

УДК 623.85

**В.С. Котов<sup>1</sup>, А.В. Панкратов<sup>1</sup>, Р.К. Резникова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Военный институт (военно-морской политехнический)  
Военного учебно-научного центра Военно-Морского Флота  
«Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова»  
Санкт-Петербург, Пушкин, 196604;*

<sup>2</sup>*Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота  
«Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова»,  
Санкт-Петербург, 197045  
e-mail: legkieshagi@yandex.ru*

## **РЕАЛИЗАЦИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ТЕХНИЧЕСКОМ ОБСЛУЖИВАНИИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

В данной статье предложено решение проблемы импортозамещения при выполнении ремонтных работ, связанных с техническим обслуживанием энергетических установок кораблей и судов, применением аддитивных технологий. Проведен сравнительный анализ технологий 3D-печати с использованием металлических порошков, выявлены их отличия и особенности применения в нестационарных условиях, определены основные преимущества и недостатки. Обобщены условия, необходимые для проведения ремонта с применением данных технологий. Авторами определены наиболее оптимальные технологии 3D-печати с точки зрения практической реализации для выполнения ремонтных работ и технического обслуживания энергетических установок кораблей и судов. Приведены примеры использования ремонта с помощью аддитивных технологий. Предложен алгоритм использования аддитивных технологий по устранению неисправностей, возникающих при эксплуатации энергетических установок надводных кораблей. Материал содержит таблицы, справки, статистические данные.

**Ключевые слова:** судоремонт, аддитивные технологии, газотурбинный двигатель, ремонтпригодность, 3D-печать, прямое лазерное выращивание.

**V.S. Kotov<sup>1</sup>, A.V. Pankratov<sup>1</sup>, R.K. Reznikova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Military Institute (Military-Moral Polytechnic)  
Military Training and Scientific Center of the Navy  
“Naval Academy named after Admiral of the Soviet Union N. Kuznetsov”;  
St. Petersburg, Pushkin, 196604;*

<sup>2</sup>*The military educational and scientific center of the Navy;  
“Naval Academy named after the Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov”  
St. Petersburg, 197045  
e-mail: legkieshagi@yandex.ru*

## **THE IMPLEMENTATION OF THE CAPABILITIES OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE MAINTENANCE OF GAS TURBINE ENGINES**

This article proposes a solution to the problem of import substitution during the repair work related to the maintenance of power plants of ships using additive technologies. Comparative analysis of 3D printing technologies with using metal powders, their differences and features of application under non-stationary conditions, the main advantages and disadvantages are determined. The conditions necessary for repairs using these technologies are summarized. The authors determined the most optimal 3D printing technology from the point of view of practical implementation for repair work and maintenance of power plants of ships and vessels. Examples of the use of repairs with the help of additive technologies are given. An algorithm for using additive technologies to eliminate malfunctions arising from the operation of power plants of surface ships is proposed. The material contains tables, references, statistics.

**Key words:** ship repair, additive technologies, gas turbine engine, maintainability, 3D printing, direct laser growing.

На современном этапе процесса реформирования и перевооружения Вооруженных Сил России вопросы поиска способов импортозамещения производственных ресурсов особенно актуальны.

Командование Военно-Морского Флота РФ обращает внимание на поддержание технической готовности кораблей, находящихся и поступающих в состав ВМФ.

Решение задач импортозамещения в судостроительной и судоремонтной промышленности вызывает ряд сложностей, что зачастую приводит к изменению сроков строительства и ремонта кораблей. Однако, несмотря на тенденцию широкого импортозамещения энергетических установок надводных кораблей ВМФ России, значительная часть надводных кораблей ВМФ до сих пор обладает энергетическими установками иностранного производства.

Возникает необходимость рассмотрения вопроса ремонтпригодности таких установок при проведении анализа их использования. Более чем на шестидесяти кораблях военно-морского флота в эксплуатации находятся двигатели производства «Зоря»-«Машпроект». Поэтому «ремонтпригодность» является одним из основных критериев надежности этих изделий.

Аварийность ЭУ на море в настоящее время остается достаточно высокой и существенно не снижается. В большинстве случаев аварии и аварийные происшествия характеризуются комбинацией отказов оборудования и других событий, возникающих из-за ошибок человека, в том числе нарушений персоналом требований руководящих документов по технической эксплуатации, нерасчетных внешних воздействий. Повреждения (отказы) элементов энергетической установки составляют более 30% от всех видов аварий. Статистические данные по авариям зарубежных кораблей подтверждают этот факт.

Также неоднократно фиксировались и крупные морские происшествия с кораблями военно-морского флота при удалении их от основного места базирования с потерей хода, вплоть до нескольких суток включительно.

Вышеизложенное подчеркивает необходимость новых вариантов краткосрочного ремонта элементов энергетических установок.

Основная проблема краткосрочных ремонтов – это восстановление оригинальных деталей изделий, снятых с производства либо производящихся за пределами Российской Федерации после распада Советского Союза. В этом случае наиболее технологически сложным является процесс возобновления производства деталей, получаемых литьем. Возобновление литейного производства широкой номенклатуры деталей в единичном объеме для ремонтных предприятий невыгодно.

Одно из перспективных направлений решения этих вопросов – внедрение аддитивных технологий в ремонтное производство в комплексном сочетании 3D-печати и 3D-сканирования. Так, при дефектации деталей с помощью 3D-сканера возможно было бы определить величину износа поверхности, а с помощью 3D-принтера восстановить изношенную поверхность с учетом неравномерности износа.

Преимущества ремонта с помощью аддитивных технологий:

- возможность восстановления деталей сложной геометрической формы;
- точность нанесения слоя восстанавливающего материала на место износа с учетом геометрических особенностей поверхности и, как следствие, снижение расхода материала. В зависимости от сочетания параметров построения коэффициент использования материала может варьироваться от 0,2 до 0,9, т. е. от 20 до 90% материала, поступившего через сопловые отверстия системы подачи, фактически формируют деталь;
- снижение затрат на последующую обработку детали;
- возможность автоматизации технологического процесса ремонта.

Сочетание применения аддитивных технологий и выполнения ремонтных работ расширяет возможности эффективного использования энергетических установок по назначению. Такая вариативность позволяет решать поставленные задачи.

Примерами использования ремонта с помощью аддитивных технологий могут быть:

- восстановление лабиринтных уплотнений, сопловых аппаратов, рабочих лопаток турбин и компрессоров и т. д.;
- изготовление отсутствующих деталей, необходимых для ремонта главных и вспомогательных двигателей, что позволяет избежать крупных аварий энергетической установки.

Ремонт с использованием аддитивных технологий позволяет восстанавливать работоспособность двигателя.

При этом аварийную ситуацию на объекте, находящемся в удалении от базы, также возможно предотвратить с помощью оперативного изготовления необходимой детали и с последующей доставкой.

Важнейшим этапом обеспечения ремонта является выбор аддитивных технологий, отвечающих заданным характеристикам.

Технологии 3D-печати делают возможным изготовление любой детали, а также проведение ремонта поврежденной на основе ее трехмерной модели.

К недостаткам данного метода можно отнести высокую стоимость расходных материалов и самого оборудования. Развитие данных технологий позволит снизить себестоимость процесса изготовления отдельных деталей.

Основные методы технологий 3D-печати с использованием металлических порошков, широко распространенные и успешно применяемые в настоящее время в различных областях науки и техники, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные аддитивные технологии

Метод	Свойство
High-speed Direct Laser Growth (HSDLG)	Формирование изделия из порошка, подаваемого сжатой газопорошковой струей непосредственно в зону выращивания
Selective Laser Sintering (SLS)	Последовательное частичное плавление (спекание) слоев материалов из металлических порошков с помощью лазера
Selective Laser Melting (SLM)	Расплавление слоев материалов из металлических порошков с помощью лазера
Direct Metal Deposition (DMD)	Нанесение расплавленного с помощью лазера металла в точку построения для последовательного создания слоев детали
Construction Laser Additive Directe (CLAD)	Частичная плавка металла газопорошковой струи в фокусе лазерного луча
Laser Engineered Net Shaping (LENS)	Спекание распыляемого порошкового металла в фокусе лазерного луча
Fused deposition modeling (FDM)	Послойном создании трехмерных объектов за счет укладки расплавленной металлической проволоки
Electron Beam Melting (EBM)	Последовательное частичное плавление (спекание) слоев материалов из металлических порошков с помощью потока электронов
Electron beam Direct Manufacturing (EBDM)	Послойное наваривание металла в виде проволоки, расплавляемой потоком электронов
Ultrasonic additive manufacturing (UAM)	Послойном сваривании тонких металлических пластин с помощью ультразвука
Multiphase Jet Solidification (MJS)	Послойном образовании детали посредством распределения жидкого материала по поверхности

В табл. 2 представлены достоинства аддитивных технологий, к основным же преимуществам можно отнести следующие:

- высокую скорость изготовления изделий,
- высокую точность изготовления деталей,
- обширный диапазон используемых порошковых материалов,
- возможность изготовления готовых деталей со сложной геометрией.

Анализ характеристик аддитивных технологий позволяет сделать выборку наиболее оптимальных методов для проведения ремонта. Это связано с особенностями использования отдельных технологий, например, необходимо осуществлять дополнительные трудоемкие технологические операции (UAM, MJS, MIM), также они имеют ограниченный спектр использования (CLAD), невысокую физическую прочность готовых деталей (FDM), громоздкость и сложность устанавливаемого оборудования.

Наиболее приемлемым методом для решения поставленной задачи является использование технологии высокоскоростного прямого лазерного выращивания (High-speed Direct Laser Growth), основанной на спекании распыляемого порошкового металла в фокусе лазерного луча. Этот метод наиболее удобен для практической реализации. Он позволяет изготавливать элементы сложной как внутренней, так и наружной геометрической конфигурации с одновременным созданием сплавов и слоев металла. Также технология позволяет производить ремонт поврежденных деталей.

## Преимущества методов аддитивных технологий

Метод	Преимущества
HSDLG	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокая скорость изготовления изделий,</li> <li>– высокая точность изготовления,</li> <li>– обширный диапазон используемых порошковых материалов,</li> <li>– процесс изготовления происходит без поддерживающих структур,</li> <li>– возможность изготовления готовых деталей со сложной геометрией,</li> <li>– объем камеры также подходит для изготовления крупных и габаритных деталей.</li> </ul>
SLS	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокая точность изготовления,</li> <li>– обширный диапазон используемых порошковых материалов,</li> <li>– процесс изготовления происходит без поддерживающих структур,</li> <li>– возможность изготовления готовых деталей со сложной геометрией,</li> <li>– объем камеры также подходит для изготовления крупных и габаритных деталей.</li> </ul>
SLM	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокая точность изготовления деталей,</li> <li>– обширный диапазон используемых порошковых материалов,</li> <li>– процесс изготовления происходит без поддерживающих структур,</li> <li>– возможность изготовления готовых деталей со сложной геометрией,</li> <li>– объем камеры также подходит для изготовления крупных и габаритных деталей.</li> </ul>
DMD	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокая точность изготовления деталей,</li> <li>– процесс изготовления происходит без поддерживающих структур,</li> <li>– обширный диапазон используемых порошковых материалов, в т. ч. подача двух различных материалов,</li> <li>– возможность производства отдельных элементов со сложной геометрией,</li> <li>– объем камеры также подходит для изготовления крупных и габаритных деталей,</li> <li>– возможность нанесения специальных покрытий на готовые детали,</li> <li>– ремонт деталей без дополнительной механической обработки.</li> </ul>
CLAD	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокая точность изготовления деталей,</li> <li>– процесс изготовления происходит без поддерживающих структур,</li> <li>– обширный диапазон используемых порошковых материалов, в т. ч. подача двух различных материалов,</li> <li>– возможность изготовления деталей со сложной геометрией,</li> <li>– объем камеры также подходит для изготовления крупных и габаритных деталей,</li> <li>– возможность нанесения специальных покрытий на готовые детали,</li> <li>– ремонт деталей без дополнительной механической обработки.</li> </ul>
LENS	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокая точность изготовления,</li> <li>– обширный диапазон используемых порошковых материалов,</li> <li>– возможность одновременной подачи различных материалов и получение их сплавов,</li> <li>– возможность производства отдельных элементов со сложной геометрией,</li> <li>– объем камеры также подходит для изготовления крупных и габаритных деталей.</li> </ul>
FDM	<ul style="list-style-type: none"> <li>– объем камеры подходит для изготовления крупных и габаритных деталей,</li> <li>– простота конструкции, невысокая стоимость оборудования.</li> </ul>
EBM	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокая скорость построения деталей,</li> <li>– изготовление не требует дополнительных технологических операций после изготовления детали для достижения необходимой механической прочности,</li> <li>– большая камера для построения готовых деталей.</li> </ul>
EBDM	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокая скорость построения,</li> <li>– не требует дополнительных технологических операций после изготовления детали для достижения необходимой механической прочности,</li> <li>– большая камера для построения готовых деталей.</li> </ul>
UAM	<ul style="list-style-type: none"> <li>– низкая температура рабочих деталей,</li> <li>– низкие требования к рабочей камере,</li> <li>– возможность создания биметаллических деталей.</li> </ul>
MJS	<ul style="list-style-type: none"> <li>– большая камера для построения готовых деталей,</li> <li>– простота конструкции, невысокая стоимость оборудования.</li> </ul>

Таким образом, ремонт с применением аддитивных технологий позволит сократить временные и материальные затраты на техническое обслуживание и ремонт элементов энергетических установок и пропульсивного комплекса, что повысит их эффективность, эксплуатационную надежность кораблей Военно-Морского Флота.

## Литература

1. Белов Г.П. Атлантическая эскадра 1968–2005 / Г.П. Белов. – СПб.: Береста, 2012. – 604 с.
2. Антонова В.С. Аддитивные технологии: Учеб. пособие / В.С. Антонова, И.И. Осовская. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2017. – 30 с.

3. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении: Пособие для инженеров / М.А. Зленко. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.

4. Различные технологии в 3D-печати [Электронный ресурс]. – URL: <https://docplayer.ru/27519886-Razlichnye-tehnologii-v-3d-pechati.html> (дата обращения: 03.02.19).

5. Аварии ДВС. Их причины. Рекомендации [Электронный ресурс]. – URL: <http://mirmarine.net/poleznaya-informatsiya/avarii/360-avarii-ikh-prichiny-rekomendatsii> (дата обращения: 20.01.2019).