

<https://doi.org/10.51301/jemet.2024.i1.01>

Relevance and advantages of modern additive manufacturing for mechanical engineering of Republic of Kazakhstan

E.Z. Nugman, L.I. Shova*

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: showa.liya@gmail.com

Abstract. The article discusses current problems in the machinery industry of the Republic of Kazakhstan, analyzes data on import and export indicators of mechanical engineering products by sectors, and provides possible solutions to these problems – the implementation and development of additive manufacturing, according to the authors. The advantages and disadvantages of additive technologies were highlighted, requiring further research and experiments to minimize or eliminate limitations. The latest developments and most advanced 3D printing technologies were also considered, including machine models that combine 3D printing and post-processing in one system. The L-WAAM technology, digital twins, and ultrasound-based 3D printing were discussed, as well as innovations in materials science resulting from the development of 3D printing. The article also provided an overview of scientists and institutions making conducting research in this field, such as model qualification and certification of additive manufacturing, material selection, etc., as well as projects developed by companies to improve technologies in all areas, such as the development of the process itself, a digital platform, and an integrated L-WAAM cell.

Keywords: mechanical engineering industry of Kazakhstan, additive technologies, 3D printing, post-processing, WAAM technologies, innovations.

1. Введение

Осознанно или нет, каждый человек, как и каждая страна заинтересована в том, чтобы её экономика развивалась, потому что это влияет на качество нашей жизни. Именно поэтому правительство Казахстана направляет силы на развитие машиностроительной отрасли, как ведущей экономики страны. В 2023 году был создан Комплексный план по развитию машиностроительной отрасли Республики Казахстан на 2024-2028 годы. В этом плане был проведен анализ текущего состояния в отрасли в целом, а также в разных секторах по отдельности, были выявлены цель, задачи и ожидаемые результаты, основные направления и механизмы реализации плана. По показателям, отражающим текущее состояние отрасли ясно, что оно не удовлетворяет существующим потребностям и имеет множество сдерживающих развитие факторов. Наблюдается зависимость от импорта. По данным бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан машиностроительная продукция составляет 40% от всей импортной продукции страны, а внутренний рынок обеспечивается продукцией отечественного производства лишь на 20%. На мировом рынке отечественная продукция представлена на 0.02%. В цифрах эти показатели такие: на 2021 год экспорт составляет 277 млн долларов США, а импорт 3.074 млрд долларов США.

Рассмотрим также состояние машиностроения по секторам. Например, в горно-металлургическом машиностроении объем производства с 2017 по 2021 год вырос в 1.3 раза – со 22.1 до 29 млрд тенге. Объем экспорта продукции сектора снизился на 37% – с 80.5 до 50.4 млн дол-

ларов США. Объем импорта в секторе вырос в стоимостном выражении на 21.8% – с 863.9 до 1 052.2 млн долларов США. Абсолютные значения по импорту в десятки раз превышают объемы экспорта: 2017 г. – в 10.7 раз, 2018 г. – в 21.5 раз, 2019 г. – в 14.9 раз, 2020 г. – в 18.7 раз, 2021 г. – в 20.9 раз.

В нефтегазовом секторе наблюдается высокая степень износа основных производственных мощностей, в среднем порядка 80% за 2017-2021 гг. Объем импорта продукции нефтегазового машиностроения вырос в стоимостном выражении на 4% – с 790.5 до 822.7 млн долларов США. За тот же период объем экспорта остался на неизменном уровне, но сравнивая экспорт 2021 г. к 2020 г. снижение имеется на 6.7% в стоимостном выражении. Абсолютные значения по импорту также в десятки раз превышают объемы экспорта: 2017 г. – в 27.1 раз, 2018 г. – в 31.9 раз, 2019 г. – в 49.5 раз, 2020 г. – в 77 раз, 2021 г. – в 28.1 раз.

В электротехническом машиностроении объем вырос в 1.8 раза – с 136.4 до 248.3 млрд тенге в стоимостном выражении, в реальном же выражении рост составил 153.7%. Объем экспорта в секторе вырос в стоимостном выражении в 1.7 раза – с 164.6 до 284 млн долларов США. Основной экспортируемой продукцией сектора является аккумуляторы свинцовые и трансформаторы с жидким диэлектриком мощность от 650 кВт и более. Объем импорта в стоимостном выражении вырос на 28.5% – с 2.6 до 3.3 млрд долларов США. Вклад импорта электротехнического машиностроения в общий объем импорта машиностроения сократился с 23.8% в 2017 г. до 20.3% по итогам 2021 г.

По итогам плана основными направлениями решений проблем в машиностроении Казахстана являются увели-

чение номенклатуры производимой продукции, привлечение инвестиций, развитие экспортных возможностей, расширение рынков сбыта и совершенствование системы подготовки кадров [1].

Несмотря на то, что динамика роста есть, и она положительная, не нужно даже сравнивать, чтобы знать, что с таким темпом догнать развитые страны удастся не скоро. Для этого достаточно лишь посмотреть на цифры хотя бы нескольких лидирующих стран: доходы от машиностроительной отрасли в США составляют около 300 млрд евро в год, не сильно отстает от этих показателей Германия, во Франции показатели составляют около 50 млрд евро в год и т.д. [2].

Чтобы двигаться хотя бы на несколько шагов быстрее, нужно смотреть наперед и мобильно подстраиваться под современные условия и потребности. И если где-то с огромными скоростями набирают обороты новейшие технологии, такие как аддитивное производство, то и нашей стране непозволительно отставать. Если возможно «убить нескольких зайцев одним выстрелом», то нет смысла пользоваться менее эффективными методами.

2. Материалы и методы

Изучение и анализ статистических данных, литературный обзор, сравнительный анализ, систематизация информации и критический анализ литературы по теме исследования. В качестве материалов были использованы научные статьи и публикации, официальные документы и отчеты, а также интернет-ресурсы.

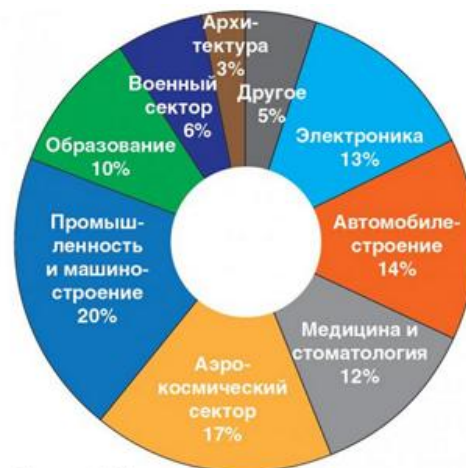
3. Результаты и обсуждение

Аддитивное производство на слуху уже довольно давно, и с каждым годом оно не только набирает обороты, но и становится все более совершенным и практичным. Преимуществ перед традиционными методами у этой технологии много: более высокий коэффициент использования материала, снижение соотношения закупок к расходам, снижение затрат на обработку и отделку, сокращение времени, улучшение механических свойств, экологически чистое производство и т.д. Эти факторы являются движущими силами рынка и привлекают огромное внимание исследователей во всем мире. Аддитивные технологии настолько точны в создании сложных и замысловатых геометрических фигур, что иногда нет необходимости в процессах окончательной обработки. Изделия получаются с гораздо меньшим весом и более высокой прочностью [3].

Парк машин из 3D принтеров растет с большими скоростями в Японии, Китае, Франции, Германии, Великобритании и Италии. Продукты 3D печати находят применение в самых различных областях, таких как архитектура, автомобилестроение, аэрокосмический сектор и т.д. (рисунок 1).

То, насколько аддитивное производство выгоднее традиционного, можно увидеть на примере мировых компаний, активно внедряющих его в своей деятельности. General Electric выпускает форсунки для двигателей, которые ранее состояли из 18 частей, а сейчас они выращены в виде цельной конструкции. Они на 25% легче и в 5 раз прочнее, чем предшествующие версии. В итоге компания экономит примерно 25 тыс. долларов на каждом двигателе [4].

Таким образом наглядно видно, как внедрение и активное развитие аддитивных технологий в производство Казахстана решит сразу несколько задач: объем производства однозначно увеличится за счет упрощения системы, сокращения длительности цикла от идеи до изделия; сократятся расходы и вырастет прибыль, за счет уменьшения материалоемкости, трудоемкости и энергоемкости; расширится рынок сбыта и повысится конкурентоспособность за счет повышения качества продукции. Кроме того, 3D печать всегда будет способна подстроиться под постоянно изменяющиеся потребности рынка без необходимости переналадки.



*по данным 2016 г.

Рисунок 1. Отрасли и сферы применения аддитивных технологий, % (данные мирового аналитического издательства Wohlers Report)

Аддитивное производство – направление новое и бурно развивающееся, а значит окружено вниманием ученых и исследователей. Оно имеет огромное количество весомых преимуществ, поэтому, несмотря на то что в процессе производства приходится сталкиваться с трудностями из-за недостаточного его освоения, причем с трудностями ранее неизвестными, наука не оставляет попыток адаптировать новые технологии под потребности той или иной отрасли производства.

Так, NASA объявила в марте о том, что создает два института, один из которых будет заниматься исследованиями в области аддитивных технологий – Institute for Model-Based Qualification & Certification of Additive Manufacturing (Институт модельной квалификации и сертификации аддитивного производства). Университет Карнеги-Меллона в Питтсбурге возглавит Институт модельной квалификации и сертификации аддитивного производства (IMQCAM), целью которого является улучшение компьютерных моделей металлических деталей, напечатанных на 3D-принтере, и расширение области их применения в космических полетах. Институтом будет руководить Университет Джонса Хопкинса в Балтиморе.

Эффективная сертификация и использование деталей, напечатанных на 3D принтере, требует высокоточного прогнозирования их характеристик и свойств. «Структура таких деталей сильно отличается от тех, которые изготавливаются любым другим методом», — сказал Тони Роллетт, главный исследователь института и

профессор металлургической инженерии и материаловедения US Steel в Университете Карнеги-Меллона. Поэтому Институт будет сосредоточен на создании компьютерных моделей, известных как цифровые двойники, которые позволят инженерам понять возможности и ограничения свойств изделий, например, меру нагрузки, которую они будут способны выдержать. Эти модели дадут возможность предсказать свойства будущего изделия после той, или иной обработки, что является ключевым моментом для их сертификации [5].

Фуад Хошнава — старший преподаватель школы инженерии и устойчивого развития De Montfort University, доктор философии в области машиностроения и производства, занимается исследованиями в области металлургии, сварки, коррозии, а также 3D печати. В 2020 году он опубликовал статью, в которой рассматривает влияние серебра на механические свойства сплава Ti5Al2,5Fe в порошковой металлургии [6].

Большое внимание также привлекают к себе 3D принтеры со встроенной системой ЧПУ для пост-обработки. Пост-обработка имеет огромное, и даже ключевое значение в процессе изготовления изделия с помощью 3D печати. В основном она используется для улучшения эстетики изготавливаемых деталей и усовершенствования их свойств, например, чтобы сделать поверхность более гладкой или отжечь деталь, чтобы повысить ее прочность и оптимизировать сопротивление. Некоторые методы постобработки можно использовать в любом процессе 3D-печати, другие зависят от конкретной технологии. Ведь, с деталями, изготовленными данным способом, нужно обращаться с особым подходом: стандартные методы могут не подойти. Поэтому постобработка является важным аспектом, который следует учитывать при планировании использования этих технологий.

Стоимость постобработки может составлять почти треть стоимости производства 3D-печатной модели. Согласно отчету аналитического издательства Wohlers Report за 2018 год, 27% общих затрат на производство модели относятся к затратам, связанным с пост-обработкой. Можно выделить пять основных шагов пост-обработки: очистка, корректировка, закалка, отделка поверхности и покраска. Но как было упомянуто выше, существуют разработки, совмещающие 3D печать с пост-обработкой в одном станке и избавляющие от больших дополнительных затрат. В качестве примера мы можем рассмотреть станок Discovery 3D Printer испанского производителя CNC Barcenas. Технология FFF (Fused Filament Fabrication), используемая в установках Discovery 3D Printer, – полный аналог FDM (Fused Deposition Modeling – моделирование методом послойного наплавления). Это более доступная аддитивная технология. Высокая производительность, изготовление крупногабаритных изделий и сравнительно небольшая стоимость оборудования и расходных материалов – вот её преимущества. Этот метод имеет и недостатки: получается самая большая степень шероховатости среди всех методов, также имеется риск растекания пластика и повышенная чувствительность к перепадам температур. Однако оснащение принтера фрезой компенсирует первый недостаток и сразу обработает деталь до нужной шероховатости.

Ассортимент расходных материалов, использующихся в этом принтере, очень разнообразен и дает возможность выбрать наиболее подходящие материалы по физико-механическим свойствам или их композиты - ABS, PLA, нейлон, поликарбонаты, полиамиды, полистирол, полиэтилен и многие другие [7].

Еще одним решением сразу нескольких задач является Pentapod CNC Machines. 5-осевой станок с ЧПУ Pentapod и промышленный 3D-принтер SEAMHex (рисунок 2), интегрируют робототехнику и традиционные инструменты для создания передовых станков с ЧПУ для точной обработки и 3D-печати.



Рисунок 2. Discovery 3D Printer

Уникальная конструкция Pentapod (рисунок 3) позволяет выполнять динамичную обработку с ЧПУ, сохраняя при этом высокую точность. Связано это с конструкцией икосаэдра, которая придает машинам такую высокую жесткость. Существует две серии машин: серия Р и серия РМ. Серия Р — это стационарный обрабатывающий центр различных размеров. Серия РМ — это обрабатывающий робот, подходящий для мобильной обработки крупных компонентов.



Рисунок 3. Pentapod CNC Machines

Это и есть главное отличие этих станков от остальных. До этих пор концепция обработки заключалась в том, что заготовка перемещается к инструменту на столе станка. На этих станках для 5-осевой обработки требуется только движение шпинделя. С одной стороны, это обеспечивает высокую динамику обработки, поскольку перемещается только вес шпинделя станка, а не детали, которая обычно весит больше. С другой стороны, такая пяти-осевая конструкция станка представляет собой параллельную кинематическую систему, позволяющую наклонять шпиндель до 90 градусов. Это открывает станкам с ЧПУ новые производственные возможности и стратегии. В сочетании с поворотным столом можно изготовить целую деталь с помощью 6-осевой обработки. Все это может быть оснащено еще и линейной осью стола станка для обеспечения 7-осевой обработки [8].

Другим новым направлением в аддитивном производстве являются технологии прямого энергетического осаждения (Direct Energy Deposition - DED), к которым относится технология аддитивного производства проволоочной дугой (WAAM), основанная на процессе GMAW (газо-металлическая дуговая сварка). Процесс WAAM начинается с программирования трехмерной модели объекта, которая затем разбивается на слои. Затем робот или манипулятор с помощью сварочного горелочного устройства перемещается по заданному пути, плавя и нанося слой металлической проволоки на предыдущий слой. К сведению, посмотрим другие виды 3D печати.

1. Фотополимерная печать: Этот метод использует светочувствительные жидкие полимеры, которые затвердевают при воздействии ультрафиолетового света. Лазер или проектор создает слои полимера на платформе, и каждый слой затвердевает, когда на него попадает свет.

2. Стереолитография: Этот метод также использует фотополимеры, но вместо лазера или проектора он использует ультрафиолетовый лазер, чтобы точно затвердевать полимер. Лазер сканирует поверхность жидкого полимера, создавая тонкий слой, который затвердевает при воздействии света. Затем платформа опускается на небольшую величину, и процесс повторяется для создания следующего слоя.

3. Отложение расплавленного материала (FDM): Этот метод использует пластиковый или металлический филамент, который нагревается до расплавленного состояния и затем откладывается слой за слоем для создания трехмерной модели. Головка печати перемещается по платформе, выдавая тонкую струю расплавленного материала, который затем охлаждается и затвердевает.

4. Селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering, SLS) - используется лазер для спекания или слияния тонких слоев порошкового материала, обычно пластика или металла. Процесс SLS начинается с распределения тонкого слоя порошка на рабочую платформу. Затем лазер сканирует этот слой, нагревая и спекая порошок в точках, где он должен слиться и образовать трехмерную модель.

Существуют и другие виды, но особенностью технологии WAAM является высокая скорость печати более крупных и сложных изделий. Однако существуют сложности с обеспечением качества и стабильности процесса. Здесь на помощь и приходит гибридизация

аддитивных технологий с механической обработкой, о чем было упомянуто выше.

Компания Monocrom разработала проект Comsenso. Основной его целью является разработка новой технологии аддитивного производства металлических компонентов на основе лазерной технологии WAAM (L-WAAM), которая позволит решить основные трудности, с которыми сталкивается АМ. Например, достижение высокой производительности и гарантии производства изделий из нескольких материалов без дефектов. В частности, в рамках проекта системы, состоящие из нескольких материалов, таких как сталь/инвар и нержавеющая сталь/инконель, будут предназначены для авиационного и механического секторов, хотя разработки будут экстраполированы на многие другие отрасли (железнодорожный транспорт, энергетика и т. д.). COMSENSO намерен достичь следующих технических целей:

1. Развитие процесса L-WAAM:

а. Разработка нового мощного диодного лазерного источника с оптоволоконном.

б. Разработка головки L-WAAM, позволяющей совмещать лазерный луч с электрической дугой.

в. Разработка процесса внедрения датчиков ВБР (волоконная брегговская решетка) в изготавливаемые детали для контроля в течение срока службы.

2. Разработка цифровой платформы L-WAAM:

а. Создание цифрового двойника изготавливаемой детали.

б. Разработка системы онлайн-мониторинга и управления технологическими процессами, основанной на захвате и анализе изображений, полученных с помощью инфракрасной камеры.

в. Разработка интеллектуальной системы помощи, способной прогнозировать появление возможных дефектов в детали.

3. Разработка интегрированной ячейки L-WAAM:

а. Изготовление демонстратора.

б. Технико-экономический анализ решения.

в. Анализ жизненного цикла продукта [9].

На основе этой же технологии компания Rheinmetall представила аддитивную мобильную фабрику для восстановления военной техники. Пост-обработку и финишную отделку она выполняет сразу на месте, благодаря встроенному фрезерному оборудованию с ЧПУ. Система производит детали до 700 мм в диаметре и до 450 мм в высоту. Скорость осаждения металла составляет до 600 см³/ч. Использоваться могут любые свариваемые проволоки и полимеры [10].

Мы увидели достаточно много примеров серьезных достижений в 3D печати, но инновации, которые продолжают появляться на свет благодаря не прекращающимся исследованиям ученых, не перестают удивлять. Немецкие ученые Кай Мельде, Хейнер Кремер, Минхуей Ши, Сенне Сенек и др. представили разработку, благодаря которой 3D-печать возможна с помощью ультразвуковых волн. То есть фигуру, можно создать целиком одновременно, а не производить наплавление слой за слоем. Акустические голограммы создают звуковое поле, которое воздействует на материал и движет им [11].

3D-печать дала направление и позволила совершить прорыв и в материаловедении. Были созданы, так назы-

ваемые, «умные» материалы. Они могут менять свои свойства или поведение в ответ на такие факторы окружающей среды, как температура, давление, свет или магнитные поля. Невероятно то, что эти изменения могут произойти в течение нескольких секунд или миллисекунд. Интеллектуальные материалы можно использовать в процессах 3D-печати, таких как стереолитография (SLA) и моделирование наплавлением (FDM), для создания объектов с памятью формы. Эти материалы удовлетворяют требованиям пользователя, невероятно адаптируются и предоставляют безграничные возможности. Существует несколько видов умных материалов, каждый из которых обладает особыми качествами и возможностями применения, например сплавы с памятью формы (SMA) — это интересные металлы с удивительной способностью «запоминать» свою первоначальную форму. Поэтому, если они деформированы, им можно восстановить первоначальную форму путем нагревания или охлаждения. Феррожидкость — это вещество, состоящее из мельчайших магнитных частиц, плавающих в жидкости. Частицы выравниваются и придают веществу жесткость, когда оно подвергается воздействию магнитного поля. Магнитореологические (МР) жидкости состоят из мельчайших намагничивающихся частиц. Однако по сравнению с феррожидкостями частицы магнитореологического (МР) материала больше. Эти материалы часто используются в тормозах и адаптивных системах демпфирования. Электроактивные полимеры (ЕАР) под воздействием электрического поля, являющиеся интеллектуальными материалами, изменяют свою структуру, размер или объем. Они интересны своей замечательной гибкостью, высокой нагрузочной способностью и быстрым временем реакции. Их можно использовать в мягкой робототехнике, технологиях сбора энергии и искусственных мышцах. Электроактивные полимеры имеют малый вес, низкое энергопотребление и совместимы с различными производственными процессами, что делает их более выгодными по сравнению с обычными приводами. Пьезоэлектрические материалы могут преобразовывать механическую энергию в электрическую и наоборот. Они обычно используются в датчиках, исполнительных механизмах, преобразователях и устройствах сбора энергии. Они вызывают разделение электрических зарядов при приложении механического напряжения, тогда как электрическое поле вызывает механическую деформацию. Хотя существуют природные и искусственные пьезоэлектрические материалы, обычно используются искусственные материалы, такие как цирконат-титанат свинца (ЦТС), из-за их высокой чувствительности и выходных сигналов. Хромогенные материалы способны изменять свой цвет или оптические характеристики в ответ на различные внешние раздражители, включая электрические поля, тепло, свет и механические воздействия. Известный пример — солнцезащитные очки с фотохромными линзами, которые темнеют под воздействием ультрафиолета. Хромогенные материалы используются в защитных чернилах, термочувствительных красках и «умных окнах», а также в некоторых других приложениях [12].

Да, технология 3D-печати значительно продвинулась за последние годы, но на сегодняшний день все еще существует множество проблем, которые требуют дальнейшего развития и исследований. Также необходимо

учитывать устойчивые методы и потенциальное влияние 3D-печати на общество. Например, одна из трудностей состоит в ограниченности доступных по цене высокопрочных и жаропрочных материалов. Несмотря на значительный прогресс в разработке новых материалов для 3D-печати, все еще существует необходимость в дополнительных исследованиях высокопрочных и устойчивых к высоким температурам материалов, более доступных для широкого использования. Исследования воздействия 3D-печати на окружающую среду являются также ограниченными. Будущие исследования должны быть сосредоточены на разработке экологически чистых материалов и внедрении моделей экономики замкнутого цикла.

4. Выводы

Современные достижения в аддитивном производстве предоставляют уникальные возможности для создания изделий со сложными конструкциями при еще более выгодных условиях, ускоренных темпах и уменьшенных затратах. Это открывает новые перспективы в производстве изделий, которые ранее были сложными или невозможными для изготовления традиционными методами.

Аддитивное производство обладает потенциалом для увеличения эффективности и экономичности производства. Оно позволяет сократить время и затраты на производство деталей, а также уменьшить отходы материалов. Кроме того, аддитивное производство может быть использовано для создания индивидуальных и сложных деталей, которые ранее требовали длительного и дорогостоящего процесса.

Однако, для успешного внедрения аддитивного производства в Казахстане необходима соответствующая система подготовки квалифицированных специалистов. Также важно проводить исследования и разработки в этой области дальше, чтобы улучшить качество и надежность процесса аддитивного производства.

Развитие аддитивного производства в Казахстане может способствовать подъему уровня отечественной промышленности, снижению зависимости от импорта и повышению конкурентоспособности страны на мировом рынке.

Картина по положению аддитивного производства в целом показывает, что наблюдается быстрый рост исследований в области 3D-печати. Однако были признаны ограничения исследований, поскольку все еще существует огромное пространство для проведения дальнейших экспериментов. В некоторых случаях исследователи не предоставили достаточных объяснений и подробностей, а многие исследования были сосредоточены только на ограниченном круге материалов, при недостаточной информации, отсутствии углубленного изучения и меньшем количестве образцов, что снижает общее понимание последовательности экспериментов. Ожидается, что аддитивное производство будет продолжать развиваться и совершенствоваться, но потребуются некоторое время, чтобы преодолеть проблемы, особенно те, которые связаны со стоимостью и скоростью 3D-печати. Поскольку технология становится более эффективной, быстрой и экономически выгодной, она станет более доступной для более широкого круга пользователей во всем мире. Кроме того,

отрасль сосредоточится на устойчивом развитии, разработке экологически чистых материалов и внедрении моделей экономики замкнутого цикла. В заключение можно сказать, что будущее аддитивного производства выглядит многообещающим, и будет интересно наблюдать за появлением инноваций в ближайшие годы.

References / Литература

- [1] Kompleksnyj plan po razvitiyu mashinostroitel'noj otrasli Respubliki Kazakhstan na 2024-2028 gody. (2023). Retrieved from: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjv2bm3g82BAxVysfEDHQzODXE-QFnoECCwQAQ&url=https%3A%2F%2Flegalacts.egov.kz%2Fapplicacion%2Fdownloadconceptfile%3Fid%3D14589126&usg=AOvVaw3oYRdHVMKLfTs-VWO3jil_&opi=89978449
- [2] Statista. (2022). Mechanical engineering in the United States - market size 2006-2020. Retrieved from: <https://www.statista.com/statistics/263280/size-of-the-us-market-for-mechanical-engineering/>
- [3] Rasiya, G., Shukla, A.A. & Saran, K. (2021). Additive Manufacturing-A Review. *Materials Today: Proceedings*, 47, 6896–6901. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.181>
- [4] Davidenko, A.A. (2017). Additivnoe proizvodstvo nabiraet oboroty. *Zhurnal «Additivnye tehnologii»* 1, 24-28
- [5] Donaldson, A.A. (2023). NASA Awards Advance 3D Printing, Quantum Tech for Climate Research. Retrieved from: <https://www.nasa.gov/spacetechnology>
- [6] Ridvan Yamanoglu, Khoshnaw, F., Daoud, I. & Erdinc Efendi. (2020). Effect of silver content on the wear and mechanical properties of powder metallurgical Ti-5Al-2.5Fe-xAg alloys. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B*, 56(1), 119–125. <https://doi.org/10.2298/jmmb190319056y>
- [7] Super Discovery 3D Printer. (2023). Retrieved from: <https://discovery3dprinter.com/en/super-discovery-3d-printer-2/#~:text=Super%20Discovery%203D%20Printer%20is,pieces%20with%20last%20generation%20thermoplastics>
- [8] CNC Machines for milling and 3D Printing. (2023). Retrieved from: <https://metrom.com/>
- [9] COMSENSE. New laser-assisted WAAM technology for metal components. (2023). Retrieved from: <https://www.monocrom.com/en/comsenso-new-laser-assisted-waam-technology-for-metal-components/>
- [10] Rheinmetall predstavlyaet additivnuju mobil'nuju fabriku dlja vosstanovleniya voennoj tehniki. (2023). Retrieved from: <https://www.3dpulse.ru/news/promyshlennost/rheinmetall-predstavlyaet-additivnuju-mobilnuyu-fabriku-dlya-vosstanovleniya-voennoj-tehnik>
- [11] Melde, K., Kremer, H., Shi, M., Seneca, S., Frey, C., Platzman, I., Degel, C., Schmitt, D., Schoelkopf, B. & Fischer, P. (2023). Compact holographic sound fields enable rapid one-step assembly of matter in 3D. *Science Advances*, 9(6), ead6182. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adf6182>
- [12] Iftekar, S. F., Aabid, A., Amir, A. & Baig, M. (2023). Advancements and Limitations in 3D Printing Materials and Technologies: A Critical Review. *Polymers*, 15(11), 2519. <https://doi.org/10.3390/polym15112519>

Қазақстан Республикасының машина жасау саласы үшін заманауи қосымша өндірістің өзектілігі мен артықшылықтары

Е.З. Нугман, Л.И. Шова*

Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: showa.liya@gmail.com

Андатпа. Мақалада Қазақстан Республикасының машина жасау саласының өзекті мәселелері қаралды, секторлар бойынша машина жасау өнімдерінің импорты мен экспортының көрсеткіштері бойынша деректерге талдау жүргізілді және авторлардың пікірінше, осы проблемаларды шешудің ең жақсы тәсілдері – аддитивті өндірісті енгізу және дамыту келтірілді. Аддитивті технологияның артықшылықтары мен олардың кемшіліктері қаралды, олар шектеулерді азайту немесе жою мақсатында қосымша зерттеулер мен эксперименттерді қажет етеді. Ең жаңа әзірлемелер мен ең жетілдірілген 3D басып шығару технологиялары қарастырылған. Бір жүйеде 3D басып шығаруды және кейінгі өңдеуді байланыстыратын станоктардың модельдері ұсынылған. Сондай-ақ L-WAAM технологиясы, цифрлық егіздер, 3D басып шығаруды ультрадыбыстық толқындардың көмегімен жасауға болатын 3D басып шығаруды дамыту нәтижесінде пайда болған материалтану инновациялары және осы саладағы басқа зерттеулер мен өнертабыстар қарастырылады. Сондай-ақ, осы бағыттағы зерттеулермен айналысатын ғалымдар мен институттарға шолу жасалды, мысалы, модельдік біліктілік және қоспа өндірісін сертификаттау, материалды таңдау және т.б., сондай-ақ компаниялар процестің өзін дамыту, цифрлық платформаны, сондай-ақ L-WAAM интеграцияланған ұяшығын дамыту сияқты барлық салаларда технологияларды жетілдіру үшін әзірлеген жобаларға шолу жасалды.

Негізгі сөздер: Қазақстанның машина жасау саласы, аддитивті технологиялар, 3D-басып шығару, пост-өңдеу, WAAM-технологиялар, инновациялар.

Актуальность и преимущества современного аддитивного производства для машиностроения Республики Казахстан

Е.З. Нугман, Л.И. Шова*

Satbayev University, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: showa.liya@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрены актуальные проблемы отрасли машиностроения Республики Казахстан, проведен анализ данных по показателям импорта и экспорта машиностроительной продукции по секторам и приведены наиболее лучшие, по мнению авторов, возможные способы решения этих проблем – внедрение и развитие аддитивного производства. Были выделены преимущества аддитивных технологий и их недостатки, требующие дальнейших исследований и экспериментов с целью минимизировать или исключить ограничения. Рассмотрены новейшие разработки и наиболее совершенные технологии 3D печати. Представлены модели станков, соединяющие 3D печать и постобработку в одной системе. Также рассмотрены технологии L-WAAM, цифровых двойников, разработка, благодаря которой 3D печать возможна с помощью ультразвуковых волн, разобраны инновации в области материаловедения, возникшие благодаря развитию 3D печати, и другие исследования и изобретения в этой области. Также был представлен обзор на ученых и институты, занимающиеся исследованиями в этом направлении, например в вопросах модельной квалификации и сертификации аддитивного производства, выбор материала и т.д., а также проекты, разработанные компаниями для усовершенствования технологий во всех сферах, таких как развитие самого процесса, разработка цифровой платформы, а также интегрированной ячейки L-WAAM.

Ключевые слова: машиностроительная отрасль Казахстана, аддитивные технологии, 3D-печать, постобработка, WAAM-технологии, инновации.

Received: 19 October 2023

Accepted: 16 March 2024

Available online: 31 March 2024