

«Arduino» через встроенный в плату USB-UART преобразователь. В качестве привода, вращающего резьбовую шпильку, нами был использован шаговый электродвигатель 42BYGHW208 форм-фактора NEMA17 с разрешением 200 шагов на оборот (рисунок 5).



Рисунок 4 – Плата контроллера Arduino UNO R3 (FZ0038)



Рисунок 5 – Шаговый двигатель 42BYGHW208

Для управления шаговым электродвигателем была задействована микросхема-драйвер A4988 (рисунок 6), выпускаемая «Allegro microsystems». Подключение драйвера к «Arduino» осуществлялось посредством платы расширения «CNC Shield V3» (рисунок 7), позволяющей подсоединять к комплексу управления до 4 двигателей. Источником питания для двигателей служил стандартный компьютерный блок питания, рассчитанный на мощность до 300 Вт.



Рисунок 6 – Мотор-драйвер шагового двигателя A4988 (EC141225)

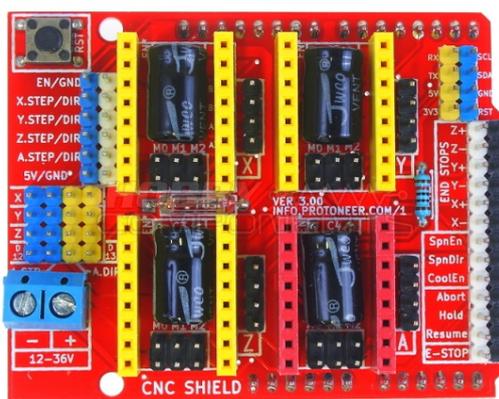


Рисунок 7 – ЧПУ shield V3 (13233112)

Управление трансляцией системы осуществлялось с использованием традиционных для станков с числовым программным управлением G-кодов, передаваемых через USB-UART преобразователь на «Arduino». Для интерпретации G-кодов на «Arduino» был загружен программный пакет GRBL. В процессе конфигурирования системы G-коды отправлялись на плату вручную при помощи G-code sender.

Построенная нами система позволила достичь точности перемещений вдоль рельса до 0,25 мм, при этом процесс перемещения каретки может быть программно совмещен с другими экспериментальными операциями.

УДК 621.762

## УНИКАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ПРИБОРОВ

Савич В.В.

*Институт порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси  
Минск, Республика Беларусь*

Металлургические аддитивные технологии (далее - АТ) с начала 2010-х годов успешно вошли в производство аэрокосмической и медицинской техники [1] для получения малых серий деталей сложной формы из титановых, жаростойких и

алюминиевых сплавов. По мере освоения производства и применения таких деталей выявлялись как недостатки, так и достоинства АТ. К первым относятся: высокие требования к узкому грансоставу исходных порошков (как правило,

10–30 мкм) и к их сферичности [2], следствием чего является высокая цена порошков металлов и сплавов для АТ; для тонкостенных изделий необходимо выстраивать поддержки, которые затем надо удалять; необходимо в любом случае отделять построенную деталь от технологического поддона; габариты изделий ограничены размерами рабочей зоны используемой установки (на сегодняшний день для подавляющего большинства не более 500-800 мм), поскольку построение ведется в атмосфере аргона либо вакуума; для приемлемой механической прочности, в первую очередь – усталостной, полученные АТ детали необходимо подвергать дополнительной обработке температурой и давлением – ГИП (горячему изостатическому прессованию). В то же время возможности АТ дают конструктору простор для фантазий и инструмент для реализации ранее неисполнимого. Целью данной работы является анализ тенденций в конструировании эффективных оптимальных конструкций деталей для их последующего производства современными методами АТ.

Все АТ используют компьютерные модели деталей, что уже на ранней стадии проектирования позволяет оптимизировать конструкцию и избежать грубых ошибок при их построении. В то же время АТ, в сочетании с многочисленными современными пакетами ПО, позволяющими эффективно вести расчеты прочности деталей машин и приборов, дают конструктору возможность удалять «лишний» металл из ненагруженных зон и строить оптимальные конструкции по методу, получившему в АТ название «био-дизайн» [3–5].

Компания Airbus в сотрудничестве с дочерней фирмой The Living компании Autodesk приступила к производству АТ самого крупногабаритного элемента конструкции самолета на сегодняшний день (рисунок 1) [5]. Это переборка, отделяющая пассажирский салон от служебного отсека на авиалайнерах Airbus A320. Переборка является несущим элементом для установки откидных кресел бортпроводников, что требует высокой прочности и, как результат, обуславливает ее высокий вес. Переборка, полученная АТ из титанового сплава, на 45 % легче существующих аналогов, сохраняя при этом необходимую прочность. Переборка имеет бионическую структуру, позволяющую снизить вес на 45 % или порядка 30 кг.

Успешное применение био-дизайна в авиации привело его вместе с АТ и на землю. Компания Altair разработала футуристическую модель рамы легкого мотоцикла по данному принципу (рисунок 2) [6].

АТ дают возможность строить и другие облегченные крупногабаритные конструкции, более близкие к традиционным, сборным из отдельных деталей, но цельные (рисунок 3) [7].



Рисунок 1 – Био-дизайн конструкции переборки лайнера Airbus A320 [5], полученной АТ из титанового сплава



Рисунок 2 – Био-дизайн рамы легкого мотоцикла, полученной АТ из титанового сплава [6]

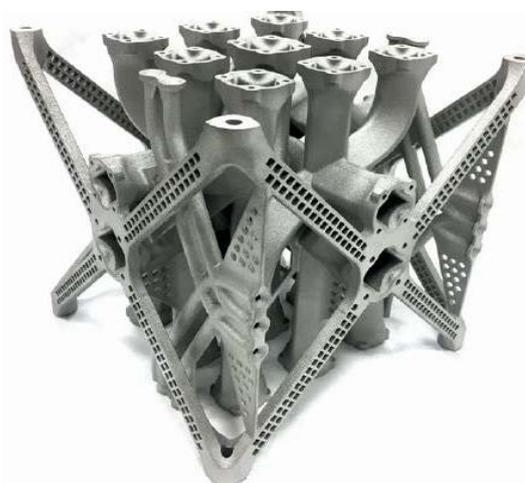


Рисунок 3 – Облегченная цельная опора [7], полученная АТ из алюминиевого сплава

Как видно из рисунка 3, изготовление данной конструкции традиционными методами в принципе невозможно, а подобный аналог состоял бы из множества отдельных деталей, соединяемых сваркой либо винтовыми соединениями, метизами и т.п.

Еще одно важное и полезное преимущество АТ – возможность формировать каналы

охлаждения любой формы и сечения на поверхности детали (рисунок 4) [8] или в ее теле (рисунок 5) [9].



Рисунок 4 – Сопло и камера сгорания малогабаритного ЖРД, полученная АТ из жаропрочного сплава Inconel 718 с каналами охлаждения жидким топливом на поверхности сопла и камеры сгорания [8]



Рисунок 5 – Лопатка стационарного ТРД, полученная АТ из жаропрочного сплава Inconel 725 с каналами воздушного охлаждения в теле лопатки [8]

Характеристики созданного канадской компанией Burloak Technologies, Inc. ЖРД (рисунок 4) неизвестны, но явно выше, чем у традиционной конструкции. Германская компания Сименс уверенно заявляет, что за счет оптимизации формы и сечения каналов воздушного охлаждения лопатки стационарной газовой турбины Siemens SGT-400 мощностью 13 МВт удалось повысить скорость вращения до 13000 оборотов в минуту и поднять рабочую температуру до 1250 °С [8], что ранее было невозможно с лопатками из даже монокристаллического жаропрочного сплава.

Безусловно, такие возможности АТ не остались без внимания и конструкторами теплообменных устройств, которые успешно создают сложные

трехмерные и плотноупакованные энергоэффективные цельные конструкции. Так специалистами британской фирмы 3T RPD Ltd спроектирован и изготовлен прототип спирального высокотемпературного теплообменника (рисунок 6) [7] из жаропрочного сплава.



Рисунок 6 – Спиральный теплообменник [7], полученный АТ из жаропрочного сплава

Не менее интересна конструкция интеркуллера опытного двигателя спортивного автомобиля, полученная АТ в Swansea University (Великобритания) совместно с фирмой Renishaw (Великобритания) (рисунок 7) [10]. Конструкция успешно прошла испытания в ходе гонок.



Рисунок 7 – Интеркуллер двигателя спортивного автомобиля [7], полученный АТ из алюминиевого сплава

Как видно из изложенного выше, АТ позволяют вырабатывать сложные трехмерные и крупногабаритные металлические конструкции, обладающие не только уникальным специфическим дизайном, недостижимым традиционными технологиями, но и получать цельные конструкции, заменяющие сборочные единицы, состоящие из десятков и даже сотен отдельных деталей, соединяемых сваркой, пайкой или с помощью метизов.

Наиболее ярко это удалось продемонстрировать французской фирме Renault Trucks [11]. Оригинальный четырехцилиндровый дизельный двигатель Рено DT-15 Euro 6 - состоит из **841 детали** (рисунок 8).

Новая конструкция двигателя состоит из менее чем **200 деталей** (рисунок 9), причем масса уменьшена на 120 кг – более, чем на 25% по сравнению с оригиналом.



Рисунок 8 – Оригинальный четырехцилиндровый дизельный двигатель Рено DT-15 Euro 6 [11]

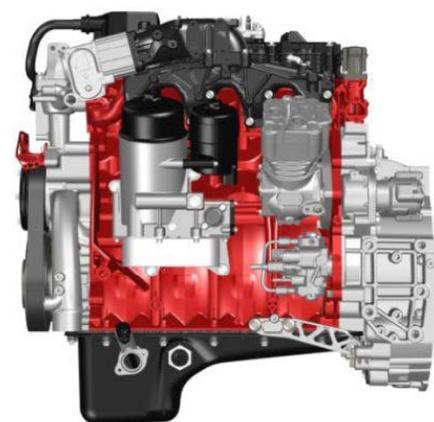


Рисунок 9 – Четырехцилиндровый дизельный двигатель Рено DT-15 Euro 6, произведенный с помощью АТ [11]

Прототип двигателя, произведенный с помощью АТ, прошел успешные стендовые 600-часовые испытания. Следует отметить другое техническое решение группы АТ компании Renault Trucks – рычаг привода клапана (рис.10), который уже внедрен в производство [11].

Как хорошо видно из рисунка 10, ажурная конструкция АТ-рычага выстроена по зонам сосредоточения максимальных напряжений и имеет массу в разы меньше традиционной.

До недавнего времени в металлургических АТ считалось возможным одномоментное построение заготовки только из порошка одной марки и состава [1-11]. Заслуживают внимания в этом плане результаты, изложенные в работе [12], в которой показаны перспективы и техническая возможность построения полиметаллических изделий, изготовленных с использованием АТ с дискретным, либо плавным (градиентным) изменением состава, структуры и свойств материалов. На рисунке 11 представлен общий вид «слоеной» демонстрационной детали, построенной из порошков меди и серебра [12].



Рисунок 10 – Стальной рычаг привода клапанов дизельного двигателя Рено DT-15 Euro 6, произведенный с помощью АТ (на переднем плане) в сравнении с традиционной конструкцией (на заднем плане) [11]

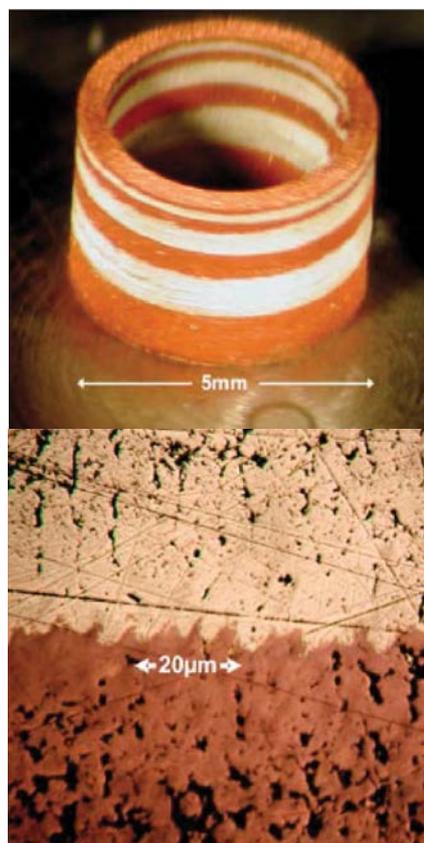


Рисунок 11 – Модельная деталь, полученная АТ из порошков серебра и меди (вверху), и граница раздела между слоями различных металлов (внизу) [11]

Следует отметить, что специалистами NASA уже получен прототип электродвигателя, статор которого получен АТ из слоев диэлектрика и проводника и (или) из слоев магнитомягких и магнитожестких ферритов [12]. Преимуществом такой нетривиальной конструкции является высокая плотность упаковки, малые потери,

хороший теплоотвод и высокая удельная мощность.

В заключении следует отметить некоторые уникальные возможности металлургических АТ, недоступные иным традиционным технологиям:

- рациональная равнопрочная облегченная конструкция детали;
- формирование каналов эффективного охлаждения (нагрева) с минимальным гидравлическим сопротивлением в теле детали или на ее поверхности;
- построение трехмерных крупногабаритных конструкций, заменяющих сборочные единицы, состоящие из десятков отдельных деталей;
- построение полиметаллических изделий, изготовленных с дискретным, либо плавным (градиентным) изменением состава, структуры и свойств материалов.

#### Литература

1. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 с.
2. Порошковая металлургия – одна из первых аддитивных технологий / Ильющенко А.Ф., Савич В.В. // Аддитивные технологии, материалы и конструкции: Материалы науч.-тех. конф. (Гродно, 5-6 октября 2016 г.) / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А.И. Свириденко (гл. ред.) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2016. – С. 20–30.
3. High-strength porous biomaterials for bone replacement: A strategy to assess the interplay between cell morphology, mechanical properties, bone ingrowth and manufacturing constraints / Sajad Arabnejad, R. Burnett Johnston, Jenny Ann Pura, Baljinder Singh, Michael Tanzer, Damiano Pasini // Acta Biomaterialia 30 (2016) 345–356.
4. Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing – Innovation Roadmapping of Required Advancements / J.Gausemeier; N.Echterhoff, M.Wall // Heinz Nixdorf Institute,

- University of Paderborn. – Paderborn, 2013. – 106 p.
5. Аддитивные технологии в ПАО «ОАК». Департамент развития индустриальной модели. – Москва, 5 апреля 2016 года // [http://www.ndexpo.ru/mediafiles/u/files/materials\\_2016/3/3Boguslavskij.pdf](http://www.ndexpo.ru/mediafiles/u/files/materials_2016/3/3Boguslavskij.pdf).
6. Design the difference // <http://www.altair.com/design4am>.
7. Cost and practicality of in-process monitoring for metal Additive Manufacturing / Ch.Hole // Metal Additive Manufacturing. – 2016. – Vol. 2, No. 4. – P. 63-69.
8. DMLS Additive Metal Manufacturing / <http://burloaktech.com/additive-manufacturing/additive-metal-manufacturing>.
9. Siemens Achieves Breakthrough with 3D Printed Gas Turbine Blades // <https://www.3dprintingbusiness.directory/news/siemens-achieves-breakthrough-3d-printed-gas-turbine-blades/>.
10. Renishaw: Global Solutions Centres offer end-users an alternative route to develop new metal AM applications / R.Weston // Metal Additive Manufacturing. – 2016. – Vol. 2., No. 1. – P. 59-65.
11. Metal 3D printing: technology of the future for lighter and more compact engines / Press releases, 11.01.2017 // <http://corporate.renault-trucks.com/en/press-releases/2017-01-11-metal-3d-printing-technology-of-the-future-for-lighter-and-more-compact-engines.html>.
12. Изготовление полиметаллических деталей с помощью лазерных аддитивных технологий / Е. Раевский // Аддитивные технологии. – № 2. – 2017. – С.32-35.
13. Nano-Magnets and Additive Manufacturing for Electric Motors / Ajay Misra NASA Glenn Research Center // 8th Annual CAFE Electric Aircraft Symposium April 25, 26, 2014, Santa Rosa, California // <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20140010481.pdf>.
14. Аддитивное производство металлических изделий (обзор) / В.В. Жуков, Г.М. Григоренко, В.А. Шаповалов // Автоматическая сварка. – 2016. – №5–6 (753). – С. 148-153.

УДК 621.382

### ВЛИЯНИЕ ВИДА ОСНОВНОЙ ЛЕГИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ В КРЕМНИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДИФфуЗИИ ИТТЕРБИЯ

Бринкевич Д.И.<sup>1</sup>, Оджаяев В.Б.<sup>1</sup>, Просолович В.С.<sup>1</sup>, Янковский Ю.Н.<sup>1</sup>, Черный В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Получение более качественных кремниевых подложек для формирования компонентов полупроводниковой микроэлектроники возможно с помощью ионной имплантации редкоземельных элементов (РЗЭ). При легировании Si лантаноидами происходит формирование стоков для фоновых технологических примесей и

радиационных дефектов, благодаря высокой геттерирующей способности РЗЭ как в расплаве кремния, так и в твердой фазе [1, 2].

Целью работы являлось исследование влияния постимплантационной термообработки на поведение примесей редкоземельных элементов,