

Войнов П.С., Беленький В.Я., Белинин Д.С., Варушкин С.В. Возможности применения аддитивных технологий при конструировании и производстве вооружения, военной и специальной техники // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 70–78. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.09

Voynov P.S., Belenkiy V.Ya., Belinin D.S., Varushkin S.V. Possibilities of additive technologies application in designing and manufacturing of weapons of military equipment. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 70–78. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.09

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 23, № 2, 2021
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.09

УДК 62-1/-9

П.С. Войнов, В.Я. Беленький, Д.С. Белинин, С.В. Варушкин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия
Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации, Пермь, Россия

**ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ
И ПРОИЗВОДСТВЕ ВООРУЖЕНИЯ, ВОЕННОЙ И СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

Одним из приоритетных направлений развития современного машиностроения является переход к передовым цифровым и интеллектуальным производственным технологиям, и доминирующее положение в них занимают аддитивные технологии. На сегодняшний день направление развития аддитивных технологий вышло за рамки научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, что, в свою очередь, позволяет рассматривать их как самостоятельный производственный процесс или же как минимум реализацию технологических процессов производства. Неотъемлемой частью современного отечественного машиностроения является производство вооружения, военной и специальной техники. Аддитивные технологии рассмотрены как перспективный экономически эффективный метод изготовления металлических изделий с целью повышения технологичности производственных процессов изготовления современных образцов вооружения, военной и специальной техники. Показаны преимущества производства изделий из металла методом послойного синтеза в сравнении с уже существующими и устоявшимися методами, применяемыми в специальном машиностроении в настоящее время. Проведено сравнение категорий аддитивных технологий с различными методами реализации, различными источниками тепловой энергии и различными формами материала. Определены возможные пути повышения эксплуатационных характеристик надежности и долговечности как уже существующих образцов вооружения, военной и специальной техники, так и находящихся в процессе проектирования и опытного производства, за счет применения аддитивных технологий при изготовлении деталей и сборочных единиц из металлов и сплавов, которые ранее не применялись в традиционных технологиях из-за низкой экономической эффективности. Проведен анализ возможности и целесообразности применения аддитивных технологий в качестве реализации технологических процессов производства вооружения, военной и специальной техники предприятиями отечественного военно-промышленного комплекса.

Ключевые слова: сварочные технологии, аддитивные технологии, вооружение, военная и специальная техника, машиностроение, лазер, электронный луч, плазменная дуга, электрическая дуга, технологии послойного синтеза, формообразование, цифровое производство.

P.S. Voynov, V.Ya. Belenkiy, D.S. Belinin, S.V. Varushkin

Perm Military Institute of National Guard Troops of the Russian Federation, Perm, Russian Federation
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**POSSIBILITIES OF ADDITIVE TECHNOLOGIES APPLICATION IN DESIGNING
AND MANUFACTURING OF WEAPONS OF MILITARY EQUIPMENT**

One of the priority areas for the development of modern mechanical engineering is the transition to advanced digital and intelligent production technologies, and additive technologies dominate in them. Today, the direction of development of additive technologies has gone beyond the framework of research and development work, which in turn allows us to consider them as an independent production process or, at least, the implementation of technological production processes. An integral part of modern domestic mechanical engineering is the production of weapons, military and special equipment. Additive technologies are considered in the article as a promising cost-effective method of manufacturing metal products in order to improve the manufacturability of production processes for the manufacture of modern weapons, military and special equipment. The advantages of the production of metal products by the layer-by-layer synthesis method are shown in comparison with the already existing and well-established methods used in special mechanical engineering at the present time. The comparison of the categories of additive technologies with different methods of implementation, different sources of thermal energy and different forms of material is carried out. Possible ways of increasing the operational characteristics of reliability and durability of both existing models of weapons of military and special equipment, and those in the process of design and pilot production through the use of additive technologies in the manufacture of parts and assembly units from metals and alloys that have not previously been used from for low economic efficiency in traditional technologies. The analysis of the possibility and feasibility of using additive technologies as the implementation of technological processes for the production of weapons of military and special equipment by enterprises of the domestic military-industrial complex.

Keywords: welding technologies, additive technologies, weapons, military and special equipment, mechanical engineering, laser, electron beam, plasma arc, electric arc, layer-by-layer synthesis technologies, shaping, digital production.

Введение

Современное машиностроение обладает достаточно широким набором методов производства изделий из металла. К ним относятся: ковка, литье, штамповка, прокатка, прессование, волочение и т.д. Все эти методы можно отнести к классическим методам формообразования металлических изделий. История развития этих методов имеет достаточно длительный период времени, что, в свою очередь, дает полное представление о преимуществах, недостатках и возможностях их применения в технологических процессах машиностроения. Однако эти методы имеют ряд ограничений и недостатков, к основным из которых можно отнести ограниченность номенклатуры изготавливаемых изделий, объемные временные показатели, значительные геометрические отклонения получаемых деталей, большой процент расхода материала на припуски, потребность в дополнительном оборудовании и оснастке, большие материальные и временные затраты при штучном изготовлении. Все эти факторы в той или иной мере влияют на эффективность производственных процессов и технологичность изделий. К одному из наиболее перспективных и инновационных направлений совершенствования технологических процессов металлообработки относится направление аддитивного производства. Технологии послойного синтеза, или же аддитивные технологии, открывают возможности снижения продолжительности цикла изготовления изделий машиностроительной отрасли и расширения области применимости металлообработки. В сравнении с классическими методами формообразования металлических изделий аддитивное производство имеет не такую богатую историю развития и совершенствования, поэтому не имеет широкого распространения.

Сварочные технологии в течение длительного периода времени позиционировались как технологии производства неразъемных соединений при изготовлении и ремонте металлических изделий и служили отличной альтернативой клепочным соединениям. Но в течение последних нескольких десятилетий ученые активно начали исследовать возможность изготовления металлических деталей с использованием контролируемого осаждения металла. Использование различных видов сварки для создания изделий произвольной формы было начато в Германии в 1960-х гг. Одними из первых компаний, занимавшихся разработкой методов сварки для изготовления крупных компонентов простой геометрии, таких как сосуды под давлением, которые могли весить до 500 т, были Krupp, Thussen и Sulzer [1]. В конце 80-х гг. в Германии J. Schmidt

и другие (Siemens AG) [2, 3] разработали технологию shape welding (сварочная форма)¹ и оборудование (рис. 1), позволяющее создавать металлические компоненты длиной до 10,5 м, радиусом до 5,8 м и массой до 500 т способом автоматической дуговой наплавки под слоем флюса, и изготовили элементы для тороидальной трубы атомного реактора.



Рис. 1. Создание половинного тороида

Проделанная работа заложила основы аддитивного формирования металлических заготовок. Развитие технологий сварочного производства на современном этапе позволяет значительно расширить качественные и количественные показатели производственных процессов, применяемых в машиностроении. Заложенные в 60-х гг. прошлого столетия принципы аддитивного производства в настоящее время становятся все более доступными и эффективными для внедрения их в производственные процессы создания современных и прогрессивных образцов бронетанкового вооружения и техники.

Анализ технологий показал, что производство готовых деталей с использованием послойного синтеза, основанного на принципах сварочного производства, имеет ряд преимуществ [1]:

- автоматизация;
- гибкость процесса (при правильном управлении процессом возможно широкое разнообразие форм и размеров);
- малое время обработки (сокращаются процессы разработки и производства изделия);
- эффективное использование материалов;
- возможность получения изделий с функционально-градиентными свойствами;

¹ <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/1992/1992-32-ickens.pdf>

– возможность прямого производства металлических деталей;

– произведенные детали имеют хорошие изотропные характеристики.

В рамках изучения возможности применения аддитивного производства в качестве технологического процесса изготовления металлических изделий в процессе производства вооружения, военной техники в качестве *объекта исследования* были рассмотрены различные виды аддитивного производства с применением различных источников тепловой энергии, проведена оценка наиболее целесообразных и экономически выгодных методов.

Предметом исследования являлись аддитивные технологии в процессе производства вооружения, военной техники.

Цель исследовательской работы заключалась в оценке возможности применения аддитивного производства для повышения качественных, количественных и экономических показателей цикла изготовления образцов вооружения, военной техники.

Рассматриваемые проблемы: сложность снижения металлоемкости производственных процессов бронетанкового вооружения и техники, низкая технологичность производственных процессов, необходимость повышения экономической эффективности производства бронетанкового вооружения и техники.

Практическая значимость работы заключается в представлении сравнительного описания разновидностей аддитивных технологий с учетом их особенностей и возможности применения в производственных процессах вооружения, военной и специальной техники.

Понятие аддитивного производства

Аддитивное производство (АП) подразумевает под собой технологии послойного выращивания деталей со сложной геометрической конфигурацией с использованием разнообразных источников тепловой энергии и различных присадочных материалов. Производственный процесс аддитивного производства позволяет получать трехмерные элементы или же заготовки для детали по цифровой модели готового изделия. Аддитивное производство основывается на эффективных принципах цифрового производства, при котором предполагается тесная связь всех этапов конструирования и производства изделия, обеспеченная наличием цифрового прототипа изделия и применением сквозного проектирования. Такой подход позволяет автоматизировать разработку новых изделий, снизить процент брака, резко сократить время разработки новых изделий.

В рамках концепции цифрового производства стадии производства изделия предшествует предварительное имитационное моделирование пове-

дения цифрового прототипа под действием заданного набора факторов с целью определения параметров изделия или технологии его изготовления для обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик. Возможность моделирования технологического процесса является резервом для оптимизации технологических режимов изготовления деталей, разработки управляющих программ, минимизации дефектов и повышения качества изготовления сложных деталей.

Эта уникальная особенность позволяет производить детали сложной формы «с нуля» или на основе номенклатуры различного сортамента проката (листы, трубы и т.д.) практически без учета технологических ограничений и необходимости использования дорогостоящей оснастки, такой как штампы или литейные формы, сборочные кондукторы и т.п.

Мировая промышленность в целом проявляет острый интерес к аддитивным технологиям с момента их появления, так как они позволяют сократить время перехода от проекта изделия к его производству без потери качественных показателей. В настоящее время аддитивное производство все больше применяют в качестве технологии получения готовых изделий, в отличие от ранних этапов развития, где оно применялось в качестве вспомогательного заготовительного производства. Аддитивное производство все больше применяется в наукоемком машиностроении: авиастроении, ракетно-космической отрасли, химическом машиностроении, энергомашиностроении, автомобилестроении.

За последние двадцать лет наблюдаются значительные успехи в сфере металлических аддитивных технологий (АТ), что во многом связано со снижением цен на надежные промышленные лазеры и роботизированные комплексы, появлением недорогих высокопроизводительных вычислительных аппаратных средств и развитием программного обеспечения, совершенствованием технологий производства металлических порошков и широкой номенклатурой проволоочных присадочных материалов. Кроме того, сходство физических процессов и значительные наработки современных ученых в области сварки и наплавки различных групп материалов во многом объясняют бурное развитие металлических АТ, что позволило им стать самым современным методом обработки.

Категории аддитивного производства

В соответствии с ГОСТ Р 57558–2017, процессы аддитивного производства подразделяются на две категории:

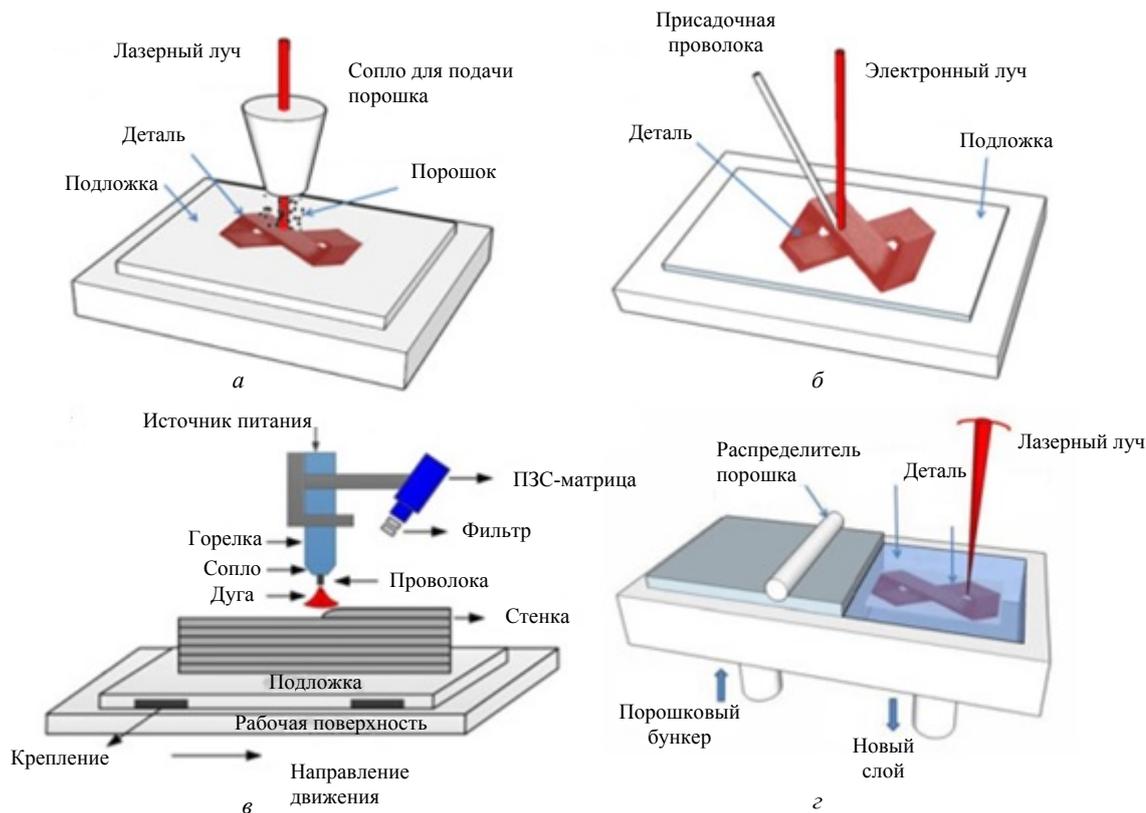


Рис. 2. Схематическое представление AT DED-L (а), DED-EB (б), DED-GMA (в), PBF-L (г)

Directed Energy Deposition (DED) (рис. 2, а–в) основывается на прямом подводе энергии и материала. Процесс АП основан на прямом подводе энергии и материала, в котором энергия от внешнего источника используется для соединения материалов путем их сплавления в процессе нанесения².

Powder Bed Fusion (PBF). В процессе АП – синтез на подложке (powder bed fusion): процесс АП (рис. 2, г), в котором энергия от внешнего источника используется для избирательного спекания (сплавления) предварительно нанесенного слоя порошкового материала³.

В обеих категориях в качестве источников тепловой энергии могут быть использованы: лазер (Л) – Laser (L), электронный луч (ЭЛ) – Electron Beam (EB), плазменная дуга (ПД) – Plasma Arc (PA) или электрическая дуга (ЭД) – Gas Metal Arc (GMA).

В качестве исходного материала в категории Directed Energy Deposition применяются порошковые и проволоочные материалы, в категории Powder Bed Fusion только порошковые.

На рис. 2, а показано схематическое представление процесса осаждения материала при помощи направленного взаимодействия лазера с порошком,

используемым в качестве исходного материала, – Directed Energy Deposition – Laser (DED-L) [4–13]. Как правило, DED-L основывается на подаче порошка в ванну расплава, созданную лазерным лучом, с послойным наплавлением материала на подложку. Защитный газ, такой как аргон, используется для защиты расплавленного металла от окисления и переноса порошка в ванну расплава.

На рис. 2, г показано схематическое представление процесса сплавления материала в заранее сформированном слое с помощью лазера (PBF-L) [14–18]. Деталь создается путем нанесения тонких слоев порошка, который равномерно распределяется с помощью специального устройства. Далее лазерный луч сканирует поверхность нанесенного слоя порошка и послойно формирует изготавливаемую деталь методом спекания.

Технология DED-EB (см. рис. 2, б) использует электронный луч для расплавления проволоочного присадочного материала. Вакуум, необходимый для осуществления процесса электронно-лучевой наплавки, также обеспечивает исключительную защиту расплавленного металла в процессе построения заготовки.

В DED-PA или DED-GMA плазменная или электрическая дуга используется в качестве источника нагрева, а присадочная проволока – в качестве исходного материала, аналогично сварке плавлением [4–7]. При этом схема выполнения техно-

² ГОСТ Р 57558–2017.

³ Там же.

логических операций включает в себя источник тепла, систему подачи проволоки и систему управления движением и построением, как показано на рис. 2, в.

Сравнительный анализ технологий Directed Energy Deposition и Powder Bed Fusion

Во всех процессах DED и PBF заготовка создается поэтапно после ввода оцифрованной геометрии из системы автоматизированным проектированием (САПР). Параметры режима, такие как скорость наплавки и скорость подачи исходного материала (или траектория сканирования и толщина слоя в случае PBF-технологий), либо предварительно установлены, либо контролируются в процессе с помощью соответствующих датчиков и обратных связей. Для изготовления небольших деталей сложной формы (ажурных или с внутренними полостями и каналами малых размеров) с высокими требованиями к качеству поверхности целесообразно использовать PBF-технологии [19, 20]. Для получения крупногабаритных деталей целесообразно выращивать заготовки с помощью DED-технологий. В настоящее время не существует общих требований к металлопорошковым композициям, применяемым в аддитивных технологиях. Разные компании – производители оборудования для реализации этих технологий рекомендуют работу с определенным перечнем материалов, обычно поставляемых компанией-производителем. В разных машинах используются порошки различного фракционного состава. Существенным недостатком в производстве порошков является то, что отсутствуют стандарты на материалы для технологий аддитивного производства, а методы оценки свойств материалов, полученных традиционными технологиями, не могут быть применены к аддитивным технологиям в силу наличия анизотропии, неизбежной при послойном принципе создания изделия. Использование присадочной проволоки в качестве исходного материала позволяет избавиться от проблем, связанных с низкой производительностью существующих методов, высокой стоимостью применяемого оборудования, ограниченностью типов применяемых материалов, обусловленной традиционным использованием в качестве исходного материала для аддитивного формирования изделий порошковых систем, оплаиваемых мощным тепловым источником [21–23]. Формирование изделий из большинства активных металлов приводит к повышенной пористости материала полученного изделия с существенным снижением его механических характеристик [24–27]. В качестве дополнительного преимущества присадочная проволока имеет значительно меньшую удельную площадь поверхности, чем порошковые материалы, и менее склонна к окислению

и поглощению влаги или загрязняющих веществ. Проволочные материалы легче хранить, они создают меньше проблем, связанных с безопасностью и здоровьем, по сравнению с металлическими порошками. Производительность формирования деталей из порошковых материалов в традиционных аддитивных технологиях является крайне низкой, что практически исключает перспективы применения этих технологий для производства крупногабаритных изделий. Технология гибридного изготовления изделий объединяет лучшие характеристики аддитивного формирования заготовки и последующего механического удаления материала в процессе создания металлических изделий. Процесс может реализовываться на одной платформе с послойным нанесением проволочного материала и обработкой с помощью станка с ЧПУ и является оптимальным для изготовления крупногабаритных деталей форм низкой и средней сложности. Важным преимуществом также является то, что проволоки изготавливаются для сварочной промышленности и доступны в широком ассортименте. Существует огромное количество сварочной проволоки из различных материалов: стали различных марок, титан, алюминий, медь, никель и их сплавы и так далее, в том числе из специальных сплавов, разработанных для отдельных отраслей промышленности. Кроме того, на данный момент в России значительно больше сертифицировано проволочных материалов, чем порошковых, что упрощает внедрение проволочных АТ по сравнению с порошковыми АТ. Некоторые ограничения по качеству поверхности при использовании посадочной проволоки во многом обусловлены сложностью использования в автоматическом режиме проволок малых диаметров (менее 0,8 мм), поскольку их трудно выпрямлять и подавать в зону наплавки с использованием обычных механизмов подачи, а использование проволок большего диаметра неминуемо приводит к увеличению сварочной ванны. Это приводит к образованию больших наплавленных валиков и относительно более шероховатой поверхности конечной заготовки, особенно для деталей сложной формы [5–8].

Возможность реализации аддитивного производства в технологии производственных процессов изготовления образцов вооружения и военной техники

Как любой производственный процесс гражданского машиностроения, производственный процесс предприятий, производящих продукцию военного назначения, состоит из различных технологических процессов, тесно связанных между собой, совокупность реализации которых дает в результате конечное готовое изделие. При рас-

смазке или иных технологических процессов металлообработки как составных частей производственного процесса существует возможность исключения либо их замены за счет применения более технологичных и современных методов реализации того или иного технологического процесса. Аддитивное производство можно рассматривать как самостоятельную отрасль и как вспомогательное производство, позволяющее в достаточной мере повысить качественные, количественные и экономические показатели производства вооружения, военной и специальной техники в целом.

Разработка новых технологий изготовления изделий из высокопрочных сталей, цветных металлов и их сплавов, обеспечивающих улучшенные эксплуатационные характеристики и высокие экономические показатели изделий военного назначения, является актуальной задачей. Снижение затрат на изготовление конструкций может быть обеспечено за счет применения ресурсосберегающих технологий, а также за счет снижения материалоемкости конструкции при проектировании. Анализ применимости АТ при изготовлении образцов вооружения и военной техники показал целесообразность использования технологий послойного формирования изделия путем оплавления присадочного металла в виде проволоки высококонцентрированными источниками тепловой энергии (электронный луч, плазменная дуга). Данный способ отличается высокой производительностью, малой пористостью формируемого материала, высокими физико-механическими свойствами металла готовых изделий. Кроме того, применение проволоочных присадочных металлов позволяет исключить зависимость аддитивных технологий от импорта зарубежных порошковых материалов.

Совокупность свойств материала изделия, синтезируемого в рамках технологического процесса аддитивного изготовления деталей с использованием высококонцентрированных источников тепловой энергии, и как следствие – конечные физико-механические свойства готового изделия зависят от целого ряда значимых факторов. Создание гибридных плазменных и электродуговых АТ синтеза материала представляет собой крайне сложный, многоэтапный процесс, включающий в себя следующие основные этапы:

- выбор типовых изделий и оценка применимости гибридных АТ при изготовлении ответственных деталей вооружения и военной техники;
- анализ и проработка технологии изготовления и последующей механической обработки деталей, изготавливаемых с использованием проволоочных дуговых и плазменных АТ;

- оптимизация режимов электродуговой и плазменной наплавки и исследование их влияния на структуру и свойства синтезированного металла из высокопрочных сталей;

- оптимизация режимов термообработки материалов, полученных в результате применения АТ;

- проведение комплексных испытаний синтезированных деталей;

- решение комплекса задач по подготовке управляющих программ для создания требуемой детали с учетом данных математического моделирования, технических требований процесса к траекториям выращивания, особенностей механической и термической обработки полученной детали;

- обеспечение мультипараметрического управления в реальном времени для непосредственного процесса выращивания изделия, состоящего из последовательных операций по наплавке заданной траектории, механического упрочнения (проковки), механической (фрезерной, токарной или иной) обработки;

- создание специализированного оборудования.

Выводы

Основываясь на проведенном исследовании, можно определенно утверждать, что внедрение технологий послойного синтеза открывает широкие производственные возможности предприятиям отечественного военно-промышленного комплекса. Применение аддитивных технологий в технологических процессах производства вооружения, военной и специальной техники позволяет уйти от традиционных способов получения изделий из металла, основанных на технологиях вычитания, тем самым значительно повысить технологичность, производительность и экономическую эффективность этих процессов. Помимо повышения уровня общих показателей производственных процессов аддитивные технологии позволяют использовать металлы и сплавы, ранее недоступные из-за высокой цены и сложности в обработке. Повышение уровня технологичности производственных процессов напрямую влияет на качественные и эксплуатационные характеристики производимых образцов вооружения, военной и специальной техники.

Исследование выполнено при финансовой поддержке правительства Пермского края в рамках научного проекта № С-26/508 и Российского фонда фундаментальных исследований совместно с Пермским краем (проект № 20-48-596006 р_НОЦ_Пермский край).

Список литературы

1. Kovacevic R., Beardsley H. Process control of 3D welding as a droplet-based rapid prototyping technique. – URL: <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/73429/1998-06-Kovacevic.pdf> (accessed 6 April 2021).
2. Schmidt J., Dorner H., Tenckhoff E. Manufacture of complex parts by shape welding // *J. Nucl. Mater.* – 1990. – Vol. 171, no. 1. – P. 120–127.
3. Erve M., Schmidt J. Modern manufacturing techniques in fabrication of components for advanced water cooled reactors // *Atomic I., Agency E. Mater. for Advanced Water Cooled Reactors.* – 1992. – P. 133–142.
4. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests / D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2015. – Vol. 81, iss. 1-4. – P. 465–481.
5. Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer manufacturing process on large multi-layer parts / J. Ding, P. Colegrove, J. Mehnen, S. Ganguly, P.M. Sequeira Almeida, F. Wang, S. Williams // *Computational Materials Science.* – 2011. – Vol. 50, iss. 12. – P. 3315–3322.
6. Wire plus arc additive manufacturing / S.W. Williams, F. Martina, A.C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove // *Materials Science and Technology.* – 2016. – Vol. 32, iss. 7. – P. 641–647.
7. Advanced electron beam free form fabrication methods & technology / S. Stecker, K. Lachenberg, H. Wang, R. Salo // *AWS Welding Show.* – Atlanta (GA), 2006. – P. 35–46.
8. Syed W.U.H., Pinkerton A.J., Li L. Combining wire and coaxial powder feeding in laser direct metal deposition for rapid prototyping // *Appl. Surf. Sci.* – 2006. – Vol. 252(13). – P. 4803.
9. Fabrication of inclined thin-walled parts in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing with flat position deposition / J. Xiong, Y.Y. Lei, H. Chen, G.J. Zhang // *J. Mater. Process. Technol.* – 2017. – Vol. 240. – P. 397–403.
10. A review on powder bed fusion technology of metal additive manufacturing / V. Bhavar, P. Kattire, V. Patil, S. Khot, K. Gujar, R. Singh // *4th International Conference and Exhibition on Additive Manufacturing Technologies, Bangalore, India, September 1-2 2014.* – Bangalore, India, 2014. – P. 1–2.
11. Additive manufacturing of steel alloys using laser powder-bed fusion / M. Jamshidinia, A. Sadek, W. Wang, S. Kelly // *Adv. Mater. Process.* – 2015. – Vol. 173(1). – P. 20–24.
12. Density of additively-manufactured, 316L SS parts using laser powder-bed fusion at powers up to 400 W / C. Kamath, B. El-dasher, G.F. Gallegos, W.E. King, A. Sisto // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2014. – Vol. 74(1–4). – P. 65–78.
13. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones / S.A. Khairallah, A.T. Anderson, A. Rubenchik, W.E. King // *Acta Mater.* – 2016. – Vol. 108. – P. 36–45.
14. Mower T.M., Long M.J. Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2016. – Vol. 651. – P. 198–213.
15. Overview of modelling and simulation of metal powder bed fusion process at Lawrence Livermore National Laboratory / W. King, A. Anderson, R. Ferencz, N. Hodge, C. Kamath, S. Khairallah // *Material Science and Technology.* – 2015. – Vol. 31, no. 8. – P. 957–968.
16. An experimental investigation into additive manufacturing-induced residual stresses in 316L stainless steel / A. Wu, D. Brown, M. Kumar, G. Gallegos, W. King // *Metall. Mater. Trans.* – 2014. – Vol. 45A. – P. 1–11.
17. Baufeld B., Van der Biest O., Gault R. Additive manufacturing of Ti–6Al–4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties // *Materials & Design.* – 2010. – Vol. 31. – P. 106–111.
18. Macroscopic modelling of the selective beam melting process / D. Riedlbauer, J. Mergheim, A. McBride, P. Steinmann // *Proc. Appl. Math. Mech.* – 2012. – Vol. 12, no. 1. – P. 381–382.
19. Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. Остаточные напряжения: теория и приложения. – М.: Наука, 1982. – 112 с.
20. Toward an integrated computational system for describing the additive manufacturing process for metallic materials / R. Martukanitz, P. Michaleris, T. Palmer, T. DebRoy, Z.-K. Liu, R. Otis [et al.] // *Addit. Manuf.* – 2014. – Vol. 1. – P. 52–63.
21. Sciaky Inc. Electron beam additive manufacturing (EBAM) – Advantages of Wire AM vs. Powder AM. – URL: <http://additivemanufacturing.com/2015/10/14/electron-beam-additive-manufacturing-ebam-advantages-of-wire-am-vs-powder-am/> (accessed 6 April 2021).
22. Sciaky Inc. EBAM drives innovation for many applications and industries. – URL: <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/applications-industries> (accessed 6 April 2021).
23. Jhavar S., Jain N.K., Paul C.P. Development of micro-plasma transferred arc (p-PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2014. – Vol. 214, no. 5. – P. 1102–1110.
24. Selective laser melting of aluminium components / E. Louvis [et. al.] // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2011. – Vol. 211. – P. 275–284.
25. Capabilities and performances of the selective laser melting process / S.L. Campanelli [et al.]. – URL: http://cdn.intechopen.com/pdfs/12285/InTech-Capabilities_and_performances_of_the_selective_laser_melting_process.pdf (accessed 6 April 2021).
26. Анализ структуры образцов, полученных DMLS- и SLM-методами быстрого прототипирования / Ю.А. Безобразов, М.А. Зленко, О.Г. Зотов [и др.] // *Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: материалы 6-й Междунар. молодеж. науч.-практ. конф., г. Екатеринбург, 29 октября – 1 ноября 2012 г. / Урал. науч.-пед. шк. им. проф. А.Ф. Головина.* – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. – С. 154–157.
27. On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting / C. Qiu, C. Panwisawas, M. Ward, H.C. Basoalto, J.W. Brooks, M.M. Attallah // *Acta Materialia.* – 2015. – Vol. 96. – P. 72–79.

References

1. Kovacevic R., Beardsley H. Process control of 3D welding as a droplet-based rapid prototyping technique. URL: <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/73429/1998-06-Kovacevic.pdf> (accessed 6 April 2021).
2. Schmidt J., Dorner H., Tenckhoff E. Manufacture of complex parts by shape welding. *Journal Nucl. Mater.*, 1990, vol. 171, no. 1, pp. 120–127.
3. Erve M., Schmidt J. Modern manufacturing techniques in fabrication of components for advanced water cooled reactors. Atomic I., Agency E. *Mater. for Advanced Water Cooled Reactors*, 1992, pp. 133–142.
4. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 81, iss. 1-4, pp. 465–481.
5. Ding J., Colegrove P., Mehnen J., Ganguly S., Sequeira P. et al. Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer manufacturing process on large multi-layer parts. *Computational Materials Science*, 2011, vol. 50, iss. 12, pp. 3315–3322.
6. Williams S.W., Martina F., Addison A.C., Ding J., Pardal G., Colegrove P. Wire plus arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 2016, vol. 32, iss. 7, pp. 641–647.
7. Stecker S., Lachenberg K., Wang H., Salo R. Advanced electron beam free form fabrication methods & technology. *AWS Welding Show*. Atlanta (GA), 2006, pp. 35–46.
8. Syed W.U.H., Pinkerton A.J., Li L. Combining wire and coaxial powder feeding in laser direct metal deposition for rapid prototyping. *Appl. Surf. Sci.*, 2006, vol. 252(13), p. 4803.
9. Xiong J., Lei Y.Y., Chen H., Zhang G.J. Fabrication of inclined thin-walled parts in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing with flat position deposition. *Journal Mater. Process. Technol.*, 2017, vol. 240, pp. 397–403.
10. Bhavar V., Kattire P., Patil V., Khot S., Gujar K., Singh R. A review on powder bed fusion technology of metal additive manufacturing. *4th International Conference and Exhibition on Additive Manufacturing Technologies, Bangalore*. Bangalore, India, 2014, pp. 1–2.
11. Jamshidinia M., Sadek A., Wang W., Kelly S. Additive manufacturing of steel alloys using laser powder-bed fusion. *Adv. Mater. Process.*, 2015, vol. 173(1), p. 20–24.
12. Kamath C., Eldasher B., Gallegos G.F., King W.E., Sisto A. Density of additively-manufactured, 316L SS parts using laser powder-bed fusion at powers up to 400 W. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2014, vol. 74(1–4), pp. 65–78.
13. Khairallah S.A., Anderson A.T., Rubenchik A., King W.E. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. *Acta Mater.*, 2016, vol. 108, pp. 36–45.
14. Mower T.M., Long M.J. Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials. *Mater. Sci. Eng. A.*, 2016, vol. 651, pp. 198–213.
15. King W., Anderson A., Ferencz R., Hodge N., Kamath C., Khairallah S. Overview of modelling and simulation of metal powder bed fusion process at Lawrence Livermore National Laboratory. *Material Science and Technology*, 2015, vol. 31, no. 8, pp. 957–968.
16. Wu A., Brown D., Kumar M., Gallegos G., King W. An experimental investigation into additive manufacturing-induced residual stresses in 316L stainless steel. *Metall. Mater. Trans.*, 2014, vol. 45A, pp. 1–11.
17. Baufeld B., Van der Biest O., Gault R. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties. *Materials & Design*, 2010, vol. 31, pp. 106–111.
18. Riedlbauer D., Mergheim J., McBride A., Steinmann P. Macroscopic modelling of the selective beam melting process. *Proc. Appl. Math. Mech.*, 2012, vol. 12, no. 1, pp. 381–382.
19. Pozdeev A.A., Niashin Iu.I., Trusov P.V. Ostatochnye napriazheniia: teoriia i prilozheniia [Residual stresses: theory and applications]. Moscow: Nauka, 1982, 112 p.
20. Martukanitz R., Michaleris P., Palmer T., DeRoy T., Liu Z.-K., Otis R. et al. Toward an integrated computational system for describing the additive manufacturing process for metallic materials. *Addit. Manuf.*, 2014, vol. 1, pp. 52–63.
21. Sciaky Inc. Electron beam additive manufacturing (EBAM) – Advantages of Wire AM vs. Powder AM. URL: <http://additivemanufacturing.com/2015/10/14/electron-beam-additive-manufacturing-ebam-advantages-of-wire-am-vs-powder-am/> (accessed 6 April 2021).
22. Sciaky Inc. EBAM drives innovation for many applications and industries. URL: <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/applications-industries> (accessed 6 April 2021).
23. Jhavar S., Jain N.K., Paul S.P. Development of micro-plasma transferred arc (p-PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol. 214, no. 5, pp. 1102–1110.
24. Selective laser melting of aluminium components. E. Louvis et al. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol. 211, pp. 275–284.
25. S.L. Campanelli et al. Capabilities and performances of the selective laser melting process. URL: http://cdn.intechopen.com/pdfs/12285/InTech-Capabilities_and_performances_of_the_selective_laser_melting_process.pdf (accessed 6 April 2021).
26. Bezobrazov Iu.A., Zlenko M.A., Zotov O.G. Analiz struktury obraztsov, poluchennykh DMLS- i SLM-metodami bystrogo prototipirovaniia. *Innovatsionnye tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii*. Ekaterinburg, Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2012, pp. 154–157.
27. Qiu C., Panwisawas C., Ward M., Basoalto H.C., Brooks J.W., Attallah M.M. On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting. *Acta Materialia*, 2015, vol. 96, pp. 72–79.

Получено 29.04.2021

Опубликовано 25.06.2021

Сведения об авторах

Войнов Павел Сергеевич (Пермь, Россия) – адъюнкт адъюнктуры (очного и заочного обучения) факультета подготовки кадров высшей квалификации и дополнительного профессионального производства

образования Пермского военного института войск национальной гвардии Российской Федерации, e-mail: vounovps@rambler.ru.

Беленький Владимир Яковлевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; профессор Пермского военного института войск национальной гвардии Российской Федерации, e-mail: vladimirbelenkij@yandex.ru.

Белинин Дмитрий Сергеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: 5ly87@mail.ru.

Варушкин Степан Владимирович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, инженер кафедры сварочного производства, метрологии и конструктивных материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: stepan.varushkin@mail.ru.

About the authors

Pavel S. Voynov (Perm, Russian Federation) – Adjunct, Faculty of Training Highly Qualified Personnel and Additional Professional Education, Perm Military Institute of National Guard Troops of the Russian Federation, e-mail: vounovps@rambler.ru.

Vladimir Ya. Belenkij (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; Professor, Perm Military Institute of National Guard Troops of the Russian Federation, e-mail: vladimirbelenkij@yandex.ru.

Dmitry S. Belinin (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Production, Metrology and Material Technology, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: 5ly87@mail.ru.

Stepan V. Varushkin (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Engineering, Engineer, Department of Welding Production, Metrology and Material Technology, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: stepan.varushkin@mail.ru.