 2012. – 16 с.

19. Ковалев, В.Д. Промышленности – аддитивные технологии / В.Д. Ковалев, Я.В. Васильченко, Б.Г. Тристан // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2015. – №5. – С. 20-21.

20. Степанова, Е.Ю. Аддитивные и гибридные технологии в производстве инструмента и технологической оснастки: состояние, экономика, перспективы / Е.Ю. Степанова, М.А. Бурнашов, Ю.С. Степанов // Изв. Тульск. гос. ун-та. Тех. науки. – 2017. – №8. – Ч. 1. – С. 141-143.

**Abstract.** Features of application of additive technologies for manufacturing and renovation of machine components are considered.