

Аддитивные технологии изготовления инструмента для комбинированных методов обработки

**Владислав Павлович Смоленцев¹, д.т.н.,
Николай Николаевич Ненахов², аспирант,
Александр Андреевич Извеков³, аспирант,
Игорь Геннадьевич Стародубцев⁴, аспирант**

^{1,2,3,4}*Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия*

¹*vsmolen@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>*

²*mari240680@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>*

³*vmzizvekov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>*

⁴*Vmz056@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>*

***Аннотация.** Рассмотрены вопросы аддитивной технологии применительно к комбинированным методам изготовления инструмента при воздействии на процесс электромагнитного и других видов полей. Предложены пути решения проблемы управления эксплуатационными характеристиками за счет создания деталей из сопряженных слоев, свойства которых формируют путем оптимизации технологических режимов.*

***Ключевые слова:** аддитивная технология, инструмент, комбинированные методы, оборудование, модернизация, управление, область использования*

***Для цитирования:** Смоленцев В.П., Ненахов Н.Н., Извеков А.А., Стародубцев И.Г. Аддитивные технологии изготовления инструмента для комбинированных методов обработки // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №7 (133). – С. 3-8. doi: 10.30987/2223-4608-2022-1-7-3-8*

Original article

Additive processing technologies of tool engineering for combined tooling techniques

**Vladislav P. Smolentsev¹, Dr.Sc.Tech.,
Nikolay N. Nenakhov², Postgraduate Student,
Alexander A. Izvekov³, Postgraduate Student,
Igor G. Starodubtsev⁴, Postgraduate Student**

^{1,2,3,4}*Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia*

¹*vsmolen@inbox.ru, ²mari240680@yandex.ru, ³vmzizvekov@gmail.com, ⁴Vmz056@yandex.ru*

***Abstract.** The matters, related to additive techniques for combined methods of tool engineering on exposure to electromagnetic field and other types of fields, are addressed. The ways for solving the problem of operational characteristics control by making conjugate layer parts with properties formed by optimizing technological modes, are given.*

***Keywords:** additive technology, tool, combined methods, equipment, modernization, management, field of use*

***For citation:** Smolentsev V.P., Nenakhov N.N., Izvekov F.F., Starodubtsev I.G. Additive processing technologies of tool engineering for combined tooling techniques. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.7 (133), pp. 3-8. doi: 10.30987/2223-4608-2022-1-7-3-8*

Введение

При использовании комбинированных методов обработки с наложением различных полей управления наращиванием слоев и изменением их свойств происходит без прямого силового контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, а в ряде случаев только за счет локального перемещения тепловых, магнитных и других полей в зоне обработки. Это значительно снижает требования к механическим характеристикам инструмента, выдвигая на первый план электро-теплотехнические, химические свойства и технологичность конструкции. Требования к таким инструментам изменяются по глубине слоя, что может быть выполнено, в основном, путем управления свойствами каждого сопрягаемого слоя при использовании аддитивных способов изготовления.

Формирование профиля и свойств изделий за счет управления воздействиями при комбинированных методах обработки позволяет полнее использовать возможности малолюдных и безлюдных технологий в гибкоструктурном производстве. При этом точность границ контура обрабатываемой детали обеспечивается локализацией зоны действия полей при нанесении каждого слоя за счет управления мощностью подводимой энергии при комбинированной обработке. Рассматриваемый подход существенно ускоряет технологическую подготовку производства при освоении новых или модернизированных наукоемких изделий, особенно в авиакосмической отрасли машиностроения.

Область использования аддитивных технологий для изготовления инструмента

Обоснование выбора и назначения инструмента выполняется на стадии отработки производственной технологичности. Значительная часть металлорежущего инструмента стандартизирована и при проектировании серийного процесса работа сводится только к выбору объекта из предлагаемой номенклатуры изделий. Комбинированные методы обработки (КМО) с наложением различных полей относятся к нетрадиционным технологиям, где в большинстве случаев инструмент имеет индивидуальные признаки и разрабатывается с учетом эксплуатационных требований к

конкретным изделиям, в том числе осваиваемым в производстве, при ремонте и техническом обслуживании объектов.

При отработке технологичности выбор инструмента для КМО выполняется с учетом следующих факторов:

– возможности выполнения операции по традиционным технологиям. Если это на современном этапе развития технологии неосуществимо, то дальнейшие этапы отработки технологичности выполняются в направлении адаптации КМО к плану выполнения операций, назначению инструмента и технологии его изготовления, в том числе с использованием аддитивных технологий;

– технико-экономического обоснования использования выбранного инструмента для КМО. Здесь необходимо провести анализ требуемых и имеющихся средств технологического оснащения, возможности предприятия по приобретению нового оборудования, перспектив его загрузки и окупаемости. При отработке технологичности целесообразно применить накопленный опыт создания инструмента для КМО с использованием аддитивных технологий его изготовления.

На рис. 1. приведены виды инструментов, используемых для КМО. Они выполнены с учетом опыта изготовления и освоения наукоемких изделий авиакосмической отрасли машиностроения, где наиболее часто применяется гибкоструктурное производство. Естественно, что по мере расширения области использования аддитивных технологий перечень инструментов для КМО и другого назначения будет систематически пополняться.

С использованием аддитивных технологий выполняются (см. рис. 1) электроды-инструменты (ЭИ), имеющие рабочую часть в форме зеркального отражения профиля в обработанной детали [1 – 3], непрофилированные ЭИ [4], шаблоны [4, 5], которые являются носителем информации о геометрии места обработки детали средствами анодного растворения [6], обеспечения требуемых показателей качества изделий [7].

Наибольшее использование для КМО нашли наиболее простые в изготовлении цельные металлические ЭИ, корпуса, центральная часть которых может выполняться из стандартных профилей литьем, штамповкой, сборкой из различных достаточно простых для изготовления фрагментов.

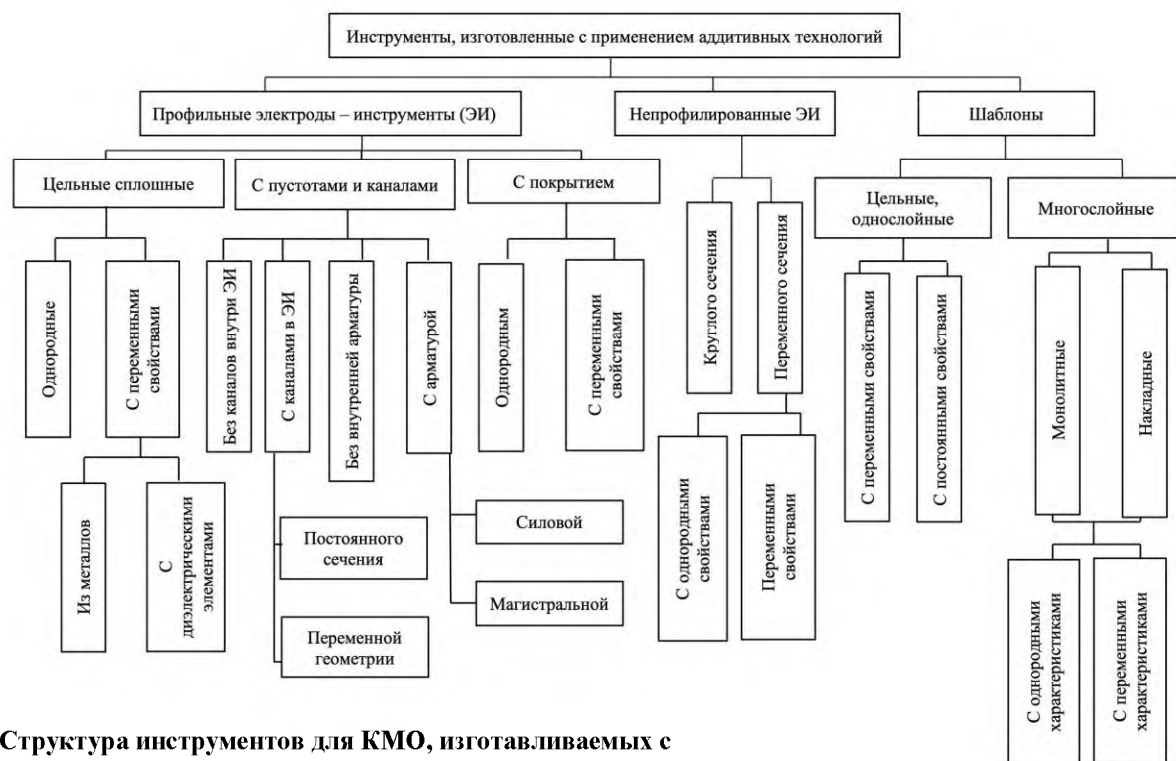


Рис. 1. Структура инструментов для КМО, изготавливаемых с применением аддитивных технологий

Аддитивное нанесение поверхностных слоев с особыми свойствами необходимо в исключительных случаях для формирования сложной геометрии рабочей части ЭИ или для получения конечной формы инструмента из стандартных профилей с меньшими стандартными геометрическими размерами. При этом наносимые слои могут быть однородными или иметь различные эксплуатационные характеристики, например, электро- или теплопроводность, твердость. Перечень локальных свойств слоев покрытий весьма широк.

В [8] приведен опыт послойного изменения свойств материалов путем воздействия электромагнитных полей, целенаправленного изменения, фазового состава и термохимических преобразований по глубине поверхностного слоя деталей, что может использоваться при изготовлении, например, длинномерных ЭИ для снятия внутренних напряжений и выравнивания профиля металлических стержней. Аддитивные технологии открывают возможность выполнять ЭИ с локальными электроизолированными участками, что может снизить рассеивание тока и повысить точность обрабатываемых деталей.

На рис. 2 приведена металлическая матрица прессформы с объемным выступом, полученным воздействием электромагнитного

поля при наращивании слоев из инструментальной стали на плоскую заготовку из алюминиевого сплава.



Рис. 2. Матрица с профилем, полученным многослойным покрытием

Получить инструмент, типа приведенного на рис. 2, можно и другими известными методами, но при единичной потребности в таких деталях применение аддитивных технологий на порядок и более позволяет ускорить технологическую подготовку производства такой оснастки. В перспективе подобные изделия можно будет выполнять из диэлектрических материалов с уникальными характеристиками локальным нанесением фрагментов с учетом эксплуатационных требований к изделию.

Для комбинированной прошивки межлопаточных каналов в цельных (из штампованной заготовки) рабочих колесах турбонасосных

агрегатов жидкостных ракетных двигателей (рис. 3, *а*) требуются профильные электроды-инструменты (ЭИ) (рис. 3, *б*), которые изнашиваются и требуют либо систематической замены или ремонта путем наращивания части рабочей поверхности.



а)



б)

Рис. 3. Межлопаточные каналы в турбонасосных агрегатах (*а*) и цельный электрод-инструмент для их прошивки (*б*)

Применение аддитивных технологий открывает возможность заменить дефицитную медь корпуса инструмента на более дешевые и доступные материалы, а рабочую часть восстанавливать путем нанесения многослойных покрытий любыми сплавами, в том числе серебром, которое для изготовления ЭИ практически не используется, хотя имеет ценные технологические преимущества. При локальном нанесении его в местах износа инструмента использование серебра может оказаться экономически оправданным, хотя и требует усиленного учета расходования этого драгметалла.

Из [6] известно, что применение для ЭИ

сплавов с особыми эксплуатационными свойствами открывает возможность расширить область использования КМО. В частности, применение для многослойных покрытий ЭИ тугоплавких вольфрамовых сплавов, наносимых с применением аддитивных технологий, дает возможность создать практически безыносный инструмент и снизить затраты на технологическое оснащение даже серийного выпуска продукции.

Одним из достоинств новых методов восстановления ЭИ является возможность использования продукции без чистовой заключительной операции, т.к. микронеровности не переносятся на обрабатываемую деталь, а производительность процесса нанесения покрытий возрастает [6, 9] при использовании режимов черновой обработки.

Инструменты на рис. 1 могут иметь внутренние полости, формируемые в процессе неразъемной сборки изделия. Эти элементы могут быть предназначены для облегчения инструмента или изменения его прочностных характеристик. Применение аддитивных технологий открывает возможность реализовать технологические процессы ускоренного изготовления крупногабаритных цельных ЭИ без сборочных операций. Для формирования рабочей части таких инструментов могут использоваться многослойные покрытия с различными эксплуатационными свойствами типа приведенных в [9]. Расчет толщины покрытий или сечения внутренних элементов выполняется с учетом создания прочностных характеристик ЭИ или токоподвода к зоне удаления припуска без перегрузки электрической магистрали внутри инструмента.

Новым направлением исследований является создание многослойных непрофилированных электродов-инструментов по патенту [10].

В [6] приведен опыт использования непрофилированных инструментов из стандартной латунной проволоки диаметром от 0,1 до 0,3 мм с равномерным гальваническим покрытием цинком толщиной до 50 мкм.

В ряде случаев наиболее эффективным носителем информации становится шаблон, получаемый с использованием аддитивных технологий путем нанесения многослойных покрытий с различными свойствами [5, 6].

На рис. 4 приведен многослойный шаблон для изготовления листовых заготовок взамен вырубki при единичном и мелкосерийном выпуске деталей.



Рис. 4. Многослойный шаблон для изготовления деталей из листа

Попытки изготовления таких деталей по программе непрофилированным проволочным электродом оказались неэффективными, т.к. не удалось обеспечить требуемую жесткость технологической системы и анализ технологичности показал, что для многослойных шаблонов целесообразно использовать наиболее эффективные аддитивные технологии. Для этого на поверхность заготовки наносят тонкий (6...10 мкм) слой окисла, а на него 100...120 мкм никеля, который может быть подключен к источнику постоянного тока. Регулируя напряжение источника, можно изменять ширину пазов на детали и повысить точность контура на детали. Подобные шаблоны (см. рис. 4) позволяют заменить дорогостоящие вырубные штампы, что на порядок и более ускоряет технологическую подготовку выпуска таких деталей и снижает затраты на этот этап освоения новых изделий.

Чистовая обработка наружных слоев покрытий при аддитивных технологиях их получения

После нанесения слоев покрытий может возникнуть необходимость чистовой обработки рабочей части изготовленного инструмента (типа приведенного на рис. 2) с целью снижения высоты микронеровностей, величина которых может многократно превышать требуемое предельное значение (рис. 5).

Шероховатость образца на рис. 2 после нанесения слоев составляет (см. рис. 5) $Rz = 18,12$ мкм, поэтому требуется чистовая обработка наружного слоя для снижения высоты неровностей до величины не более $Ra = 0,63$ мкм, не нарушая при этом эксплуатационных характеристик всех нанесенных слоев.

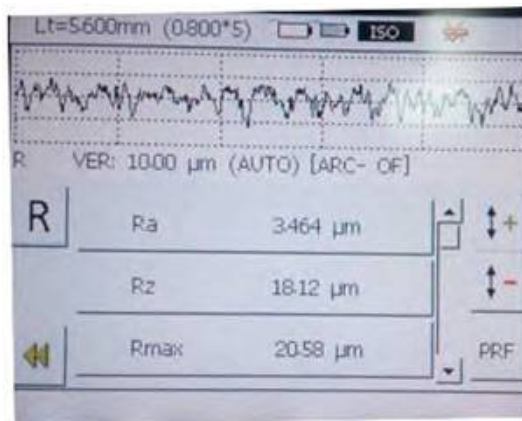


Рис. 5. Шероховатость поверхности образца после аддитивного нанесения слоев

Заключение

В работе рассмотрена технология аддитивной обработки электродов-инструментов для комбинированных методов обработки с учетом специфики современного гибкоструктурного производства в авиакосмической отрасли машиностроения.

Проведенный анализ показал, что область использования новых методов может быть существенно расширена за счет использования многослойных покрытий, шаблонов, электромагнитных полей, послойно преобразующих эксплуатационные характеристики деталей по глубине залегания слоев. Рассмотрены пути повышения качества поверхностного слоя профилированных и непрофилированных электродов-инструментов без нарушения эксплуатационных свойств их рабочей зоны и восстановления работоспособности изделий путем наращивания материалов с заранее заданными свойствами по аддитивным технологиям.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Справочник технолога / Под ред. А.Г. Сулова. – М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
2. Научно-технические технологии в машиностроении / Под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2012. – 528 с.
3. Поташникова, Н.С., Смоленцев, В.П., Поташников, М.Г. Аддитивная технология создания инструмента для электроабразивной обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т. 17. – №3 (195). – С. 138-144.
4. Смоленцев, В.П. Изготовление инструмента непрофилированным электродом. – М.: Машиностроение, 1967. – 160 с.
5. Щеднов, А.В., Смоленцев, В.П., Поташникова, Н.С. Технология комбинированной обработки каналов по многослойным шаблонам // Вестник ВГТУ. – 2021. – Т.17. – №1. – С. 89-96.

6. Смоленцев, Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. – М.: Машиностроение, 2005. – 511 с.

7. Смоленцев, В.П., Сафонов, С.В., Омигов, Б.И. Управление качеством наукоемких изделий по результатам испытаний // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – №1. – С. 20-28.

8. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Силантьев, С.А. Технология комбинированного упрочнения волной деформации и цементацией конструкционных низколегированных сталей // Научные технологии в машиностроении. – 2017. – №8 (74). – С. 30-35.

9. Смоленцев, В.П., Портных, А.И., Паничев, Е.В. Технологические режимы плазменного нанесения многослойных термозащитных покрытий // Вестник ВГТУ. – 2019. – Т. 15. – №1. – С. 112-115.

10. Патент 2466835 РФ. Способ эрозионно-технической обработки / С.Н. Коденцев, В.П. Смоленцев, Г.А. Сухочев, М.А. Уваров / опуб. 20.11.2012. Бюл. №32.

REFERENCES

1. Technologist's Reference Book / Edited by A.G. Suslov, Moscow: Innovative mechanical engineering, 2019, 800p.

2. Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering / Edited by A.G. Suslov, Moscow: Mashinostroenie, 2012, 528 p.

3. Potashnikova, N.S., Smolentsev, V.P., Potashnikov, M.G. Additive technology to create a tool for electroerosive processing / Hardening technologies and coatings, 2021, vol.17, no. 3 (195), pp. 138-144.

4. Smolentsev, V.P. Production of Non-Profiled Tool Electrode. Moscow: Mashinostroenie, 1967, 60 p. (in Russian).

5. Shchednov, A.V., Smolentsev, V.P., Potashnikova, N.S. Combined channel processing technology based on multi-layer templates / Bulletin of VSTU, 2021, vol.17, no. 1, pp. 89-96

6. Smolentsev, E.V. Design of electrical and combined tooling techniques. / Moscow: Mashinostroenie, 2005, 511 p.

7. Smolentsev, V.P., Safonov, S.V., Omigov, B.I. Quality management of science-intensive products on completion of testing / Bulletin of the Bryansk State Technical University, 2019, no. 1, pp. 20-28.

8. Kirichek, A.V., Soloviev, D.L., Silantsev, S.A. Technology of combined strengthening by wave deformation and case-hardening of structural low-alloy steels. / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2017, no. 8 (74), pp. 30-35.

9. Smolentsev, V.P., Portnykh, A.I., Panicheva, E.V. Technological modes of plasma multilayer heat-insulation coatings/ Vestnik VSTU, 2019, vol. 15, no. 1, pp. 112-115. 10. Patent 2466835 of the Russian Federation. Method of erosion-technical machining / S.N. Kodentsev, V.P. Smolentsev, G.A. Sukhochev, M.A. Uvarov / pub. 20.11.2012., Bul. no. 32.

Вклад авторов: Смоленцев В.П. – анализ и обработка материалов статьи; Ненахов Н.Н. – сбор материала, систематизация и подготовка раздела по влиянию электромагнитных полей на свойства слоев материала инструмента; Извеков А.А. – систематизация материалов по назначению инструмента и режимам обработки для электрических методов обработки; Стародубцев И.Г. – аддитивные технологии, разрабатываемые для проектирования и изготовления многослойных шаблонов, определяющих геометрию и требования к деталям из листа.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: Smolentsev V.P. – analysis and processing of the materials of the article; Nenakhov N.N. – collection of material, systematization and preparation of a section on the influence of electromagnetic fields on the properties of the layers of the material of the instrument; Izvekov A.A. – materials systematization according to tool assign and classification of processing modes for electrical processing methods; Starodubtsev I.G. – additive technologies developed for the design and preparation of multilayer templates specifying geometry and requirements for sheet parts.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.04.2022; одобрена после рецензирования 27.05.2022; принята к публикации 31.05.2022.

The article was submitted 15.04.2022; approved after reviewing 27.05.2022; assepted for publication 31.05.2022.