

DOI: 10.34220/2311-8873-2024-10-19



УДК 621.77.04

UDC 621.77.04

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ НАУКОЕМКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ

✉¹ **Норман Анна Валерьевна**, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения», Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: annya_p@mail.ru

Кириллов Олег Николаевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения», Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж.

Куц Вадим Васильевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование», Юго-Западный государственный университет, г. Курск.

Аннотация. Обоснована актуальность применения аддитивных технологий в условиях современного производства. Предложен алгоритм выполнения топологической оптимизации конструкции изделия. Рассмотрены различные направления применения данных технологий и показана эффективность их внедрения на производстве.

Ключевые слова: АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, 3D-ПЕЧАТЬ, ГЕНЕРАТИВНЫЙ ДИЗАЙН, ОПТИМИЗАЦИЯ, ФОРМА, МАССА, СТРУКТУРЫ.

¹ Автор для ведения переписки

FEATURES OF THE APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE MANUFACTURE OF HIGH-TECH PRODUCTS AT MACHINE-BUILDING ENTERPRISES

✉¹ **Norman Anna Valeryevna**, candidate of technical sciences, associate professor of the department of Mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: annya_p@mail.ru

Kirillov Oleg Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, professor of the department of Mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, Voronezh.

Kuts Vadim Vasilyevich, doctor of technical sciences, professor, professor of the department of Mechanical engineering technologies and equipment, South-Western state university, Kursk.

Annotation. The relevance of the application of additive technologies in modern production conditions is substantiated. An algorithm for performing topological optimization of the product design is proposed. Various directions of application of these technologies are considered and the effectiveness of their implementation in production is shown.

Keywords: ADDITIVE TECHNOLOGIES, 3D PRINTING, GENERATIVE DESIGN, OPTIMIZATION, SHAPE, MASS, STRUCTURES.

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В условиях значительного развития современной промышленности [1], основанного на формировании и становлении новой модели производственно-технологической системы, наблюдается существенное смещение акцента с традиционного подхода к процессу формообразования в сторону нетрадиционных, в частности, аддитивных технологий.

Аддитивные технологии, также известные как 3D-печать, представляют собой процесс создания трехмерных объектов путем последовательного нанесения слоев материала на основе цифровой модели. В отличие от традиционных, вычитающих технологий формообразования, аддитивные технологии, путем добавления материала слой за слоем вместо удаления или обработки материала, позволяют создавать сложные геометрические формы без необходимости использования сложных инструментов или процессов. При этом создаваемый объект отличается высокой степенью точности и детализации [2].

Такой переход особенно актуален для авиационной, аэрокосмической промышленности, оборонно-промышленного комплекса, автомобильного машиностроения и других наукоемких отраслей [3].

2 Материалы и методы

Активное использование аддитивных технологий позволит повысить качество деталей, особенно сверхсложных элементов, например, точных элементов классических автомобилей или шасси самолетов, сертификационные требования к которым очень высоки [4].

Кром того, результаты расчетов рентабельности внедрения аддитивных технологий на ОАО «КБХА» по ряду изделий показали следующие результаты, представленные в табл. 1. Также наблюдается значительное повышение эффективности производства за счет сокращения времени изготовления изделий и снижения себестоимости производства [4, 5].

К основным преимуществам аддитивных технологий [6-10], в отличие от традиционных, можно отнести:

1) Скорость. 3D-печать позволяет сократить время изготовления сложной детали, выполняемой в течение месяца, до нескольких часов, при этом зачастую исключают последующую дополнительную механическую обработку. А создание прототипов изделий позволяет сократить время и затраты на разработку и тестирование новых моделей, что позволяет новому продукту быстро освоить рынок и повысить конкурентоспособность [11-13].

Таблица 1 – Показатели внедрения аддитивных технологий

Показатели	Значение
Уменьшение цикла изготовления изделия	в 5 раз
Сокращение сроков подготовки производства	в 2-5 раз
Снижение стоимости производства	в 5- 6 раз
Сокращение времени изготовления изделия	на 80-90 %
Повышение коэффициента использования материала	70-90 %

2) Безотходность. Аддитивные методы позволяют повторно использовать отработанный материал и материал, полученный в результате переработки деталей, попавших в брак.

3) Индивидуальность. Аддитивные технологии являются ключевым инструментом, который позволяет реализовывать эксклюзивные, индивидуальные проектные решения, адаптированные под конкретные потребности потребителя. Особенно важно и актуально это для машиностроения, при производстве наукоемких изделий с уникальными параметрами [14].

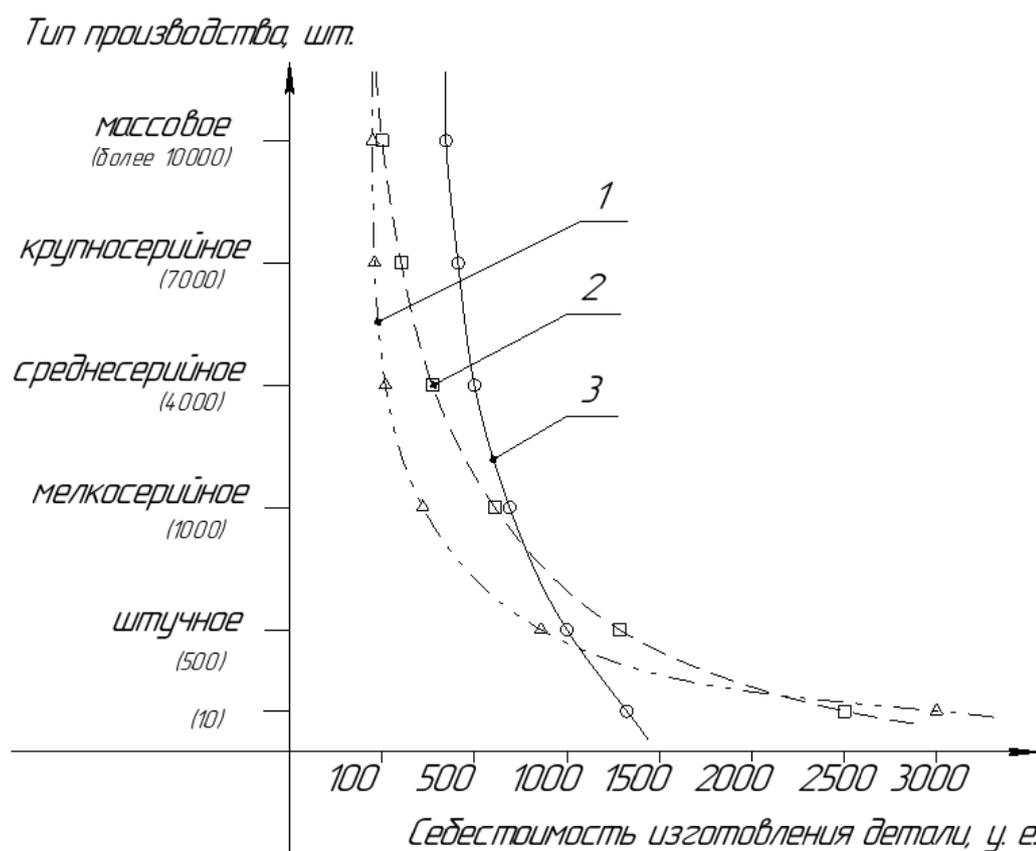
4) Качество соединений. Рассматриваемая технология обеспечивает возможность получения изделия с уникальными свойствами, без сварных соединений, швов и стыков.

5) Оптимизация дизайна. Позволяет оптимизировать форму и структуру изделий, улучшая их функциональность и эффективность. Такой подход позволяет инженерам создавать сложные и точные изделия с высокой степенью детализации, снижать их вес и материалоемкость, а также улучшить механические свойства.

6) Повышение качества готовых изделий. Детали, полученные на 3D-принтере, благодаря послойному построению, обладают повышенными механическими свойствами (плотность, остаточное напряжение и др.), значительно превосходящими свойства литых изделий, подверженных механической обработке [11, 12].

7) Адаптивность и мобильность. Поскольку аддитивные технологии базируются на электронных моделях, полученных с помощью САПР, то такая информация легко изменяется - адаптируется под различные производственные условия, а время ее передачи, в процессе обработки, практически сводится к нулю [15].

8) Низкая себестоимость. Аддитивные технологии предполагают высокий коэффициент использования материала, что существенно снижает не только потери сырья, но и затраты, связанные с последующей механической обработкой. Кроме того, необходимо отметить низкую себестоимость изделий, в том числе наукоемких, со сложной геометрической формой, выпускаемых небольшими партиями (рис. 1). Снижение затрат на изготовление, в данном случае, обусловлено отсутствием дорогостоящей оснастки, необходимой для формообразования заготовки, а также отсутствием необходимости выполнения сложной механической обработки лезвийным инструментом.



1 – обработка давлением; 2 – метод литья; 3 – аддитивная технология

Рисунок 1 – График влияния типа производства на себестоимость изготовления детали при различных методах

К недостаткам аддитивных технологий в машиностроении можно отнести:

1) Ограничения по выбору материалов. Не все материалы отвечают требованиям совместимости с процессом печати.

2) Ограничения по габаритно-массовым характеристикам. Аддитивные установки, зачастую имеют ограниченную область печати, что вызывает некоторые трудности при производстве крупногабаритных металлических изделий.

3) Стоимость оборудования и расходных материалов. Необходимость использования специализированного оборудования и материалов, его приобретение и обслуживание может предполагать необходимость вливания значительных дополнительных инвестиций.

Между тем, в зависимости от конечного результата, данные технологии находят широкое применение в различных направлениях:

- изготовление деталей-шаблонов, используемых для контроля конечного изделия;
- изготовление пресс-форм для производства изделий методом литья;
- изготовление конечного продукта – прямое цифровое производство;
- производство прототипов, позволяющих быстро и точно изготовить модели деталей или изделий для проверки их функциональности и эргономики;
- ремонт и восстановление деталей [16];
- использование аддитивных технологий в комплексе с генеративным дизайном.

Новым актуальным направлением использования аддитивных технологий является генеративный дизайн, который в последнее время приобретает все большую популярность среди конструкторов, инженеров и дизайнеров. Основная идея генеративного дизайна заключается в готовом оптимизированном решении, которое формирует программа на основе требуемых параметров и ограничений, заданных пользователем.

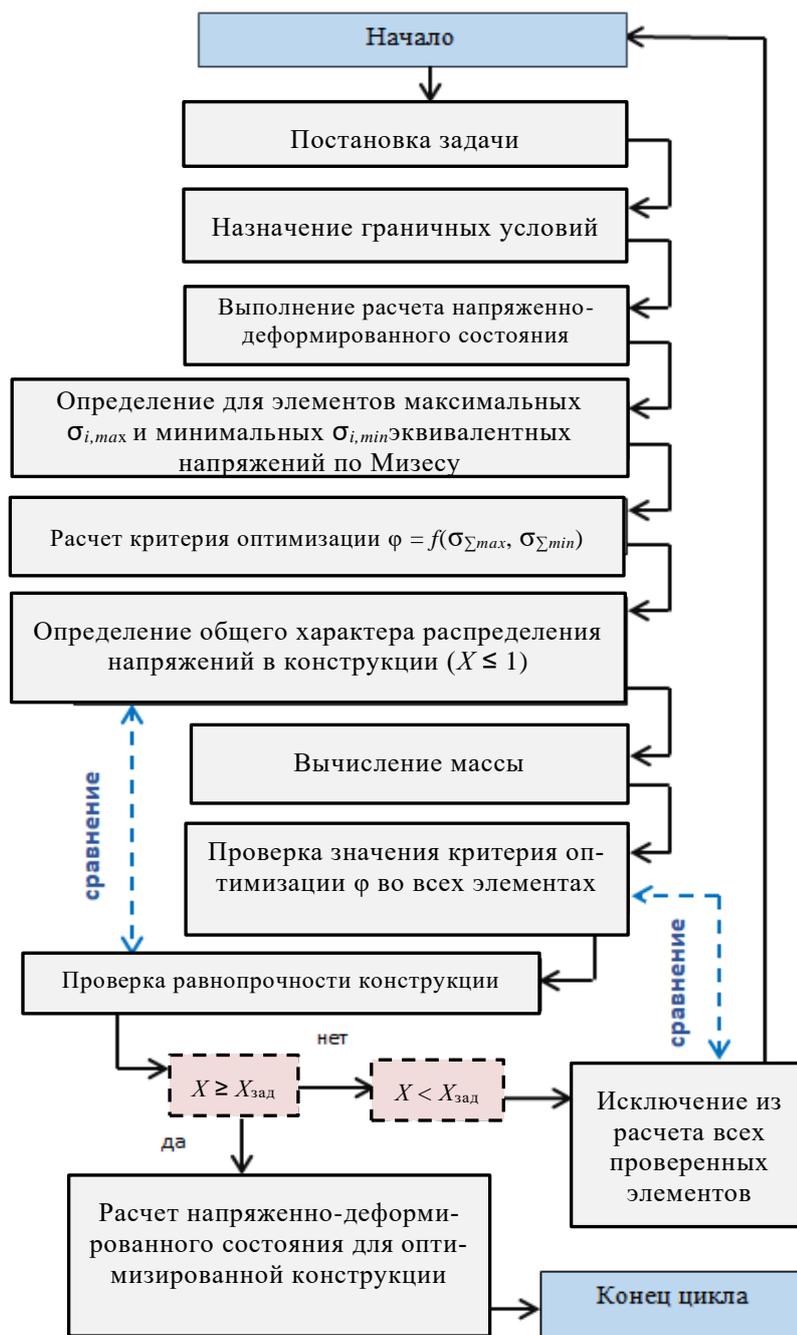
3 Результаты исследований

Различают несколько направлений генеративного дизайна.

1. Топологическая оптимизация. Она заключается в проектировании облегченной детали, конфигурация которой получена как результат вычитания из первоначального объема детали материала, воспринимающего незначительные нагрузки, при условии сохранения заданной прочности и жесткости [17, 18]. Алгоритм выполнения топологической оптимизации представлен на рис. 2.

После оптимизации деталь приобретает сложную пространственную форму, существенно снижающую технологичность конструкции изделия, что существенно ограничивает возможность использования типовых технологических процессов (рис. 3).

Эта проблема решается с использованием альтернативы применения традиционных технологий изготовления изделий из литых заготовок с последующей механической обработкой, которой являются аддитивные технологии. Примером является широко распространенный способ селективного лазерного сплавления, у которого практически отсутствуют ограничения, связанные с конфигурацией.



$\sigma_{i,max}$, $\sigma_{i,min}$ – максимальное и минимальное эквивалентное напряжение по Мизесу i -го элемента;
 $\sigma_{\Sigma max}$, $\sigma_{\Sigma min}$ – максимальное и минимальное значение интенсивности напряжений по Мизесу, найденные среди всего набора значений интенсивностей, вычисленных в центральных точках конечных элементов; $X = \sigma_{\Sigma min} / \sigma_{\Sigma max}$; $X_{зад}$ – заданное граничное значение X , превышение которого составляет зону равнопрочности

Рисунок 2 – Алгоритм выполнения топологической оптимизации конструкции изделия



Рисунок 3 – Топологическая оптимизация [19]

2. Синтез формы. В отличие от топологической оптимизации, где конструкция формы изделия оптимизируется на основе заданных формы и параметров, при синтезе происходит формирование новой конструкции с помощью искусственного интеллекта на основе более общих требований [17] (рис. 4).



Рисунок 4 – Синтез формы [17]

3. Оптимизация поверхности и структуры. Метод позволяет не только оптимизировать поверхность за счет вычитания материала, но и вносить изменения в саму структуру материала, заполняя элементы изделия оптимизируемой кристаллической решеткой (рис. 5).



Рисунок 5 – Оптимизация поверхности и структуры [20]

4. Создание трабекулярных структур, т. е. создание элементов, выполняющих механические функции и используемых как инструмент, позволяющий распределять и масштабировать мельчайшие поры по твердым материалам, например, создавая структуру шероховатой поверхности (рис. 6) [21].

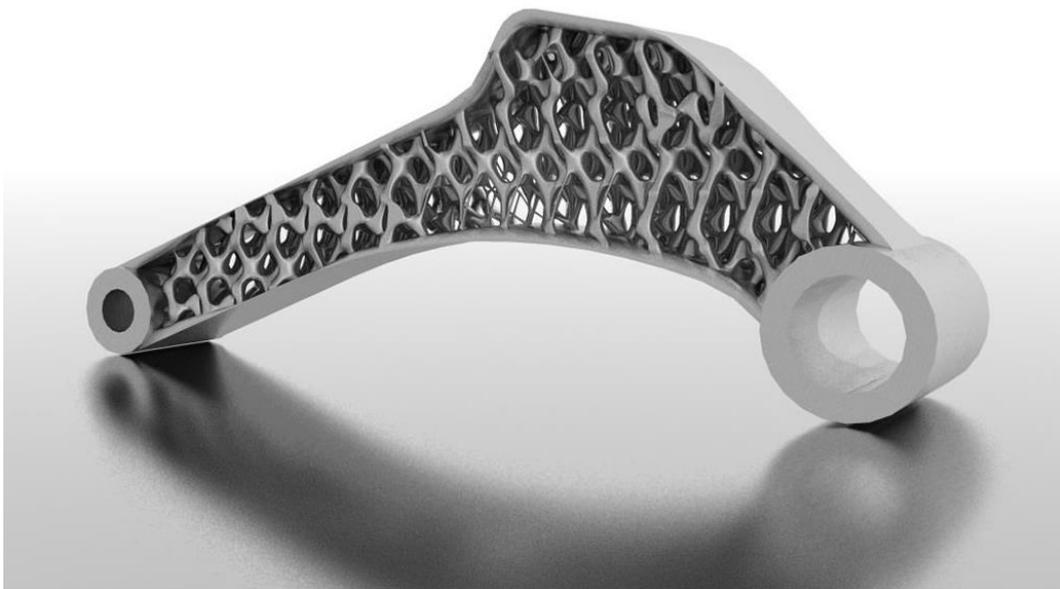


Рисунок 6 – Создание трабекулярных структур [20]

4 Обсуждение и заключение

Таким образом, метод генеративного дизайна, основанный на минимизации площади поверхности, массы, объема опоры, перегрева или времени печати, является важным направлением проектирования для аддитивного производства, позволяющим произвести комплексную оптимизацию конструкции изделия.

Внедрение аддитивных технологий совместно с генеративным дизайном способствует синергетическому эффекту, заключающемуся, во-первых, в значительном сокращении сроков

проектирования и изготовления изделия, времени и затрат связанных с разработкой новых продуктов, и, во-вторых, в одновременном с этим более эффективным использовании ресурсов, ускорению рабочих процессов примерно в 1,2 - 1,3 раза, снижению отходов. Такие возможности обеспечивают снижение веса изделий при заметном улучшении требуемых параметров их конструкций, что особенно важно для машиностроительной и, прежде всего, аэрокосмической промышленности.

Список литературы

- 1 Кириллов, О.Н. Технология комбинированной обработки непрофилированным электродом. Монография. Воронеж: ВГТУ, 2010. – 254 с.
- 2 Глеб Туричин: «Лазерные технологии — один из драйверов Индустрии 4.0». - <https://regnum.ru/article/3602951> [Дата обращения: 25 июня 2024.].
- 3 Шендрикова, О.О. Новые реальности применения систем автоматизированного проектирования для изготовления перспективных изделий / О.О. Шендрикова, С.С. Юхневич, А.А. Витковская, А.К. Севостьянов // «Качество в производственных и социально-экономических системах» сб. науч. тр. 8-й Междунар. науч.-техн. конф. 2020. Курск. ЮЗГУ. – 2020. – С. 447-45.
- 4 Левин, Д. Ю. Анализ данных коммуникации с инженерами промышленных предприятий как средство обеспечения качества внедрения инноваций в области проектирования / Д.Ю. Левин, А.А. Болдырев, А.В. Норман // Проблемы социальных и гуманитарных наук. – Воронеж: ВГТУ, 2023. – С. 151-156.
- 5 Шендрикова, О. О. Система менеджмента качества высокотехнологичных и наукоемких промышленных предприятий/ О. О. Шендрикова, А. В. Красникова, И. И. Черепанцева, А. К. Севостьянов // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Сб. науч. ст. Всероссийской науч.-техн. конф. Воронеж, 2023. С. 412-422.
- 6 Гибсон, Я. Технология аддитивные производства / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер // Пер. с англ. Под ред. И.В. Шишковского – М.: Техносфера, 2016. – 656 с.
- 7 Моргунов, Ю. А. Аддитивные технологии для авиакосмической техники / Ю.А. Моргунов, Б.П. Саушкин // Аддитивные технологии. 2016. – №1. – С. 30-38.
- 8 Гришина, Е. Н. Применение аддитивных технологий в авиационно-космической отрасли / Е.Н. Гришина, О.Н. Кириллов// Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ. – Вып. 10. 2016. – С. 139-145.
- 9 Витковская, А. А. Система фотореалистичного рендеринга в среде "КОМПАС-3D" / А. А. Витковская, О. О. Шендрикова, Е. В. Котуков // Качество в производственных и социально-экономических системах: сб. науч. тр. 8-й междунар. науч.-техн. конф., Курск. – 2020. – С. 93-96.
- 10 Сухочев, Г. А. Технология машиностроения. Аддитивные технологии в подготовке производства наукоемких изделий / Г. А. Сухочев, С. Н. Коденцев, Е. Г. Смольяникова – Воронеж: Воронежский гос. технический ун-т, 2013. – 222 с.
- 11 Валетов, В. А. Новые технологии в приборостроении: учеб. пособие/ В.А. Валетов, С.В. Бобцова. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. – 120 с.
- 12 Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В.М. Довбыш // Пособие для инженеров. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. - 220 с.
- 13 Дьяченко, В. А. Материалы и процессы аддитивных технологий (быстрое прототипирование) / В. А. Дьяченко, И.Б. Челпанов, С.О. Никифоров, Д.Д. Хозонхонова. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2015. – 198 с.
- 14 Кузовкин, А. В. Методика проектирования комбинированного электроинструмента с целью изготовления по аддитивной технологии / А. В. Кузовкин, А. П. Суворов, А. В. Норман, В.И. Котуков // Современные технологии производства в машиностроении: межвуз. сб. науч. тр. / редкол. В. Г. Грицюк [и др.]; ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». – Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», Вып. 14., 2021. – С. 129 - 138.
- 15 Норман, А. В. Применение систем автоматизированного проектирования в машиностроении / А. В. Норман, В.С. Перелыгин, Н.А. Шишкин, В.Г. Грицюк // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2020. – Вып. 13. – С. 106-111.

16 Севостьянов, А. К. Технология нанесения защитных покрытий на изделия ракетно-космической техники / А.К. Севостьянов, Ю.С. Гончарова, С.С. Юхневич, О.Н. Кириллов // «Качество в производственных и социально-экономических системах» сб. науч. тр. 8-й Междунар. науч.-техн. конф. 17 апреля 2020. Курск. – ЮЗГУ. – 2020. – С. 349-353.

17 Генеративный дизайн в 3D-печати. <https://globatek.ru/blog/cases/generat-design-v-3d-pechat> [Дата обращения: 25 июня 2024].

18 Брюхова, К.С. Алгоритм топологической оптимизации на основе метода ESO / К.С. Брюхова, П.В. Максимов // Международный научно-исследовательский журнал. - №9 (51). - Ч. 2. – 2016. – С. 16-18.

19 <https://mtorbit.ru/hobbi-uslugi/promyshlennyy-razdel/3d-pechat/detali-sohraneniya-sostoyaniya-sostava-veschestva-termodinamicheskoy-sistemy/kronshteyny-optimizaciya-ispolzovaniya-materiala-uluchshenie-topologii-razrabotka-3d-pechat-perm/>

20 Интеллект, изменивший нашу жизнь: генеративный дизайн / <https://www.techinsider.ru/design/468212-intellekt-izmenivshiy-nashu-zhizn-generativnyy-dizayn/?ysclid=lxvsqwm5w5250985995> [Дата обращения: 25 июня 2024.].

21 <https://www.pinterest.ru/pin/791789178218617001/> [Дата обращения: 25 июня 2024.].

References

1 Kirillov, O.N. Technology of combined processing with a non-profiled electrode. Monograph. Voronezh: VSTU, 2010. – 254 p.

2 2 Gleb Turichin: “Laser technologies are one of the drivers of Industry 4.0.” -- <https://regnum.ru/article/3602951> [Date of access: June 25, 2024].

3 Shendrikova, O.O. New realities of using computer-aided design systems for the manufacture of promising products / O.O. Shendrikova, S.S. Yuhnevich, A.A. Vitkovskaya, A.K. Sevostyanov // “Quality in production and socio-economic systems” collection. scientific tr. 8th Int. scientific-technical conf. 2020. Kursk. SWSU. – 2020. – P. 447-45.

4 Levin, D. Yu. Analysis of communication data with engineers of industrial enterprises as a means of ensuring the quality of implementation of innovations in the field of design / D. Yu. Levin, A.A. Boldyrev, A.V. Norman // Problems of social and human sciences. – Voronezh: VSTU, 2023. – P. 151-156.

5 Shendrikova, O. O. Quality management system for high-tech and knowledge-intensive industrial enterprises / O. O. Shendrikova, A. V. Krasnikova, I. I. Cherepantseva, A. K. Sevostyanov // Prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering. Sat. scientific Art. All-Russian Scientific and Technical. conf. Voronezh, 2023. pp. 412-422.

6 Gibson, J. Additive manufacturing technology / J. Gibson, D. Rosen, B. Stacker // Transl. from English Ed. I.V. Shishkovsky - M.: Tekhnosphere, 2016. - 656 p.

7 Morgunov, Yu. A. Additive technologies for aerospace technology / Yu.A. Morgunov, B.P. Saushkin // Additive technologies. 2016. – No. 1. – P. 30-38.

8 Grishina, E. N. Application of additive technologies in the aerospace industry / E. N. Grishina, O.N. Kirillov // Modern production technologies in mechanical engineering: collection. scientific tr. Voronezh: VSTU. – Vol. 10. 2016. – pp. 139-145.

9 Vitkovskaya, A. A. Photorealistic rendering system in the environment "KOMPAS-3D" / A. A. Vitkovskaya, O. O. Shendrikova, E. V. Kotukov // Quality in production and socio-economic systems: collection. scientific tr. 8th Int. scientific-technical conf., Kursk. – 2020. – pp. 93-96.

10 Sukhochev, G. A. Mechanical engineering technology. Additive technologies in the preparation of production of high-tech products / G. A. Sukhochev, S. N. Kodentsev, E. G. Smolyannikova - Voronezh: Voronezh State University. Technical University, 2013. – 222 p.

11 Valetov, V. A. New technologies in instrument making: textbook. allowance / V.A. Valetov, S.V. Bobtsova. – St. Petersburg: St. Petersburg State University ITMO, 2004. – 120 p.

12 Zlenko, M. A. Additive technologies in mechanical engineering / M. A. Zlenko, M. V. Nagaitsev, V. M. Dovbysh // Manual for engineers. – M.: State Scientific Center of the Russian Federation Federal State Unitary Enterprise “NAMI”, 2015. - 220 p.

13 Dyachenko, V. A. Materials and processes of additive technologies (rapid prototyping) / V. A. Dyachenko, I. B. Chelpanov, S.O. Nikiforov, D.D. Khozonkhonova. – Ulan-Ude: Publishing house BSC SB RAS, 2015. – 198 p.

14 Kuzovkin, A.V. Methodology for designing a combined electric tool for the purpose of manufacturing using additive technology / A.V. Kuzovkin, A.P. Suvorov, A.V. Norman, V.I. Kotukov // Modern production technologies in mechanical engineering: interuniversity. Sat. scientific tr. / edit. V. G. Gritsyuk [and others]; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Technical University". – Voronezh: Publishing and Printing Center "Scientific Book", Vol. 14., 2021. – pp. 129 - 138.

15 Norman, A.V. Application of computer-aided design systems in mechanical engineering / A.V. Norman, V.S. Perelygin, N.A. Shishkin, V.G. Gritsyuk // Modern production technologies in mechanical engineering: collection. scientific tr. – Voronezh: Publishing and Printing Center "Scientific Book", 2020. – Vol. 13. – pp. 106-111.

16 Sevostyanov, A.K. Technology of applying protective coatings to rocket and space technology products / A.K. Sevostyanov, Yu.S. Goncharova, S.S. Yukhnevich, O.N. Kirillov // "Quality in production and socio-economic systems" collection. scientific tr. 8th Int. scientific-technical conf. April 17, 2020. Kursk. - SWGU. – 2020. – P. 349-353.

17 Generative design in 3D printing. <https://globatek.ru/blog/cases/generat-design-v-3d-pechat> [Accessed: June 25, 2024].

18 Bryukhova, K.S. Topological optimization algorithm based on the ESO method / K.S. Brikhova, P.V. Maksimov // International scientific research journal. - No. 9 (51). - Part 2. – 2016. – pp. 16-18.

19 <https://mtorbit.ru/hobbi-uslugi/promyshlenny-razdel/3d-pechat/detali-sohraneniya-sostoyaniya-sostava-veschestva-termodinamicheskoy-sistemy/kronshteyny-optimizaciya-ispolzovaniya-materiala-uluchshenie-topologii-razrabotka-3d-pechat-perm/>

20 Intelligence that changed our lives: generative design / <https://www.techinsider.ru/design/468212-intellekt-izmenivshiy-nashu-zhizn-generativnyy-dizayn/?ysclid=lxvsqwm5w5250985995> [Accessed date: June 25, 2024].

21 <https://www.pinterest.ru/pin/791789178218617001/> [Date of access: June 25, 2024].

© Норман А.В., Кириллов О.Н., Куц В.В., 2024