

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ /  
TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR MECHANICAL AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING**

DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2024.5.2>

**МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АДДИТИВНО-СУБТРАКТИВНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ**

Научная статья

**Агапитов А.Е.<sup>1</sup>, Салатов К.О.<sup>2</sup>, Букин А.А.<sup>3</sup>, Герасимов Е.В.<sup>4</sup>, Бинчуров А.С.<sup>5,\*</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (mexanixs[at]mail.ru)

**Аннотация**

В машиностроении одними из наиболее перспективных являются аддитивные технологии (АТ) выращивания изделий из металлов и сплавов. Они находят все более широкое применение в производстве изделий в различных отраслях машиностроения. Термин «выращивание» связан с постепенным послойным характером изготовления сложного изделия на основе его компьютерной 3D-модели. Проволочные АТ экономически более выгодные в связи с более высокой производительности процесса и, на порядок более низкой стоимости проволоки по сравнению с порошками для популярных технологий SLM и LMD. Кроме того, современной промышленностью освоен выпуск проволоки из широкой номенклатуры материалов, среди которых: алюминий, низколегированные стали, нержавеющие стали, титановые, никелевые сплавы. Недостатком проволочных АТ является более грубая поверхность выращенных изделий. В статье приведены результаты проектирования и применения многофункционального оборудования для совместного использования аддитивных и субтрактивных технологий.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, поворотный механизм, дуговая наплавка.

**MULTIFUNCTIONAL EQUIPMENT FOR IMPLEMENTATION OF ADDITIVE-SUBTRACTIVE  
TECHNOLOGIES**

Research article

**Agapitov A.Y.<sup>1</sup>, Salatov K.O.<sup>2</sup>, Bukin A.A.<sup>3</sup>, Gerasimov Y.V.<sup>4</sup>, Binchurov A.S.<sup>5,\*</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

\* Corresponding author (mexanixs[at]mail.ru)

**Abstract**

One of the most promising technologies in mechanical engineering is additive technologies (AT) for growing products from metals and alloys. They are increasingly used in the production of products in various branches of mechanical engineering. The term "growing" is associated with the gradual layer-by-layer nature of manufacturing a complex product based on its 3D computer model. Wire AT is economically more favourable due to higher productivity of the process and, by an order of magnitude lower cost of wire in comparison with powders for popular technologies SLM and LMD. Besides, the modern industry has mastered the production of wires from a wide range of materials, including aluminium, low-alloy steels, stainless steels, titanium, nickel alloys. The disadvantage of wire AT is the rougher surface of the grown products. The article presents the results of design and application of multifunctional equipment for joint use of additive and subtractive technologies.

**Keywords:** additive technologies, rotary mechanism, arc surfacing.

**Введение**

Одним из наиболее перспективных направлений развития аддитивных методов является комплексное использование методов 3D-печати и субтрактивных технологий на одном оборудовании. Примером успешного сочетания этих двух технологий является осаждение/наплавка проволоки методами электродуговой сварки, например Gas Metal Arc Welding (GMA), Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) [1], [2], в сочетании с механической обработкой резанием [3]. Обе технологии в составе спроектированного оборудования являются полностью автоматизированными процессами, использующим массивы CAD/CAM-данных. Причем в процессе наплавки сложноконтурного изделия на основе 3D-модели, можно использовать обычную стандартную (коммерческую) сварочную проволоку, которая выпускается различными производителями (в том числе отечественными) в широкой номенклатуре.

Оборудование для WAAM-технологии, как правило, представляет собой аналог 3D-принтера для печати из пластиковых нитей – Fused Deposition Modeling (FDM), но имеет несколько иной принцип плавления материала. Плавление материала проволоки происходит внутри электрической дуги в среде инертного газа. Основными недостатками WAAM-технологии является относительно высокая стоимость оборудования и недостаточная точность размеров полученной заготовки, что вызывает необходимость дополнительной обработки резанием практически всех поверхностей на металлорежущих станках. Как результат, усложнение аппаратурно-технологической схемы, трудоемкости и стоимости изделия [4], [5].

Аддитивно-субтрактивная технология подразумевает 3D- печать заготовки и последующую механическую её обработку для устранения погрешности формы, удаления дефектного слоя, повышения точности и уменьшения шероховатости поверхностей детали, к которым предъявляются повышенные требования. В настоящее время этот вид

получения деталей все чаще используется для изготовления деталей в единичном производстве макетов и прототипов для изучения особенностей конструкции, ее улучшения и последующего изготовления этих деталей методами механической обработки, например фрезерованием концевыми фрезами. При этом происходит изменение величины сил из-за изменения толщины среза и угол контакта зубьев фрезы. Эти изменения составляющих сил приводят к изменению упругой деформации системы станок – приспособление – инструмент – деталь (СПИД), появлению вибрации, особенно при резонансе, когда частота внешней нагрузки совпадает с частотой собственных колебаний, ухудшению качества обработки и уменьшению надежности работы фрез [5].

### Основные результаты

Для реализации совместного использования аддитивных и субтрактивных технологий предлагается оригинальное многофункциональное оборудование с ЧПУ, созданное по модульному принципу. На одной базе портального типа (рисунок 1, а) можно оперативно производить смену инструментальных модулей различного назначения: для наплавки (рисунок 1, в), для обработки резанием (рисунок 1, б). В конструкции установочной плиты предусмотрены технологические отверстия для точной ориентации различных инструментальных модулей относительно оси, достаточное и необходимое количество отверстий, предназначенных для монтажа и надежного закрепления инструментальных модулей. Перемещение рабочих органов по трем осям производится по направляющим и с помощью поворотных головок для наплавки и фрезерования по управляющей программе в соответствии с 3D-моделью детали.

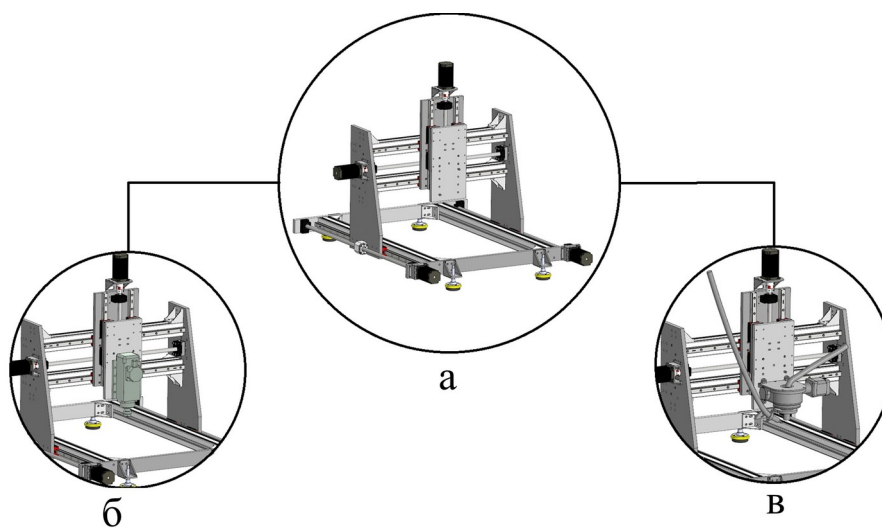


Рисунок 1 - Многофункциональное устройство с ЧПУ:

а - база портального типа; б - модуль для обработки резанием; в - модуль для обработки резанием

DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2024.5.2.1>

Конструктивное исполнение оборудования для аддитивно-субтрактивных технологий иллюстрируется изображениями, приведенными на рисунке 2. В технологиях WAAM достаточно широко применяются достаточно дорогие специализированные устройства либо производится адаптация роботов для перемещения исполнительных органов по координатам. В нашем случае, в качестве базового оборудования принята установка для дуговой наплавки алюминиевой проволоки на базе полуавтомата Янтарь МИГ 450 (АО «ЭСВА», РФ) – рисунок 2, а. Устройство наплавки состоит из: направляющей по оси Z – 1, направляющей по оси X – 2, направляющей по оси Y – 3, стола – 4, основной горелки – 5, дополнительного сопла – 6. Его недостатком является отсутствие возможности перемещения наплавляемого материала по 4-й координате. С помощью дооснащения многофункциональным устройством (описанным выше) с поворотным механизмом для наплавки, появилась возможность производить изделия с более сложной конфигурацией за счет изменения угла наклона новой головки сопла для подачи дополнительного материала алюминиевой проволоки (одновременно с подачей из основного сопла) от 30° до 60° – рисунок 2, б. Принцип работы и новая схема послыной наплавки с помощью двух подающих устройств приведены на рисунке 2, в.

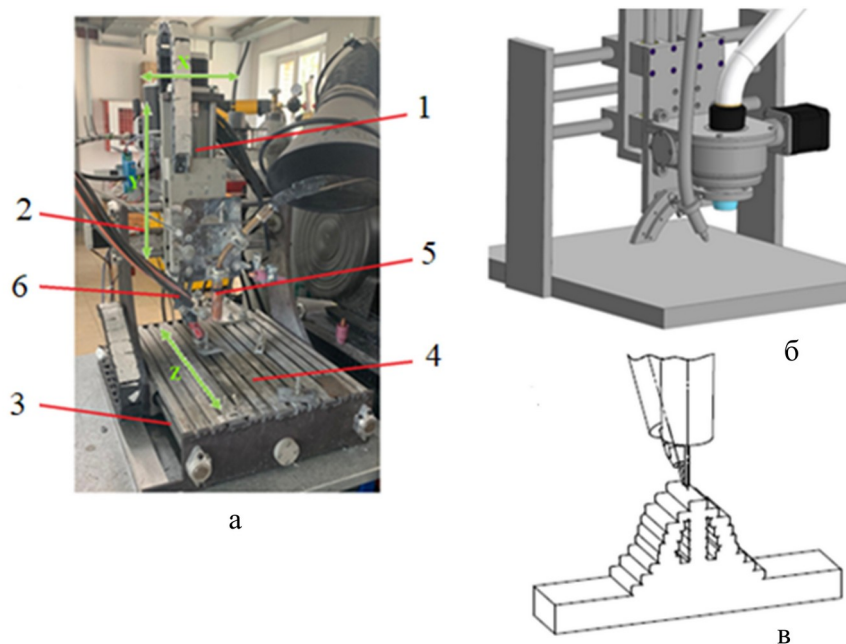


Рисунок 2 - Оборудование для WAAM:

а - установка для дуговой наплавки; б - установка с конструкцией поворотного механизма; в - схема процесса наплавки; 1 - направляющая по оси Z; 2 - направляющая по оси X; 3 - направляющая по оси Y; 4 - стол; 5 - основная горелка; 6 - дополнительное сопло

DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2024.5.2.2>

Конструкция поворотного механизма достаточно проста, что обеспечит снижение трудоемкости изготовления, эксплуатации и адаптации под конкретное производство. Основные узлы и комплектующие конструкции (приведены на рисунке 3). Поворотный механизм представляет собой червячный редуктор оригинальной(собственной) конструкции с передаточным отношением равным 10 и шаговым двигателем, позволяющим совершать поворот проволоки из дополнительного сопла за 0,25 секунды, что обеспечивает требуемую скорость нанесения материала для заполнения «пустот» между слоями материала, сформированных основным соплом.

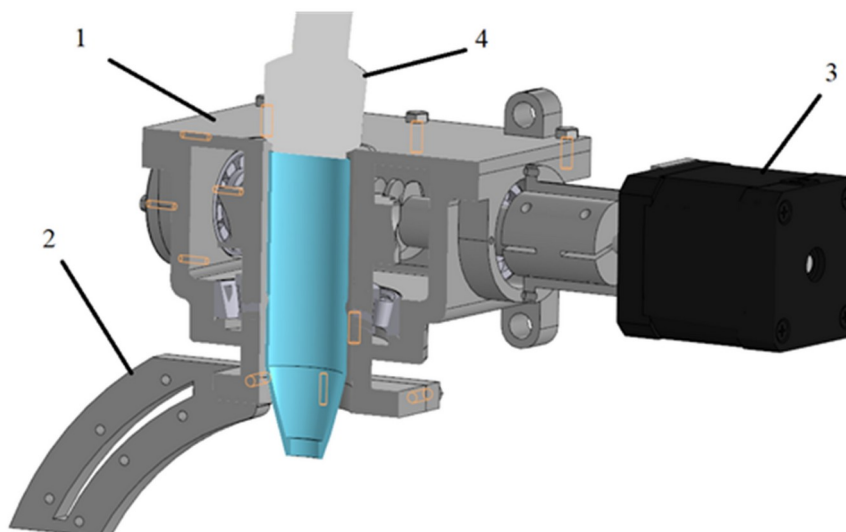


Рисунок 3 - Поворотный механизм:

1 - червячный редуктор; 2 - пластина регулировки наклона сопла с дополнительной проволокой; 3 - шаговый двигатель; 4 - горелка

DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2024.5.2.3>

### Обсуждение

Таким образом, предложенные технические решения, кроме расширения технологических возможностей 3D печати за счет дополнительных поворотных устройств (появление 4-й координаты), способствуют также повышению плотности наплавленного материала, предполагают повышение уровня прочностных свойств. В качестве подтверждения работоспособности многофункционального оборудования и возможностей реализации на нем разных

технологий формообразования можно привести пример изготовления подшипниковой опоры из проволоочного материала АМг6 ГОСТ 4784-97. На основе наплавочного модуля и метода WAAM получена заготовка изделия (рисунок 4, а) на следующих технологических режимах 3D печати: ток в диапазоне 120-160 А, скорость подачи проволоки 0,8 м/мин. На базе этой же многофункциональной установки использован инструментальный модуль для механической обработки заготовки резанием (изображение детали после обработки на рисунке 4, б). Режимы резания для чернового фрезерования: глубина резания за проход,  $t = 0,5$  мм, рабочая (минутная) подача,  $S_m = 700$  мм/мин, скорость резания,  $v = 471$  м/мин, частота вращения шпинделя,  $n = 15000$  об/мин. Режимы чистового фрезерования: глубина резания за проход,  $t = 0,1$  мм, рабочая подача,  $S_m = 400$  мм/мин, скорость резания,  $v = 565,2$  м/мин, частота вращения шпинделя,  $n = 18000$  об/мин.

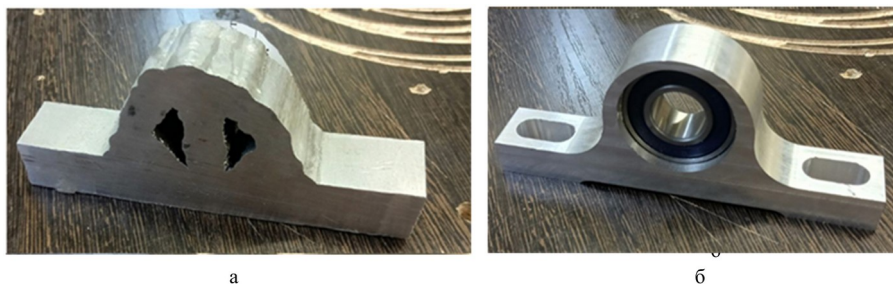


Рисунок 4 - Подшипниковая опора:

а - заготовка; б - деталь

DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2024.5.2.4>

После механической обработки на полученных образцах изделий определялись параметры шероховатости поверхности. В качестве прибора для измерения шероховатости использовался профилометр модели ISR-C002 (Китай), показания которого представлены на рисунке 5. Шероховатость обработанной поверхности подшипниковой опоры представлена на рисунке 6. Диапазон полученных значений шероховатости:  $R_a$  0,28 – 0,32 мкм,  $R_z$  1,7 – 2,0 мкм.

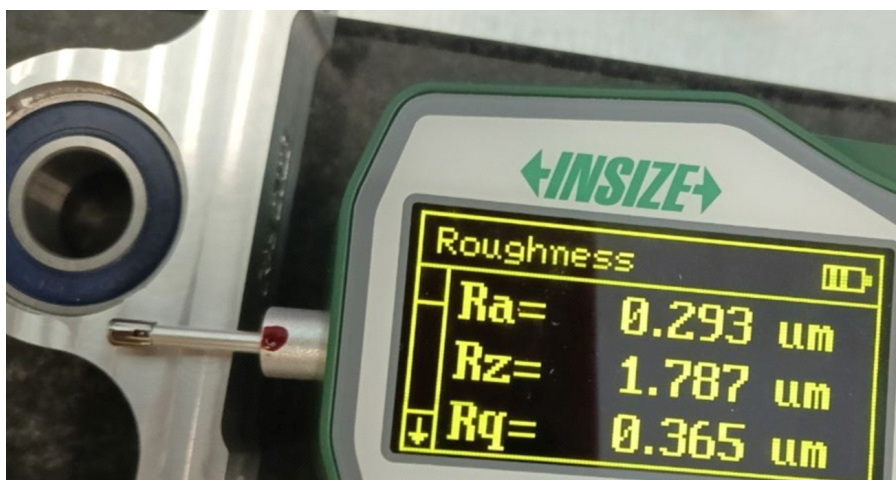


Рисунок 5 - Результаты измерения шероховатости поверхностей подшипниковой опоры: показания прибора

DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2024.5.2.5>

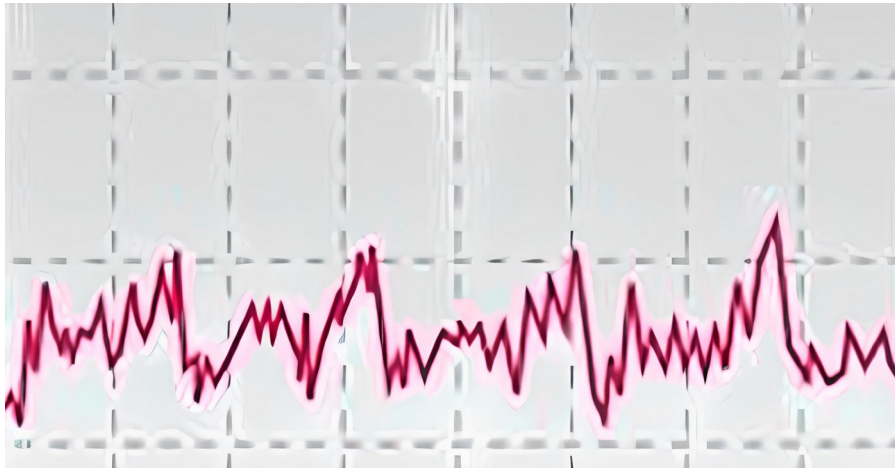


Рисунок 6 - Результаты измерения шероховатости поверхностей подшипниковой опоры: профилограмма обработанной поверхности

DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2024.5.2.6>

### Заключение

Предложенные конструкторско-технологические решения, кроме расширения технологических возможностей разработанного многофункционального станка с ЧПУ за счет дополнительных инструментальных модулей, обеспечивает также и требуемый уровень качества поверхностей.

### Финансирование

Работа выполнена при поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности», проект № 20231110-06192.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Funding

The work was carried out with the support of the Krasnoyarsk Regional Fund of Science and Technology Support, project № 20231110-06192.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Киричек А.В. Аддитивно-субтрактивные технологии – эффективный переход к инновационному производству / А.В. Киричек, О.Н. Федонин, Д.Л. Соловьев [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. — 2019. — № 8 (81). — С. 4–10.
2. Dovzhenko N.N. Structural element shaping on a plate in the manufacture of a hybrid product from aluminum alloy using WAAM technology / N.N. Dovzhenko, A.I. Demchenko, A.A. Bezrukikh [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2022. — Vol. 123. — № 9. — P. 3183–3204.
3. Букин А.А. Разработка конструкции многофункциональной универсальной базы для специализированного технологического оборудования с ЧПУ / А.А. Букин, А.Н. Ульянов // Проспект Свободный – 2023 : материалы XIX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск, 24–29 апреля 2023 г. — Красноярск: СФУ, 2023. — С. 384–387.
4. Агапитов А.Е. Разработка конструкции поворотного механизма рабочего органа дуговой наплавки / А.Е. Агапитов, К.О. Салатов, А.С. Бинчуров // Современные технологии, материалы и техника: Материалы конференции. Воронеж, 20 декабря 2023 года. — Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2023. — С. 21–24
5. Кравченко Е.Г. Аддитивные технологии в машиностроении: учебное пособие / Е.Г. Кравченко, А.С. Верещагина, В.Ю. Верещагин. — Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2021. — 139 с.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Kirichek A.V. Additivno-subtraktivnye tehnologii – effektivnyj perehod k innovatsionnomu proizvodstvu [Additive-subtractive technologies – an effective transition to innovative production] / A.V. Kirichek, O.N. Fedonin, D.L. Solov'ev [et al.] // Vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Bulletin of Bryansk State Technical University]. — 2019. — № 8 (81). — P. 4–10. [in Russian]

2. Dovzhenko N.N. Structural element shaping on a plate in the manufacture of a hybrid product from aluminum alloy using WAAM technology / N.N. Dovzhenko, A.I. Demchenko, A.A. Bezrukikh [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. — 2022. — Vol. 123. — № 9. — P. 3183–3204.

3. Bukin A.A. Razrabotka konstrukcii mnogofunkcional'noj universal'noj bazy dlya specializirovannogo tekhnologicheskogo oborudovaniya s CHPU [Development of the design of a multifunctional universal base for specialized CNC technological equipment] / A.A. Bukin, A.N. Ul'yankin // *Prospekt Svobodnyj – 2023 : materialy XIX Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. Krasnoyarsk, 24–29 aprelya 2023 g* [Svobodny Avenue – 2023: materials of the XIX International Scientific Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists. Krasnoyarsk, April 24–29, 2023]. — Krasnoyarsk: SFU, 2023. — P. 384–387. [in Russian]

4. Agapitov A.E. Razrabotka konstrukcii povorotnogo mekhanizma rabocheho organa dugovoj naplavki [Development of the design of the rotating mechanism of the working body of arc surfacing] / A.E. Agapitov, K.O. Salatov, A.S. Binchurov // *Covremennye tekhnologii, materialy i tekhnika: Materialy konferencii. Voronezh, 20 dekabrya 2023 goda. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2023* [Modern technologies, materials and equipment: Conference materials. Voronezh, December 20, 2023]. — Voronezh: Voronezh State Technical University, 2023. — P. 21–24 [in Russian]

5. Kravchenko E.G. Additivnye tekhnologii v mashinostroenii: uchebnoe posobie [Additive technologies in machine building] / E.G. Kravchenko, A.S. Vereschagina, V.Ju. Vereschagin. — Moskva: Aj Pi Ar Media, 2021. — 139 p. [in Russian]