



Современные методы изготовления сложнопрофильных
электродов-инструментов для электроэррозионной обработки
(обзор исследований)

Тимур Абляз^a, Илья Осинников^b, Евгений Шлыков^{c,*}, Карим Муратов^d, Владимир Блохин^e

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0001-6607-4692>, lowrider11-13-11@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0009-0006-4478-3803>, ilyuhaosinnikov@bk.ru;
^c <https://orcid.org/0000-0001-8076-0509>, Kruspert@mail.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0001-7612-8025>, Karimur_80@mail.ru;
^e <https://orcid.org/0009-0009-2693-6580>, warkk98@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.048.4

История статьи:

Поступила: 11 июня 2025

Рецензирование: 04 июля 2025

Принята к печати: 09 сентября 2025

Доступно онлайн: 15 декабря 2025

Ключевые слова:

Опытное производство
Электроэррозионная обработка
Электрод-инструмент
Конфигурация электрода-инструмента
Методы изготовления
Аддитивные методы
Технологии быстрого прототипирования
Литье по выплавляемым моделям
Порошковая металлургия

АННОТАЦИЯ

Введение. В современном машиностроении важную роль играет опытное производство. Технология копировально-прошивной электроэррозионной обработки (КПЭЭО) получила широкое распространение при обработке опытных деталей, изготавливаемых на потоках гибкого производства. Изготовление электродов-инструментов (ЭИ) является одним из основных этапов технологического цикла КПЭЭО. **Цель работы.** Обзор существующих исследований современных методов изготовления электродов-инструментов для электроэррозионной обработки. **Методы исследования.** Произведен обзор научной литературы на тему исследований в области электроэррозионной обработки, посвященных электродам-инструментам, преимущественно за последние 20 лет. Описаны различные конфигурации конструктивных элементов, обрабатываемых с помощью технологии КПЭЭО, а также конфигурации ЭИ для их обработки. Показаны зависимости влияния геометрических параметров ЭИ простейших конфигураций на выходные параметры КПЭЭО. Выделены основные группы методов изготовления ЭИ. Описаны ограничения, преимущества и недостатки методов, альтернативных традиционным. Выявлены основные тенденции развития современных методов изготовления ЭИ. **Результаты и обсуждение.** На основании обзора литературы, посвященной современным исследованиям в области электроэррозионной обработки, приведены современные тенденции развития конфигураций электродов-инструментов, выявлены проблемы изготовления сложнопрофильных электродов-инструментов традиционными методами. Установлено, что среди альтернативных методов изготовления электродов-инструментов наибольший интерес современных ученых вызывают литье по выплавляемым моделям, порошковая металлургия и аддитивные методы. Показано, что для каждого метода характерны свои преимущества и недостатки, подтвержденные рядом исследований. Выделены актуальные направления развития сложнопрофильных ЭИ и методов их изготовления: топологическая оптимизация электродов-инструментов, использование современных высокотехнологичных методов литья; расширение номенклатуры материалов ЭИ с повышенными электроэррозионными свойствами; оптимизация режимов порошковой металлургии, FDM-печати и селективного лазерного сплавления; повышение толщины и качества покрытий электродов-инструментов, полученных с применением технологий быстрого прототипирования.

Для цитирования: Современные методы изготовления сложнопрофильных электродов-инструментов для электроэррозионной обработки (обзор исследований) / Т.Р. Абляз, И.В. Осинников, Е.С. Шлыков, К.Р. Муратов, В.Б. Блохин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 4. – С. 148–179. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-148-179.

Введение

В настоящее время наблюдается ускоренный темп научно-технического прогресса, затрагивающий все отрасли производства. Современные

машиностроительные предприятия вынуждены функционировать в условиях высокой конкуренции [1, 2]. Для сохранения конкурентоспособности предприятиям необходимо поддерживать гибкое развитие и широкую номенклатуру выпускаемых изделий, а также способность быстро реагировать на изменения требований рынка [3–5]. В связи с ростом конкуренции среди предприятий и активным увеличением наращивания производств возникает необходимость минимизации временных затрат для вывода

*Адрес для переписки

Шлыков Евгений Сергеевич, к.т.н., доцент
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский пр., 29,
614990, г. Пермь, Россия
Тел.: +7 961 759-88-49, e-mail: Kruspert@mail.ru

продукции на рынок. При этом необходимо поддерживать высокие показатели качества изделий машиностроительных производств на всех этапах жизненного цикла. В условиях опытного производства предприятием осуществляется проектирование и создание нового изделия, а также подготовка к его серийному выпуску [6]. Требования потребителя и качественные показатели изделия являются ключевыми факторами при создании опытного образца.

При оптимизации технологии изготовления, учитывая особенности и сложности опытного производства, на этапе технической и экономической экспертизы осуществляется анализ и выбор методов изготовления опытного образца [6]. Как правило, традиционные методы изготовления изделий машиностроительной отрасли нерационально использовать для получения опытного образца. Высокий уровень загрузки оборудования для обработки классическими методами, сложность профиля, а также высокие физико-механические свойства материала изделия требуют применения альтернативных методов изготовления опытных образцов [7–9].

При обработке сложных конструктивных элементов (труднодоступных участков поверхностей, криволинейных и узких пазов, глухих отверстий, тонкостенных элементов), а также сложнопрофильных опытных деталей, изготавливаемых на потоках гибкого производства, широко применяется метод копировально-прошивной электроэрозионной обработки (КПЭЭО) [10]. Данный метод обработки основан на копировании формы электрод-инструмента (ЭИ) на электрод-деталь (ЭД) под действием электрических разрядов между ЭИ и ЭД [11, 12].

Высокие показатели точности обработки и отсутствие силового воздействия на ЭИ позволяют применять метод КПЭЭО при обработке сложнопрофильных конструктивных элементов. Зачастую данный метод используется в производстве инструментов, таких как литейные формы, пресс-формы и штампы [13–17]. Этот метод широко применяется при обработке глухих криволинейных пазов, глубоких отверстий малого диаметра, а также внутренних шлицев и зубьев [18].

Инструментом при КПЭЭО служит объемный профильный электрод-инструмент. В копировально-прошивочных станках объемному профильному ЭИ придается поступательное движение со скоростью V_z по направлению к ЭД (рис. 1) [11].

Вследствие постоянного усложнения конструктивных элементов, обрабатываемых методом КПЭЭО, возникает необходимость в использовании ЭИ со сложной геометрией. Одним из наиболее затратных этапов с точки зрения временных ресурсов является изготовление ЭИ. Перед машиностроительными предприятиями возникает задача выбора метода изготовления ЭИ, позволяющего достичь максимального экономического эффекта за счет обеспечения максимальной производительности и минимальных затрат временных и материальных ресурсов.

Проблема изготовления ЭИ известна практически с момента появления электроэрозионного метода обработки. Исследования в этой области остаются актуальными за счет тенденций современного машиностроения на постоянное усложнение геометрии, снижение массогабаритных характеристик и прочие усовершенствования обрабатываемых изделий.

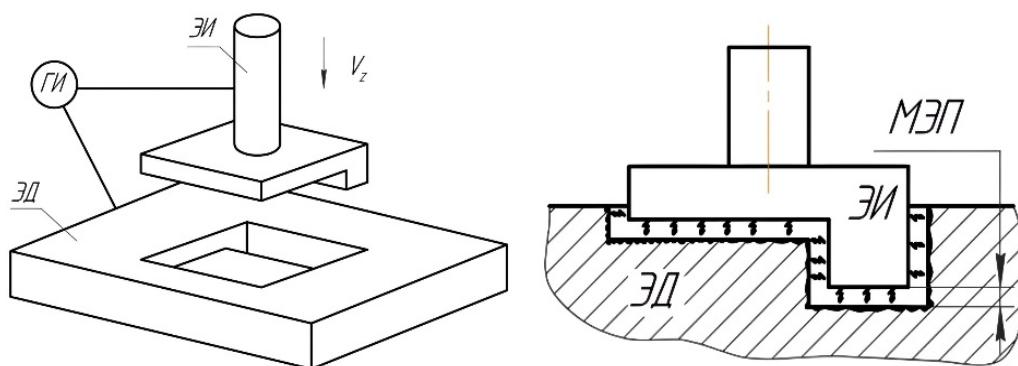


Рис. 1. Схема копировально-прошивной обработки

Fig. 1. Schematic of die-sinking EDM process

В настоящее время существует множество исследований в области электроэрозионной обработки, посвященных методам изготовления ЭИ.

Целью настоящей работы является обзор существующих исследований современных методов изготовления электродов-инструментов для электроэрозионной обработки.

Для достижения поставленной цели в процессе исследования решались следующие **задачи**:

- классификация методов изготовления ЭИ, определение методов, альтернативных традиционной лезвийной обработке;
- определение преимуществ, недостатков и ограничений современных методов изготовления ЭИ по сравнению с традиционными методами;
- определение тенденций развития выделенных методов.

Методика исследований

Проведен обзор научной литературы на тему исследований в области электроэрозионной обработки, посвященных электродам-инструментам, преимущественно за последние 20 лет. Описаны различные конфигурации конструктивных элементов, обрабатываемых с помощью технологии КПЭЭО, а также конфигурации ЭИ для их обработки. Показаны зависимости влияния геометрических параметров ЭИ простейших

конфигураций на выходные параметры КПЭЭО. Выделены основные группы методов изготовления ЭИ. Описаны ограничения, преимущества и недостатки методов, альтернативных традиционным. Выявлены основные тенденции развития современных методов изготовления ЭИ.

Результаты и их обсуждение

Конфигурация ЭИ определяется геометрическими параметрами обрабатываемых конструктивных элементов. В работах [19–23] широко представлена номенклатура конструктивных элементов, обрабатываемых методом КПЭЭО. На рис. 2 приведены примеры подобных элементов конструкций.

Конфигурации ЭИ

КПЭЭО сложнопрофильных поверхностей требует соответствующих геометрических параметров ЭИ. В настоящее время существует множество исследований, в которых описаны конструктивные особенности ЭИ.

Простые формы

В условиях реального производства простейшие конфигурации ЭИ используются редко, поскольку конструктивные элементы, обрабатываемые с их помощью, как правило, возможно обработать механическими методами без тех-

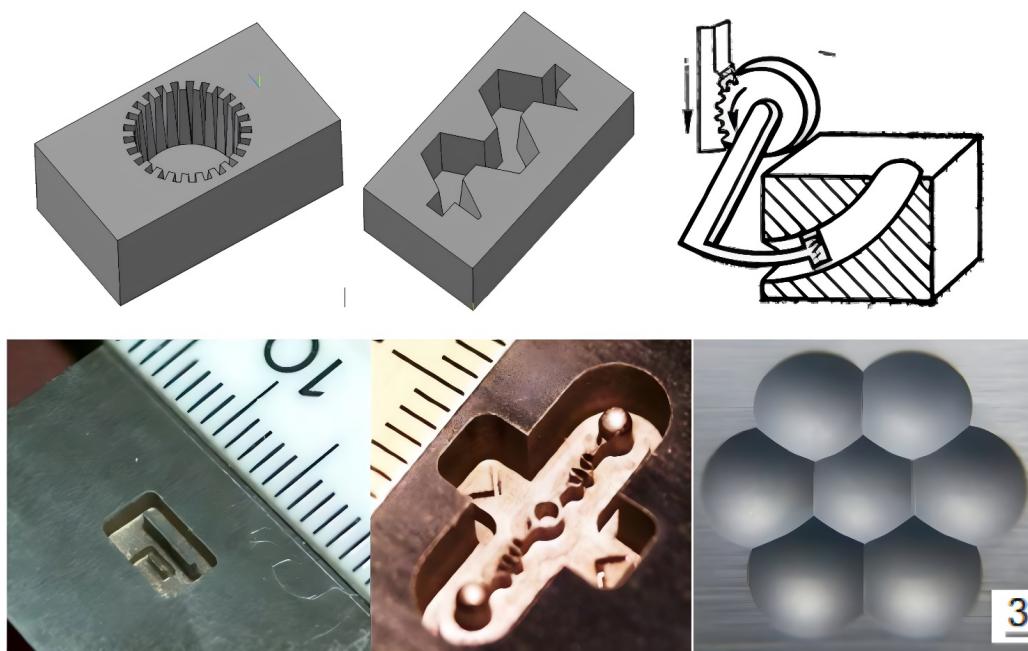


Рис. 2. Примеры конструктивных элементов, обрабатываемых методом КПЭЭО

Fig. 2. Examples of structural elements processed by the CPEDM method

нологических затруднений. Тем не менее существует ряд исследований, посвященных влиянию геометрических параметров ЭИ на выходные параметры КПЭО. В таком случае обычно используются ЭИ круглых, квадратных, треугольных и прочих простейших сечений. Данные ЭИ изготавливаются традиционными лезвийными методами без каких-либо затруднений.

В работе [24] представлено исследование производительности КПЭО в зависимости от конфигурации формы электрода. Исследованы простые конфигурации ЭИ с круглым, треугольным, квадратным и ромбическим сечениями. Установлено, что при одинаковой площади поперечного сечения обработка круглым ЭИ характеризуется наибольшей скоростью съема материала и наименьшим износом ЭИ. КПЭО ромбическим ЭИ, напротив, дает наибольший износ и наименьшую скорость съема материала. Это связано с тем, что у ромбических электродов самая большая периферийная площадь, что позволяет быстрее отводить тепло в окружающую среду. В результате для удаления материала доступно меньшее количество тепловой энергии по сравнению с другими электродами. Однако в острых углах данных электродов наблюдается высокая концентрация тепла, это приводит к интенсивным процессам плавления и испарения электрода, что увеличивает его износ. Графики зависимости скорости съема материала (MRR) и износа ЭИ (EWR) от его конфигурации представлены на рис. 3.

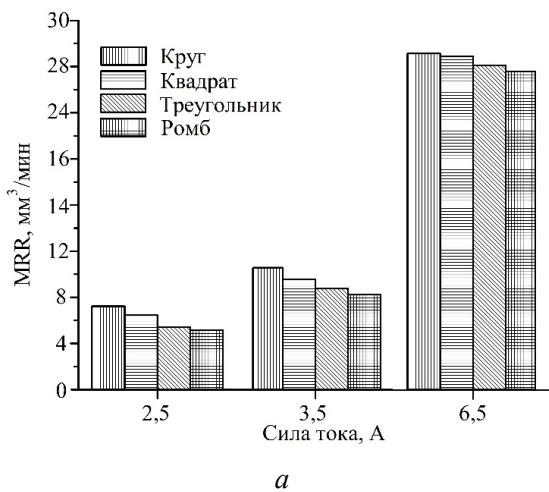


Рис. 3. Зависимости влияния конфигурации ЭИ и силы тока:

а – на коэффициент съема материала (MRR); *б* – на износ ЭИ (EWR) [24]

Fig. 3. Influence of TE configuration and current intensity on:

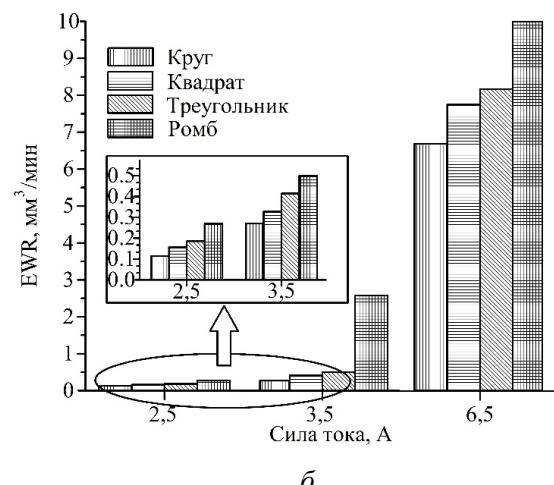
а – material removal rate (MRR); *б* – tool-electrode wear rate (EWR) [24]

Лучшие показатели ЭИ круглого сечения среди ЭИ с простой конфигурацией подтверждены также авторами исследования [25]. В данной работе показатели цилиндрических ЭИ сравнивались с электродами треугольного и прямоугольного сечения.

В работе [107] также представлено исследование влияния геометрических параметров вращающихся ЭИ простейших конфигураций на выходные параметры ЭЭО. В исследовании использованы ЭИ восьми конфигураций, представленных на рис. 4.

Среди всех возможных вариантов были выбраны треугольные, квадратные и шестиугольные поперечные сечения, поскольку они наиболее просты в проектировании и изготовлении для испытаний на электроэррозионном сверлении. Профили поперечных сечений электродов были выбраны с учетом того, что наиболее легко обрабатываются нецилиндрические формы – треугольные, квадратные и шестиугольные. В этих случаях были протестированы сечения с острыми и закругленными углами. Кроме того, был проанализирован цилиндрический электрод с прорезями. Для сравнения также исследован цилиндрический электрод.

Во всех случаях вращающийся наружный диаметр сечения электрода составлял 14 мм. Таким образом, в этих испытаниях все электроды имели одинаковую эффективную площадь. Значение всех радиусов для электродов с закругленными углами составляло 4 мм, а для прорез-



б

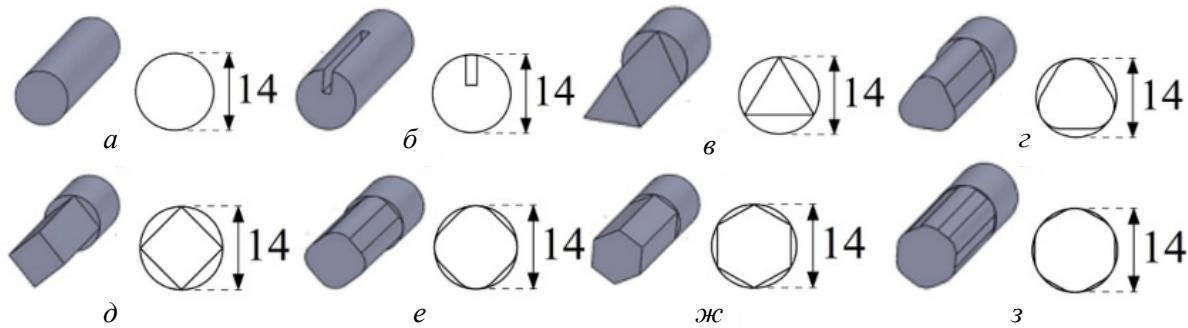


Рис. 4. Конфигурации ЭИ:

а – цилиндрический; б – цилиндрический с пазом; в – треугольный; г – треугольный с закругленными углами; д – квадратный; е – квадратный с закругленными углами; ж – шестиугольный; з – шестиугольный с закругленными углами [107]

Fig. 4. Configurations of tool-electrodes:

а – cylindrical; б – cylindrical with a groove; в – triangular; г – triangular with rounded corners; д – square; е – square with rounded corners; ж – hexagonal; з – hexagonal with rounded corners [107]

ного цилиндрического электрода ширина прорези составляла 2 мм, глубина – 5,5 мм. В случае электродов с острыми углами радиус не использовался. Все эти электроды были изготовлены на обрабатывающем центре с помощью простой фрезерной операции.

Согласно результатам данного исследования применение профилированных электродов дает лучшие результаты с точки зрения MRR, но не EWR и угла конусности отверстия, по сравнению с характеристиками простого цилиндрического электрода. Более того, чем прочнее геометрия электрода, тем ниже могут быть значения TWR и угла конусности отверстия. EWR увеличивается из-за разницы в объеме электрода, которая зависит от формы используемого электрода. Рассхождение полученных данных с результатами исследований [24, 25] обусловливается вращением ЭИ в процессе обработки.

ЭИ простейших конфигураций редко применяются в условиях производства, однако имеют высокую практическую применимость в исследовательских работах. Данные о влиянии геометрических параметров ЭИ простейших конфигураций на выходные параметры КПЭО могут быть использованы при проектировании сложнопрофильных и модульных ЭИ.

ЭИ для обработки глубоких отверстий

Отдельно стоит отметить ЭИ для обработки отверстий, или так называемого электроэропионного сверления (ЭЭС) [26–28]. Электроэропионное сверление выполняется с использованием

цилиндрических электродов для создания отверстий, особенно с малым диаметром и большим соотношением сторон в труднообрабатываемых материалах без затрат на дорогостоящий режущий инструмент. Однако проблемы глубокой обработки отверстий или глубокого сверления отверстий часто приводят к нежелательным проблемам качества поверхности и геометрии.

Основная проблема ЭЭС глубоких отверстий заключается в низкой производительности относительно лезвийной обработки. Это связано в большей степени с низкой эффективностью удаления шлама из зоны обработки. При обработке глубоких отверстий процесс удаления шлама затруднен. Помимо этого, появляется вторичный шлам, который возвращается к ЭИ и повторно отбрасывается на стенку отверстия, что приводит к грубой шероховатости внутренней стенки [103, 104], а также к потере формы отверстий.

Конфигурация электрода оказывает огромное влияние на производительность ЭЭС. Недостаточная промывка является одной из основных проблем, которая вызывает засорение зоны обработки шламом и приводит к коротким замыканиям [29, 30, 62]. Эффективность промывки может быть улучшена за счет использования электродов различной формы. Изменение внешней и внутренней формы электрода может изменить поведение диэлектрического потока в зоне обработки, таким образом повышают эффективность промывки.

Ученые из Мельбурнского университета провели колоссальное обзорное исследование [31]

в области электроэрозионной обработки. Они описали конфигурации ЭИ для ЭЭС и их влияние на процесс обработки. Спиральный электрод, электрод с боковым срезом, электрод с выемкой и ступенчатый электрод можно комбинировать с вращением и вибрацией электрода, чтобы значительно изменить поведение потока диэлектрика и обеспечить канал для удаления мусора. Полый электрод является одним из типов обычно используемых электродов в процессе ЭЭС. Диэлектрик может быть доставлен в зону обработки через внутреннее отверстие электрода, что способствует удалению шлама [32–34]. Применение щелевого электрода обеспечивает дополнительный отвод газов и шлама из зоны обработки, а также снижает боковое искрение и конусность [35–37]. Помимо ступенчатого электрода, для повышения производительности процесса ЭЭС могут также использоваться спиральные электроды. Спиральные канавки обеспечивают каналы для удаления шлама, они могут уменьшить количество шлама в зоне обработки и, как следствие, снизить относительную скорость износа инструмента [38].

Таким образом, использование электродов различной формы позволяет повысить эффективность ЭЭС. Электроды определенной формы обеспечивают дополнительные каналы для эвакуации продуктов электроэророзии, а также позволяют избежать коротких замыканий и дугобразования.

Модульные (составные ЭИ)

Модульные электроды также широко представлены во множестве исследований. Так, в работах [39–41] описаны модульные ЭИ – набор стержней, закрепленных в поворотном столе. Несколько небольших цилиндрических медных электродов размещаются на поворотном столе, вращающемся вокруг вертикальной оси. Большой поворотный стол с несколькими электродами увеличивает съем материала. Продукты электроэророзии легко удаляются из зазора благодаря пространству между электродами. Подобные конструкции ЭИ также могут использоваться для обработки массива отверстий за один технологический переход [42].

Еще одной областью применения модульных ЭИ является обработка криволинейных отверстий. В настоящее время разработаны модуль-

ные ЭИ, состоящие из токопроводных сегментов, закрепленных на упругих направляющих. Такая конструкция позволяет обрабатывать криволинейные отверстия, которые практически невозможно обработать традиционными лезвийными методами и методом КПЭЭО электродами простых конфигураций [32, 43–46].

Сложнопрофильные ЭИ

Номенклатура конфигураций ЭИ наиболее широко представлена электродами с уникальным профилем для обработки сложнопрофильных конструктивных элементов за один технологический переход [20]. Данные ЭИ проектируются в зависимости от геометрических параметров обрабатываемых элементов и применяются только для одного типа изделий. В работах [47, 48] представлена широкая номенклатура изделий, обрабатываемых методом КПЭЭО, и ЭИ для их обработки. Отличительным признаком данной группы ЭИ является сложный профиль рабочих поверхностей [49].

Топологически оптимизированные ЭИ

Отдельно стоит отметить топологически оптимизированные ЭИ. Зачастую ЭИ для обработки штампов, литейных форм и прочих сложно-профильных конструктивных элементов имеют крупные габариты и, следовательно, массу. Обработка такими ЭИ сопровождается высокими нагрузками на направляющие станка и его приводы, а также большим расходом материала ЭИ при его изготовлении. В настоящее время топологическая оптимизация широко применяется в машиностроении для снижения массогабаритных характеристик изделий ответственного назначения при сохранении прочностных показателей [50–53].

Внедрение топологической оптимизации в начальный этап процесса проектирования ЭИ может в несколько раз ускорить его по сравнению с традиционным подходом. Это ускорение связано с минимумом начальных данных, необходимых для оптимизации.

В работах [54–61] отмечается возможность применения методов топологической оптимизации при проектировании ЭИ, а современные методы их изготовления позволяют избежать структурных дефектов, снижающих прочность и жесткость их конструкции.

В табл. 1 представлена сводная характеристика ЭИ, которая построена на основе анализа исследований, посвященных конфигурациям ЭИ.

На основе анализа табл. 1 и рис. 3 можно сделать вывод о том, что подавляющее большинство ЭИ для КПЭО отличается сложнопрофильными рабочими поверхностями. Благодаря им возможна обработка соответствующих конструктивных элементов, однако остро встает вопрос изготовления ЭИ.

Изготовление ЭИ является одним из основных этапов технологического цикла КПЭО. В условиях опытного производства изготовление электродов составляет более 50 % финансовых и временных затрат [17]. Это связано с постоянным усложнением профиля обрабатываемых конструктивных элементов и конфигурации ЭИ.

Анализ работ [11, 19] показал, что в условиях серийного производства при применении технологий электрофизической сложнопрофильной обработки на современных машиностроительных предприятиях для изготовления ЭИ используются традиционные технологии лезвийной обработки, а также пресс-формы. Так, для чистовой КПЭО служат высокоточные ЭИ, полученные методами высокоточной лезвийной обработки [70]. Применение данных ЭИ характеризуется

снятием минимальных припусков с обрабатываемых поверхностей изделия в процессе КПЭО, при этом износ ЭИ незначителен, что делает экономически эффективным использование технологии высокоточной лезвийной обработки для изготовления чистовых ЭИ.

Лезвийные технологии при изготовлении комплектов черновых и получистовых электродов не позволяют обеспечить требуемый экономический эффект. Чрезмерный износ ЭИ в процессе КПЭО, а также низкий коэффициент полезного использования материала при производстве ЭИ существенным образом сказываются на экономичности технологического процесса изготовления выходной детали.

Реализация подходов быстропереналаживаемого опытного производства изделий требует новых подходов к созданию и отработке технологических режимов обработки с применением экономически выгодных технологий создания электродов-инструментов. Труднообрабатываемые поверхности и сложная геометрия современных изделий приводят к усложнению формы ЭИ и кратному увеличению стоимости их изготовления. В связи с этим возникает проблема поиска альтернативных и экономически обоснованных методов изготовления ЭИ для КПЭО опытных образцов.

Таблица 1

Table 1

Конфигурации ЭИ для КПЭО

Tool-electrode configurations for CPEDM

Конфигурация ЭИ	Исследования	Применение	Изображение
ЭИ простой формы	[24], [25]	Обработка конструктивных элементов с сечением простой формы (круг, квадрат, и пр.)	Рис. 5, а
ЭИ для обработки глубоких отверстий	[26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38]	Обработка глубоких отверстий, когда глубина обработки значительно превышает диаметр отверстия	Рис. 5, б
Модульные (составные) ЭИ	[32], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46]	Обработка массива отверстий. Обработка криволинейных отверстий	Рис. 5, в, г
Сложнопрофильные ЭИ	[20], [47], [48], [49]	Обработка сложнопрофильных фасонных поверхностей за один переход	Рис. 5, д, е
Топологически оптимизированные ЭИ	[54], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61]	Обработка крупногабаритных изделий	Рис. 5, ж

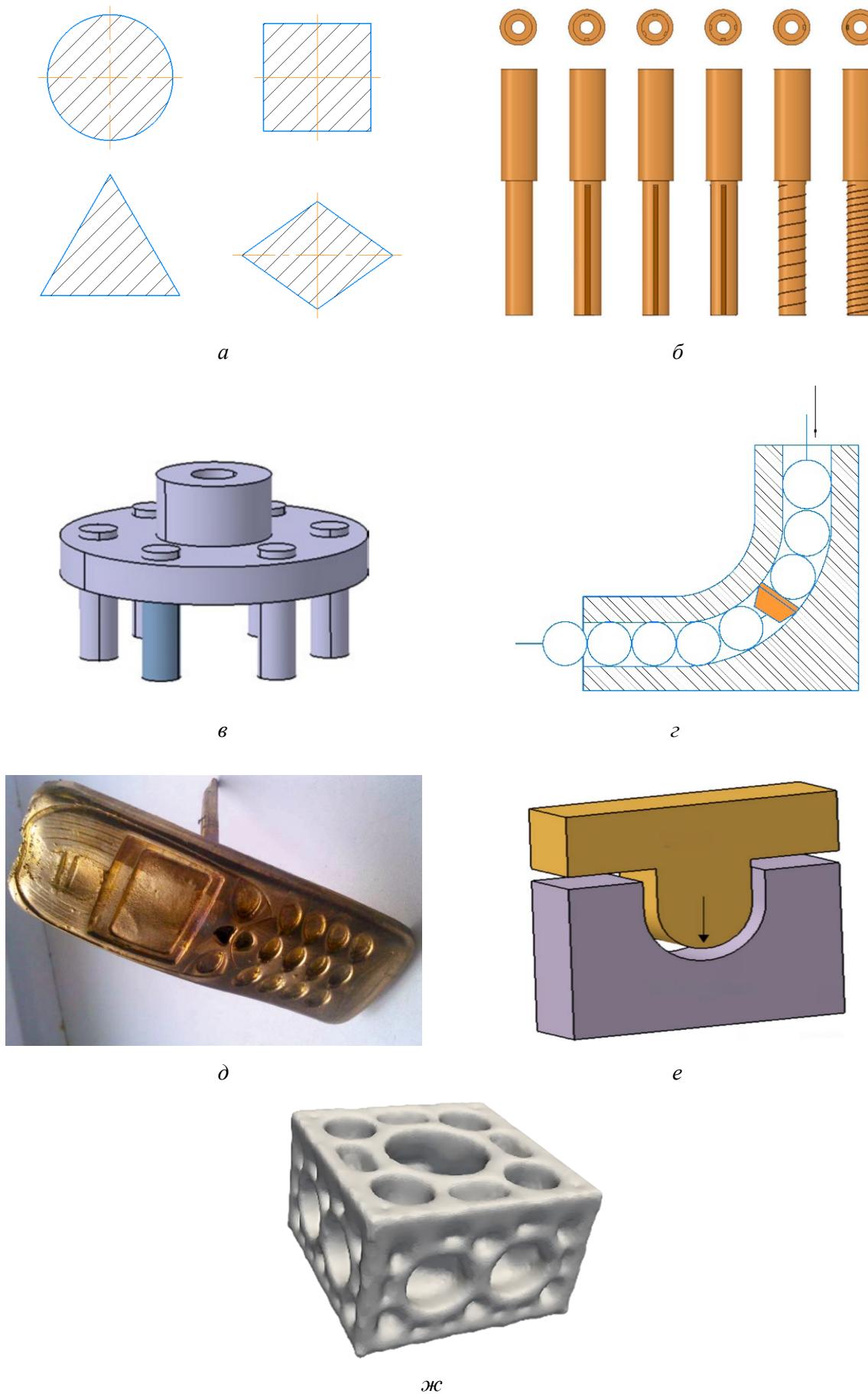


Рис. 5. Конфигурации ЭИ для КПЭЭО

Fig. 5. Tool-electrode configurations for CPEDM

В настоящее время наиболее распространены аддитивные и литейные методы получения ЭИ, электроформование/электроосаждение и порошковая металлургия.

Порошковая металлургия

Технология порошковой металлургии (ПМ) для изготовления электродов является простым и контролируемым методом, предлагающим преимущества по сравнению с другими методами, согласно исследованию [69].

В исследовании Гарба, Абдул-Рани, Юнуса и др. [70] проведен широкий обзор работ, посвященных ЭИ, изготовленным методом порошковой металлургии. Электроды, полученные методом ПМ, могут влиять как на макро-, так и на микропеременные в электроэррозионной обработке, а их свойства можно значительно регулировать, изменяя условия спекания и уплотнения. Порошковая металлургия имеет много преимуществ по сравнению с традиционными методами производства, включая лучший контроль свойств электрода, улучшенную производительность и меньшие затраты.

В работе описано множество исследований, посвященных влиянию материала ЭИ на процесс КПЭЭО и выходные параметры обрабатываемого изделия. Представлена широкая номенклатура материалов, применимых в качестве материала ЭИ только при использовании метода ПМ для их изготовления. Схема изготовления ЭИ методом ПМ представлена на рис. 6.

Метод ПМ, несмотря на свои преимущества, имеет ряд ограничений. Наиболее значимым является сложность изготовления крупногабаритных изделий и ограничение по кривизне профиля. Помимо этого, данному методу свойственны структурные дефекты и неоднородность свойств получаемого изделия, что недопустимо в случае обработки ответственных изделий или при КПЭЭО крупногабаритными ЭИ.

Литье по выплавляемым/выжигаемым моделям

Многочисленные исследования показывают, что литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) дает значительные преимущества для изготовления электродов, позволяя изготавливать сложные формы, сокращать сроки выпуска и снижать производственные затраты [64].

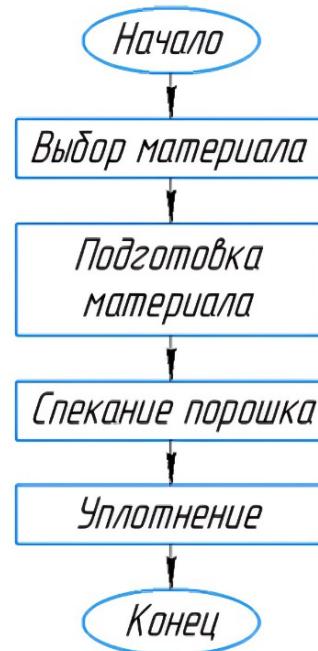


Рис. 6. Схема изготовления ЭИ методом ПМ [71]

Fig. 6. Schematic of tool-electrode manufacturing by powder metallurgy (PM) method [71]

Метод ЛВМ заключается в получении оболочковых форм с помощью восковых или полимерных 3D-моделей изделия и литниковой системы, удаления моделей из формы и последующей заливке расплава материала изделия в форму [49]. ЛВМ позволяет производить ЭИ с высокими показателями чистоты поверхности, тонкостенными конструкциями и сложной геометрией [63].

Схема изготовления изделия с применением ЭИ, полученного методом ЛВМ, представлена на рис. 7.

Авторами работы [64] проведено исследование влияния материала ЭИ, полученного методом ЛВМ, на шероховатость обрабатываемой поверхности. Модели для получения оболочковых форм, как во многих других исследованиях [49, 65–67], изготовлены методом стереолитографии (SLA) из жидких фотополимеров (рис. 8).

Установлено, что полученные ЭИ имеют усадку 0,8...1,9 % и шероховатость поверхности Ra 3,20...6,35 мкм в зависимости от материала. Данные ЭИ обеспечивают шероховатость Ra в пределах 10 мкм.

Существенным недостатком метода ЛВМ являются дефекты, характерные для литейных

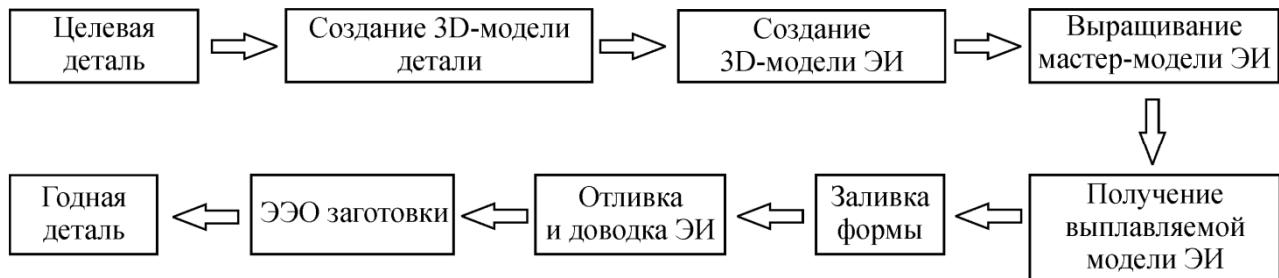
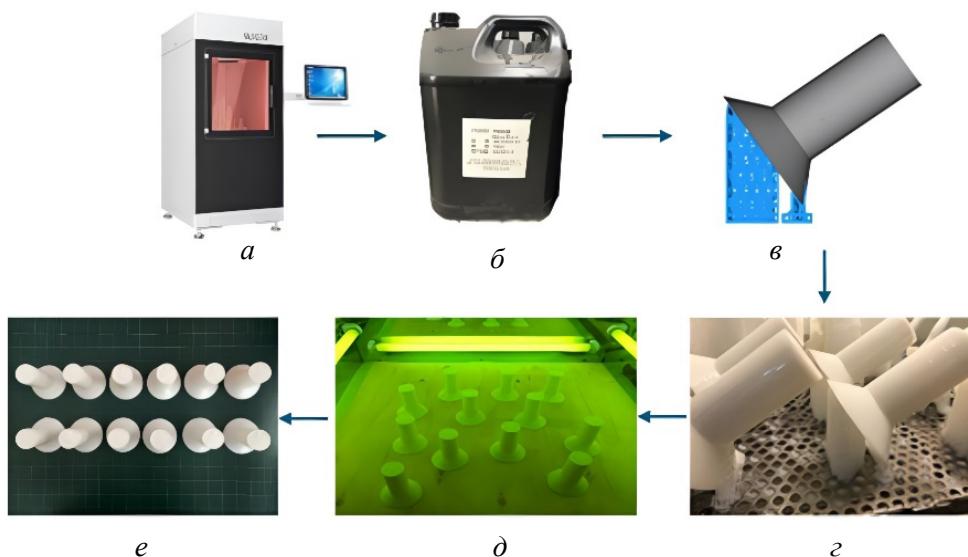


Рис. 7. Схема изготовления изделия с применением ЭИ, полученного методом ЛВМ

Fig. 7. Schematic of finished product manufacturing using an investment cast electrode-tool



*Рис. 8. Процесс прототипирования с использованием метода SLA [64]:
а – 3D-принтер Zongheng SLA-600; б – эпоксидная смола HONY-01; в – проектирование поддержек модели; г – модель в процессе 3D-печати; д – УФ-отверждение; е – готовые модели*

*Fig. 8. Prototyping process using SLA method [64]:
a – Zongheng SLA-600 3D printer; б – HONY-01 epoxy resin; в – model support design;
г – model in 3D printing process; д – UV curing; е – finished models*

процессов и описанные в работе [68], такие как поры, усадочные раковины, трещины. Для минимизации этих дефектов рационально применять современные методы литья, такие как литье под давлением или центробежное литье [64].

Аддитивные методы изготовления ЭИ

В настоящее время наблюдается активное развитие аддитивных технологий при создании сложнопрофильных ЭИ для опытного производства [72].

При изготовлении ЭИ традиционные методы производства ограничивают сложную геометрию и локальную интеграцию каналов [106].

Сравнение цепочек процессов изготовления инструментов с использованием аддитивных и традиционных методов производства представлено на рис. 9.

Современные аддитивные методы изготовления изделий характеризуются как перспективные технологии производства. Они позволяют изготавливать сложнопрофильные ЭИ, обеспечивая высокие показатели точности, со сложной геометрической формой и пространственной конфигурацией и в максимально сжатые сроки. При этом отсутствует необходимость разработки специальных инструментов и оснастки или отдельного плана процесса для каждого изделия [73, 74].

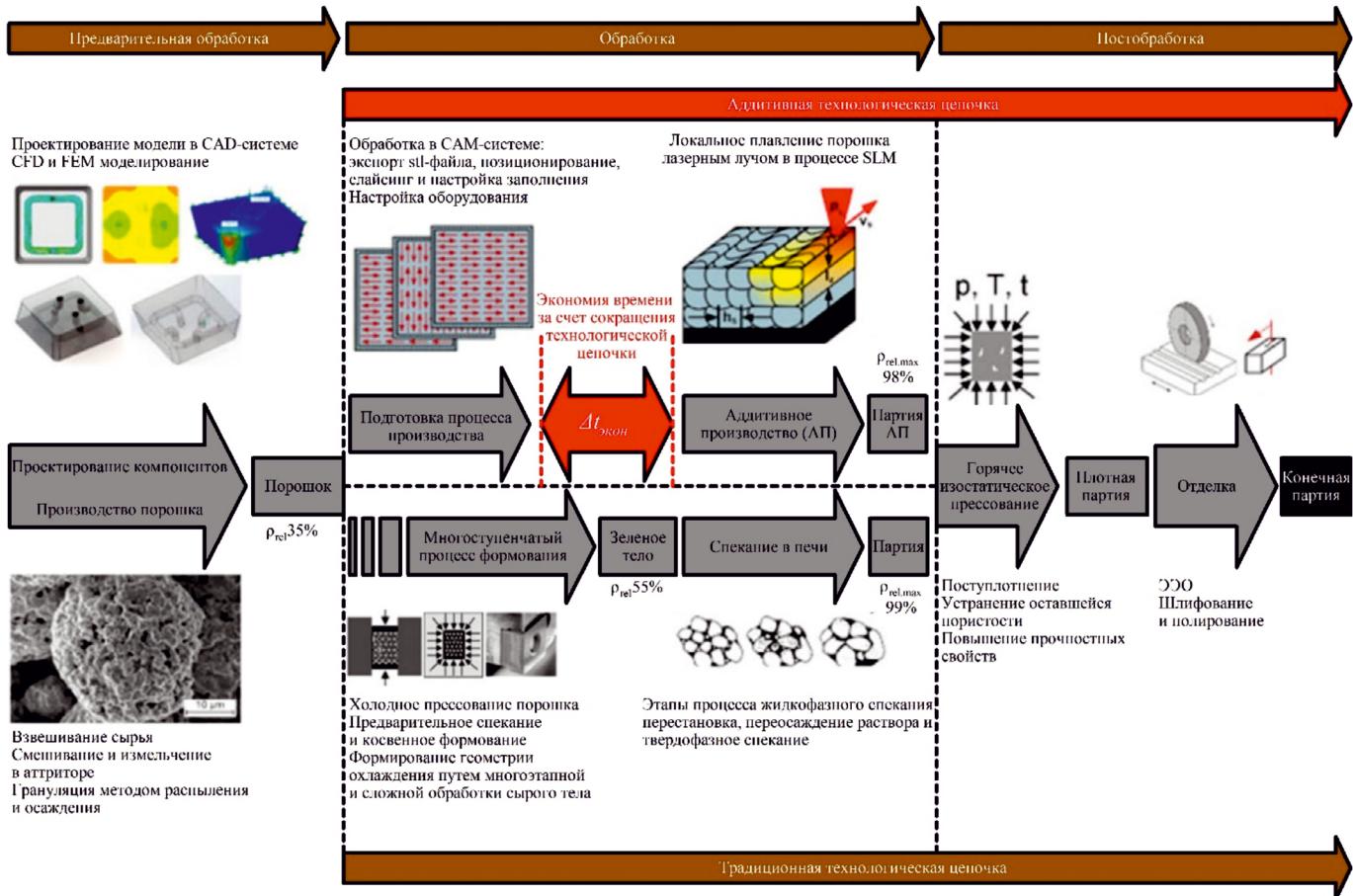


Рис. 9. Сравнение технологических цепочек процессов аддитивного и традиционного производства электродов-инструментов [106]

Fig. 9. Comparison of technological chains of additive manufacturing and traditional production of electrode-tools [106]

Аддитивные методы изготовления ЭИ для КПЭЭО характеризуются рядом преимуществ:

- 1) возможностью применения оборудования в рамках как опытного, так и серийного производства без переналадки;
- 2) энергоэффективностью производства;
- 3) гибкой переналадкой оборудования под изготовление ЭИ разных конфигураций для КПЭЭО различных изделий;
- 4) высоким уровнем автоматизации технологического процесса;
- 5) сокращением временных затрат на технологическую подготовку производства и изготовление ЭИ;
- 6) высоким уровнем повторяемости характеристик технологического процесса и изготовления ЭИ и оснастки;
- 7) широким ассортиментом используемых материалов, а также возможностью их комбинирования и использования на одной единице оборудования;

8) высоким уровнем прогнозируемости временных и материальных затрат всех этапов производства;

9) сокращением количества кадров для обслуживания оборудования, низкой требуемой квалификацией операторов;

10) возможностью варьирования физико-механических свойств материала ЭИ в зависимости от требуемых выходных параметров КПЭЭО.

В настоящее время из широкой номенклатуры аддитивных методов производства наибольшее распространение при изготовлении ЭИ получили следующие технологии:

- FDM (Fused Deposition Modeling – моделирование методом наплавления) – изготовление изделий из термопластичных материалов (например, из ABS или PLA-пластика) за счет по слойного нанесения материала, нагретого до высокоэластичного состояния, в виде нити;
- SLS/SLM (Selective Laser Sintering / Selective Laser Melting – соответственно селек-

тивное лазерное спекание/плавление) – получение изделий из металлических порошкообразных материалов за счет их спекания/плавления лазерным лучом;

- SLA (Stereolithography Apparatus – стереолитография) – послойное выращивание изделия за счет кристаллизации жидких фотополимерных материалов лучом лазера.

Метод послойного наплавления (FDM) – широко распространенный метод 3D-печати, который можно использовать в производстве электродов для КПЭЭО. Метод FDM заключается в расплавлении термопластичного материала (ТПМ) и его выдавливании через сопло для создания 3D-объекта слой за слоем. При изготовлении электродов с помощью FDM термопластичный материал смешивается с электропроводным материалом (ЭПМ) для повышения токопроводности готового ЭИ [75–80].

Этапы создания ЭИ методом FDM представлены на рис. 10.

Исследования в области аддитивных методов производства ЭИ показали, что метод FDM позволяет эффективно производить электроды, которые удовлетворяют технологическим требованиям КПЭЭО [75, 76]. Тем не менее остается вопрос соотношения электроэрозионных свойств ЭИ, полученных данным методом, с ЭИ из сплошного материала, изготовленными с применением лезвийного режущего инструмента или методом литья.

Авторами работы [77] исследована проводимость ЭИ на основе PLA и ABS, произведенных методом FDM. Установлено, что проводимость

материалов возрастала с увеличением времени осаждения, достигая максимальной проводимости через 48 часов. Однако результаты не были подтверждены с помощью обработки в реальном времени и, следовательно, нуждаются в дальнейшей проверке.

Фефар и Караджагикар [78] сравнили электроэрозионные свойства металлизированных ЭИ, полученных методом FDM, со сплошными медными ЭИ при КПЭЭО заготовок из легированной стали EN-19. Исследование показало, что в идентичных условиях обработки производительность металлизированного FDM-электрода не отличалась от производительности сплошного медного электрода. Исследование [79] подтвердило эти данные. Эксперимент показал, что электрод, произведенный с помощью FDM, показал себя лучше, чем сплошной медный электрод.

Данад и др. [80] исследовали возможность обработки детали ABS, изготовленной с помощью FDM, которая впоследствии была покрыта медью для обеспечения электропроводности. Установлено, что данные ЭИ имеют меньшую массу по сравнению с металлическими при сопоставимых значениях производительности.

Недостатки метода FDM при изготовлении ЭИ подробно описаны в обзорном исследовании [70]. Наиболее значимыми являются многоэтапность производства, низкая точность обработки и технологические сложности металлизации.

Селективное лазерное спекание (SLS) – это аддитивный метод производства, позволяющий изготавливать трехмерные сложнопрофильные

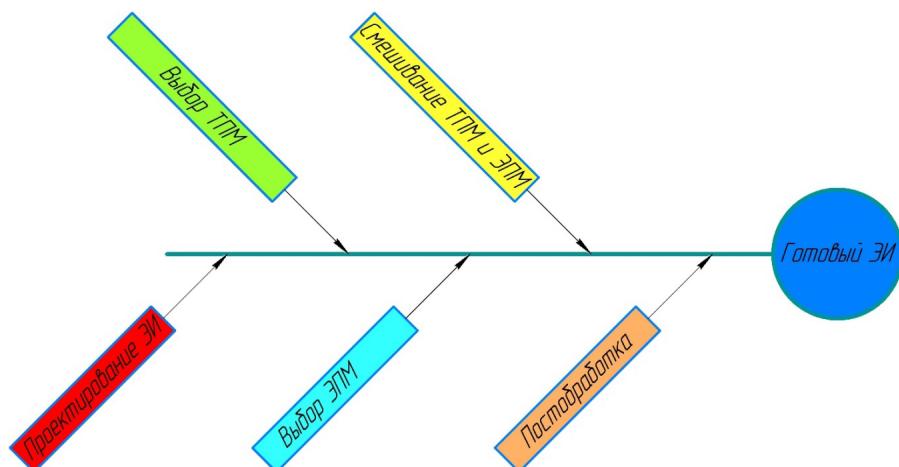


Рис. 10. Схема изготовления ЭИ методом FDM

Fig. 10. Schematic of manufacturing electrode-tools by FDM method

изделия непосредственно из их моделей САПР. Метод SLS создает детали слой за слоем путем консолидации последовательных слоев порошкового материала. Консолидация достигается выборочным сплавлением или спеканием каждого слоя с использованием тепловой энергии, подаваемой сфокусированным лазерным лучом, который с помощью системы отклонения зеркала сканирует слои в соответствии с поперечным сечением математически нарезанной модели САПР объекта. Основной характеристикой SLS является возможность производить детали сложной формы без необходимости использования инструментов. Метод способствует устранению трудоемкой предварительной и последующей обработки по сравнению с традиционными производственными процессами [81–83].

Метод SLS – один из наиболее распространенных альтернативных методов изготовления сложнопрофильных ЭИ, поскольку он способствует сокращению времени выхода готового изделия и затрат на обработку. Это подтверждается многочисленными исследованиями [84].

Важным фактором при SLS-производстве ЭИ является наплавляемый материал. В исследовании [85] описано производство электродов для электроэррозионных инструментов методом SLS с использованием четырех материалов: меди, бронзо-никелевого сплава, стального сплава и комбинации меди и бронзо-никелевого сплава. Микрофотографии поперечного сечения применялись для анализа пористости и поведения при уплотнении электродов. Стальной сплав и бронзо-никелевый сплав продемонстрировали улучшенное поведение при уплотнении и самую низкую пористость по сравнению с Cu и смесями Cu и этих сплавов. Был сделан вывод о том, что добавление бронзо-никелевого сплава к чистой меди улучшило процесс уплотнения.

Авторами работы [86] проведен эксперимент по изучению электродов SLS, изготовленных из порошковых бронзо-никелевых сплавов, медно-бронзо-никелевых сплавов, чистой меди и стальных сплавов. Материалы были выбраны на основе их электроэррозионных свойств и возможности изготовления методом SLS. Сделан вывод о том, что производительность ЭИ, полученных методом SLS, значительно ниже по сравнению с механически обработанными медными ЭИ. Среди ЭИ, полученных методом SLS, лучшие

показатели производительности КПЭЭО продемонстрировали бронзово-никелевые ЭИ. Было также обнаружено, что использование меди в качестве материала ЭИ при изготовлении его лазерным спеканием нерационально.

Помимо традиционных для КПЭЭО материалов (меди, графит, латунь) в настоящее время применяется ряд принципиально новых композиционных материалов, не уступающих по выходным параметрам процесса КПЭЭО стандартным материалам. При этом изделия из данных материалов практически невозможно получить субтрактивными методами обработки.

Л. Аморим и др. сравнили ЭИ из медного порошка и нового композиционного материала с металлической матрицей TiB₂-CuNi, изготовленного методом SLS. В ходе экспериментов по КПЭЭО было обнаружено, что ЭИ из TiB₂-CuNi значительно превосходит электрод из медного порошка [87].

В исследовании [88] представлены три новых материала с металлической матрицей: Mo-CuNi, TiB₂-CuNi и ZrB₂-CuNi. Были изготовлены ЭИ с использованием метода SLS. Эксперименты проводились при различных уровнях энергии разряда, а выходные характеристики КПЭЭО были представлены коэффициентом съема материала и износа инструмента. Результаты показали, что новые композиционные материалы рационально использовать в качестве материала ЭИ. Электроды из данных материалов показали превосходную стабильность КПЭЭО в диапазоне варьируемых параметров процесса.

Существует ряд исследований, которые отражают недостатки ЭИ, изготовленных методом SLS, среди них можно выделить пористость и несплошность полученных ЭИ, а также их повышенный износ.

Дюрр и др. [81] исследовали ЭИ, изготовленные методом SLS из смеси порошков бронзы и никеля. Пористость этих ЭИ достигала 20 %. Авторы обнаружили, что износ таких электродов сопоставим с массивными медными электродами, однако износ был нестабильным, что негативно сказалось на изменении формы ЭИ и обрабатываемой детали. Был проведен повторный эксперимент, в котором ЭИ для снижения пористости были пропитаны. Использование таких ЭИ привело к значительному снижению относительного износа.

Авторы работы [82] также столкнулись со сложностями КПЭЭО ЭИ, полученных методом SLM. Были исследованы ЭИ из порошков чистой меди, бронзово-никелевого сплава, медно-бронзово-никелевого сплава и стального сплава. Электрод из стального сплава, изготовленный методом SLS, практически не удалял материал с заготовки, а производительность остальных ЭИ, полученных методом SLS, была ниже по сравнению со сплошными медными электродами.

Как было сказано ранее, в работах [54–61] отмечается возможность применения методов топологической оптимизации при проектировании ЭИ (рис. 11). Технология SLM является одним из немногих методов, позволяющих изготовить топологически оптимизированные ЭИ. При электроэрозионной обработке ЭИ подвергается комплексному воздействию термодинамических, электрофизических, гидромеханических и других сил. В связи с этим необходимо обеспечивать отсутствие дефектов во внутренней структуре ЭИ, что достигается режимами выращивания.

Установлено, что при изготовлении ЭИ методами SLS и SLM наблюдается появление структурных дефектов, напрямую зависящих от параметров процесса выращивания. Наиболее значимыми параметрами изготовления, влияющими на качество конечного изделия, являются мощность лазера, скорость сканирования, расстояние штриховки, толщина слоя, химический состав порошкового материала и атмосферы в камере выращивания [82]. Наиболее распро-

страненным и трудноустранимым дефектом, который возникает в изделиях, изготовленных методами SLS и SLM, является пористость. Формирование пор обусловлено множеством параметров: физико-химическими свойствами порошкового материала, параметрами оборудования SLM/SLS и технологическими параметрами спекания/плавления [83].

Режимы выращивания также напрямую влияют на количество и размер пор. Вследствие недостаточной плотности мощности расплавление порошкового слоя происходит не в полной мере, наблюдается явление сферодизации, появляются межслойные несплавления, а также несплавления частиц [84]. Появление несплавлений и увеличение пористости может также обуславливаться недостаточным перекрытием единичных дорожек. В процессе наплавки образуются участки несплавлений между единичными дорожками, где частицы порошка не в полной мере подвергаются воздействию лазерного луча [85].

В обратном случае, когда значение плотности мощности тока слишком велико, в связи с испарением материала или компонентов сплава с более низкой температурой плавления также формируются пустоты.

Наличие пор и несплавлений негативно сказывается на эксплуатационных характеристиках ЭИ, значительно увеличивается его износ в процессе ЭЭО. Помимо этого, структурные дефекты, возникающие в процессе изготовления, снижают стабильность процесса искрообразования при КПЭЭО и соответственно параметры производительности и качества обработанной поверхности.

На основе анализа исследований можно утверждать, что метод SLS рационально использовать при изготовлении сложнопрофильных ЭИ, однако применение данного метода требует дополнительных исследований для оптимизации режимов наплавки и минимизации структурных дефектов, а также выбора материалов, одновременно удовлетворяющих процессам КПЭЭО и SLS.

Еще одной группой актуальных методов получения сложнопрофильных ЭИ являются технологии быстрого прототипирования, например электроформования или SLA (послойного выращивания изделия путем отверждения фотополимера лучом лазера) и последующего нанесения

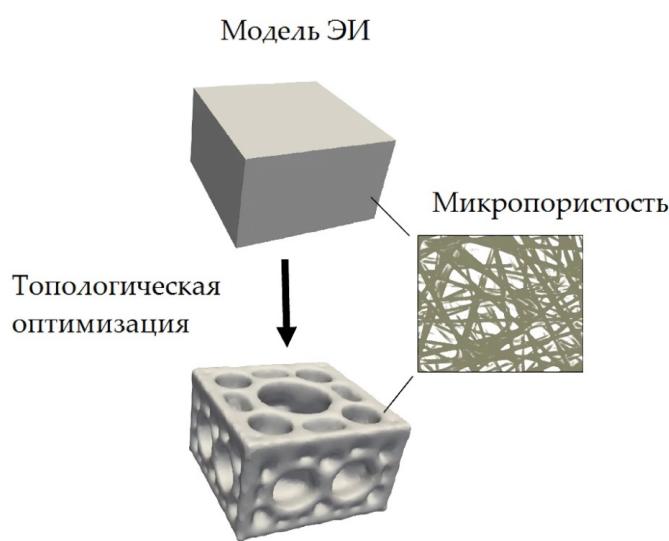


Рис. 11. Оптимизация геометрии ЭИ

Fig. 11. Optimization of electrode-tool geometry

токопроводящего покрытия. Данная совокупность методов может быть использована для одновременного производства нескольких электродов, что дает экономическое преимущество.

При производстве штампов и пресс-форм цикл ЭЭО может составлять от 25 до 40 % от времени освоения инструментального цеха. В современных условиях производства снижение затрат является основной целью, и большой упор делается на сокращение времени выполнения задач. Достижения в области быстрого прототипирования позволили значительно сэкономить время в текущих исследованиях.

Использование этих нетрадиционных методов производства исследуется в работе [10], где данные методы сравниваются с традиционными методами получения ЭИ по времени обработки, скорости съема материала, степени износа инструмента и шероховатости поверхности при нескольких стандартных настройках обработки. Установлено, что традиционно изготовленные электроды выполняются аналогично нетрадиционным (электроформованным) электродам. Если бы электроды могли быть изготовлены с гораздо более равномерной толщиной оболочки, то это могло бы снизить хаотичность появления брака. ЭИ, полученные электроформованием, работают в среднем сравнимо со сплошными электродами.

Исследовательские группы проводят исследования во многих областях быстрого прототипирования ЭИ. Эти исследования показывают, что все еще существуют большие возможности для потенциальных исследований по совершенствованию технологий изготовления сложно-профильных ЭИ.

Харрис и др. [89, 90] установили, что производство малых объемов деталей может быть осуществлено за гораздо меньшее время и с меньшими затратами при использовании аддитивных технологий изготовления ЭИ и быстрой оснастки.

Ногути и Накагава, Чан [91, 92] показали, что сочетание процессов SLA и металлизации методом быстрого формования является рациональным методом производства ЭИ.

В работах [93] и [94] провели сравнение между нетрадиционными электродами, изготовленными методом электроформовки, и традиционными обработанными электродами. Дженсен и др. [94] показали общее сравнение электро-

дов с обработанными электродами, но не дали подробного представления о работе электродов. Исследования Леу и др. [93] показывают более детальное сравнение различных электродов с точки зрения коэффициента съема материала, а также параметра шероховатости R_a , но данная работа основана на процессе КПЭЭО ЭИ, изготовленными традиционными методами.

Важным этапом при изготовлении ЭИ с применением технологий быстрого прототипирования является металлизация нетокопроводных корпусов ЭИ. Нанесенные покрытия должны удовлетворять требованиям токопроводности, однородности, электроэрозионной стойкости и адгезионной прочности. В настоящее время используется несколько методов нанесения покрытий на изделия из нетокопроводных материалов.

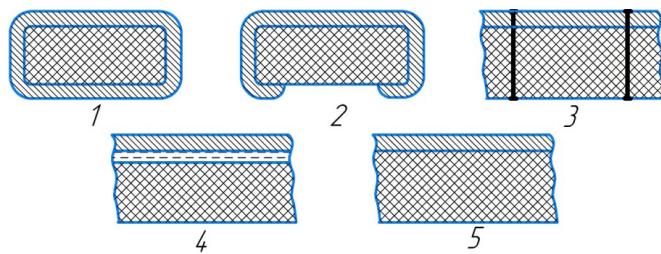
Нетокопроводные материалы, частично или полностью покрытые нанесенным на их поверхность металлом, обладают уникальными характеристиками за счет комбинации полезных свойств проводящих и непроводящих материалов. Данные материалы широко используются во многих отраслях машиностроения [95, 96].

В настоящее время методы металлизации принято классифицировать следующим образом: механические, физические и химические. Каждая группа включает в себя несколько методов, применяемых отдельно или в комбинации друг с другом. Существуют и более подробные классификации методов металлизации – по виду комбинируемых материалов, а также по технологическим особенностям процесса металлизации.

Традиционные и наиболее элементарные механические методы металлизации, когда металлическое покрытие формируется заранее и в готовом виде крепится к поверхности изделия, представлены на рис. 12 [97, 98].

Несмотря на высокую трудоемкость представленных механических методов металлизации, они находят широкое применение при изготовлении малогабаритных изделий. Основное ограничение данных методов заключается в высоком расходе металла на целевое покрытие и в большом количестве отходов. Помимо этого, покрытия, полученные механическими методами, требуют характерной для металлических изделий постобработки финишными методами.

Физические методы, заключающиеся в расплавлении или испарении металла с последу-



Rис. 12. Механические методы металлизации:
1 – обволакивание; 2 –гибание; 3 – заклепывание; 4 – склеивание; 5 – горячее тиснение или заливка [97, 98]

Fig. 12. Mechanical methods of metallization:
1 – wrapping; 2 – bending; 3 – riveting; 4 – gluing; 5 – hot stamping or pouring [97, 98]

ющим осаждением на целевую поверхность (рис. 13), требуют более сложного специального оборудования, однако также широко используются на современных машиностроительных предприятиях [99].

Одним из физических методов, активно применяющимся для металлизации изделий из пластмасс и тканей, является метод металлизации обрызгиванием жидким металлом. Данный метод позволяет получать покрытия из широкого спектра металлов, таких как алюминий, цинк, свинец, медь, никель, олово, а также различных их сплавов. Метод заключается в расплавлении наносимого материала в пламени газовой горелки, в электрической дуге или в потоке плазмы и последующем разбрьзгивании на металлизи-

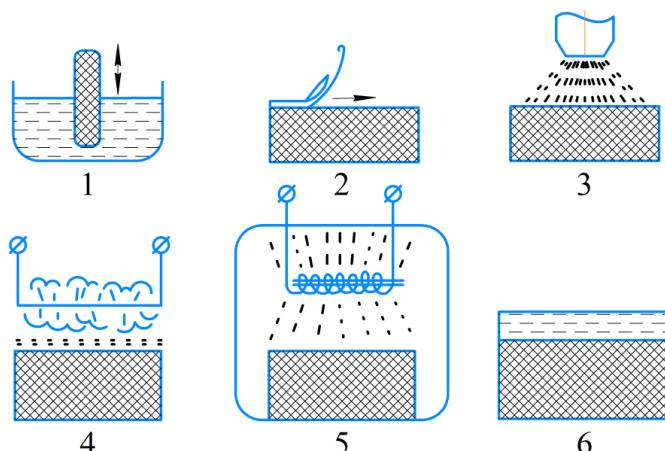


Рис. 13. Физические методы металлизации:
1 – окуривание; 2 – намазывание; 3 – обрызгивание; 4 – взрывание; 5 – напыление (напаривание); 6 – окрашивание [99]

Fig. 13. Physical methods of metallization:
1 – dipping; 2 – smearing; 3 – spraying; 4 – blasting;
5 – spraying (steaming); 6 – painting [99]

руемую поверхность потоками сжатого воздуха или газа.

Электролитические методы металлизации (гальванотехника), как правило, используются для создания широкого спектра покрытий с различными механизмами действия (антикоррозионными, защитно-декоративными, износостойкими, антифрикционными, отражающими), а также для изготовления металлических копий изделий (гальванопластика).

Данные методы металлизации требуют предварительной подготовки целевой поверхности в зависимости от назначения покрытия. Перед нанесением кадмия или оцинковки целевой поверхности требуется ее обезжикивание и травление. В случае хромирования или никелирования помимо удаления жиров и оксидов необходима также механическая подготовка поверхности шлифованием и полированием. Это обусловлено тем, что дефекты поверхности выявляются в процессе нанесения покрытий за счет корреляции плотности тока с микрорельефом поверхности.

В процессе нанесения гальванических покрытий обрабатываемые изделия являются катодом, а пластины из материала покрытия – анодом. В случае нанесения покрытия-сплава используют раздельные аноды (медь и цинк при латунировании).

В работе [100] представлены два типа технологических схем нанесения гальванического покрытия:

1) схема с полным погружением образцов (рис. 14, а) используется для нанесения покрытия на все поверхности металлизируемого изделия и характеризуется высокой скоростью металлизации;

2) схема с постепенным погружением (рис. 14, б) предназначена для металлизации сложнопрофильных изделий. Она позволяет проводить максимальную металлизацию отдельных конструктивных элементов (пазов, полостей и др.).

Для повышения производительности процесса металлизации медью рекомендуется осуществлять дополнительное вращение металлизируемого изделия в процессе обработки.

Методы нанесения токопроводных покрытий при изготовлении ЭИ методами быстрого прототипирования представлены в работе [70].

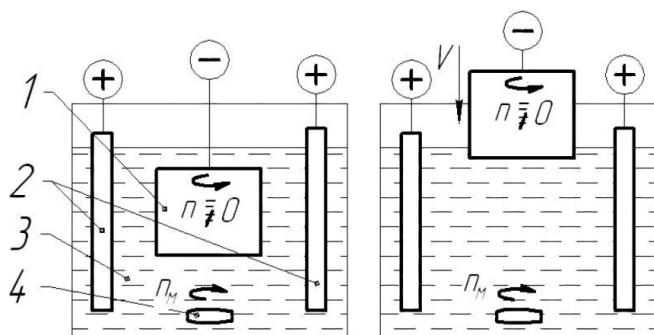


Рис. 14. Схемы гальванической металлизации нетокопроводного изделия с предварительно нанесенным электропроводным покрытием:
а – с полным погружением образца; б – с постепенным погружением образца. 1 – образец; 2 – электроды; 3 – ванна с электролитом; 4 – магнитная мешалка [100]

Fig. 14. Schematics of galvanic metallization for non-conductive substrates with pre-applied conductive coatings:
а – complete immersion; б – gradual immersion. 1 – sample; 2 – electrodes; 3 – electrolyte bath; 4 – magnetic stirrer [100]

Показано, что при производстве ЭИ в основном используются электролитические и гальванические методы.

Технология изготовления ЭИ методом SLA из нетокопроводных полимерных материалов с последующим нанесением токопроводящего покрытия подробно представлена в исследовании [101]. Произведено сравнение выходных параметров КПЭЭО с использованием ЭИ, изготовленных из фотополимерной смолы с нанесенным медным покрытием, и сплошных медных ЭИ, обработанных механически. Этапы создания ЭИ методом SLA представлены на рис. 15. На основе проведенных экспериментов авторы выявили возможность применения полимерных ЭИ с нанесенным медным покрытием. Однако данные ЭИ отличались низкой стойкостью. Это связано с истощением токопроводного покрытия.

Распространение ЭИ, полученных методами быстрого прототипирования, сдерживает ряд недостатков, связанных с нанесенными токопроводящими покрытиями. Авторами критического обзорного исследования [102] наглядно представлены (рис. 16) и описаны дефекты металлических покрытий ЭИ. Показано, что большая

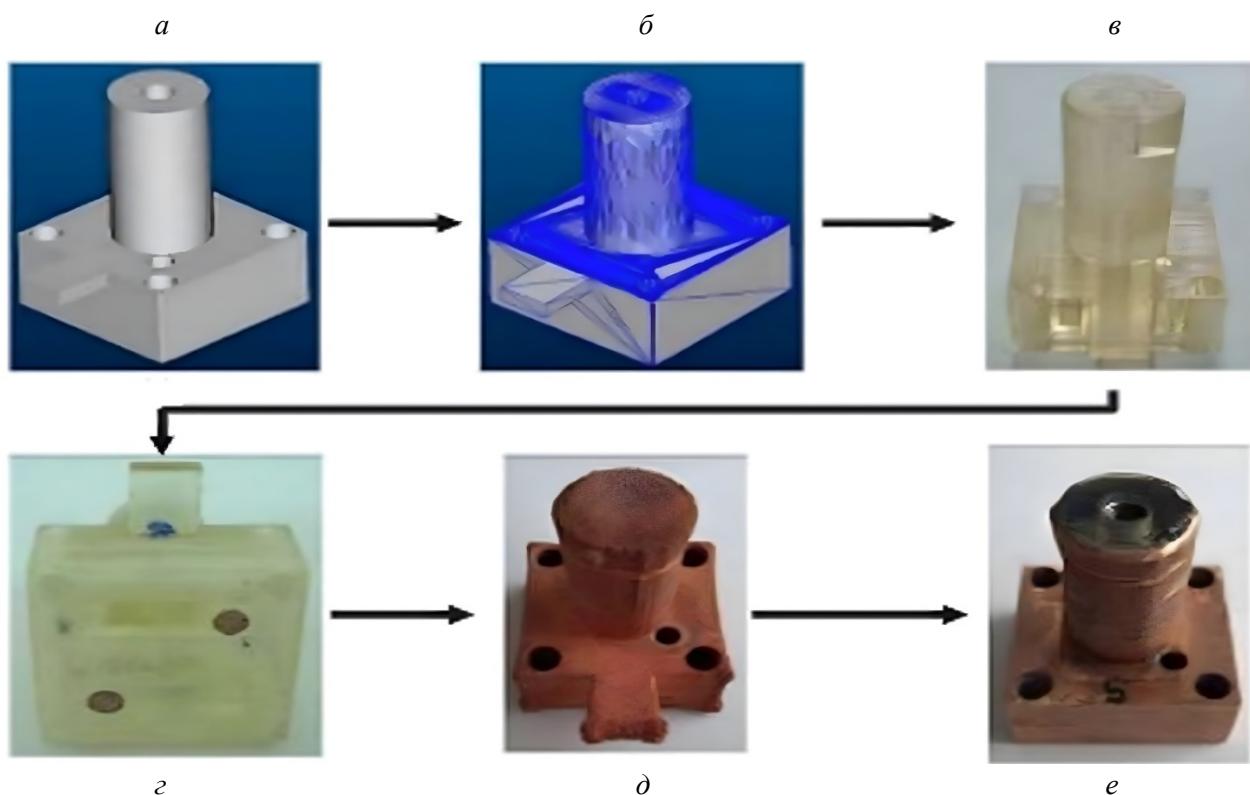
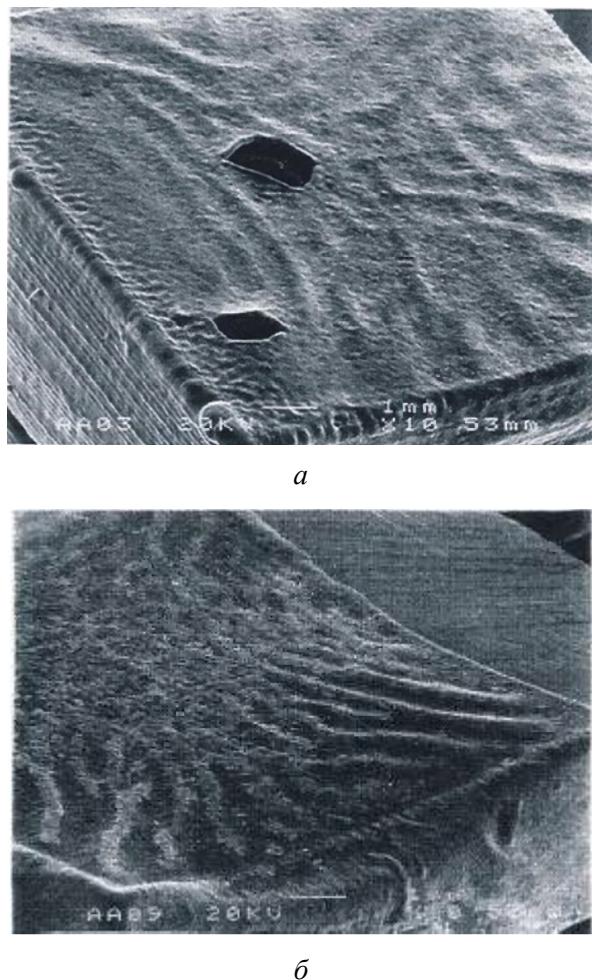


Рис. 15. Этапы создания ЭИ методом SLA и последующего нанесения покрытия [101]:
а, б – создание и подготовка 3D-модели; в, г – получение и подготовка ЭИ к металлизации; д – нанесение покрытия; е – постобработка

Fig. 15. Stages of tool-electrode creation by SLA method and subsequent coating [101]:
а, б – creation and preparation of 3D model; в, г – obtaining and preparing tool-electrode for metallization;
д – coating; е – post-processing



*Rис. 16. Дефекты токопроводного покрытия:
а – отслоения и разрывы; б – деформации [102]*

*Fig. 16. Defects of conductive coating:
a – delaminations and ruptures; б – deformations [102]*

часть дефектов ЭИ возникает в результате неравномерного рассеивания тепла и недостаточной толщины покрытий.

Технологии электроформования и SLA с последующим нанесением токопроводного покрытия применимы для изготовления ЭИ для КПЭО, однако необходимы дополнительные исследования для повышения толщины и качества покрытий.

На основе анализа исследований методов изготовления ЭИ для КПЭО составлена сводная табл. 2.

На основании анализа исследований в области методов изготовления ЭИ для КПЭО можно сделать вывод, что применение аддитивных и других методов, альтернативных традиционной лезвийной обработке, позволит повысить конкурентоспособность современных машиностроительных предприятий, использующих

технологию КПЭО в производственном цикле, за счет снижения себестоимости выпускаемой продукции, уменьшения временных затрат на изготовление ЭИ и расширения номенклатуры обрабатываемых изделий. Однако существует необходимость более детально и подробно разработать технологический процесс с применением альтернативных методов изготовления и получения ЭИ в условиях опытного производства, учитывая недостатки и ограничения данных методов.

Выводы

В настоящей статье проведен обзор исследований, посвященных методам изготовления электродов-инструментов для копировально-прошивной электроэррозионной обработки. Приведены современные тенденции развития конфигураций электродов-инструментов. Выявлены проблемы изготовления сложнопрофильных электродов-инструментов традиционными методами. Установлено, что среди альтернативных методов изготовления электродов-инструментов наибольший интерес современных учёных вызывают литье по выплавляемым моделям, порошковая металлургия и аддитивные методы. Показано, что для каждого метода характерны свои преимущества и недостатки, подтвержденные рядом исследований. Проведенный анализ позволил выделить несколько актуальных направлений для исследований.

Направления будущих исследований

1. Топологическая оптимизация электродов-инструментов для снижения их массогабаритных характеристик при сохранении прочностных и электроэррозионных.

2. Использование современных высокотехнологичных методов литья (литъе под давлением, центробежное литье) при изготовлении электродов-инструментов методом литья по выплавляемым моделям.

3. Расширение номенклатуры новых порошковых материалов с повышенными электроэррозионными свойствами, оптимизация режимов и разработка специализированной оснастки для получения изделий сложного профиля при изготовлении электродов-инструментов методом порошковой металлургии.

Методы изготовления ЭИ
Methods for manufacturing electrode-tools

Метод	Исследования	Преимущества	Недостатки
Традиционные лезвийные методы (точение, фрезерование, абразивная обработка)	[11], [19], [62]	Простор для обработки. Широкий парк оборудования на машиностроительных предприятиях. Возможность получения ЭИ с высокими показателями шероховатости и точности для чистовой КПЭО	Сложности при обработке сложнопрофильных ЭИ. Высокий уровень затрат на режущий инструмент и оснастку. Высокий уровень загрузки оборудования. Высокий износ режущего инструмента при изготовлении ЭИ из материалов с повышенными физико-механическими свойствами
Порошковая металлургия	[69], [70]	Широкая номенклатура материалов ЭИ. Возможность контролировать свойства электрода, изменяя состав материала и условия спекания. Высокая производительность	Сложности при изготовлении сложнопрофильных ЭИ. Сложность изготовления крупногабаритных изделий. Структурные дефекты и неоднородность свойств получаемого изделия. Высокая стоимость оборудования
Литье по выплавляемым моделям (LBM)	[49], [63], [64], [65], [66], [67]	Возможность получения сложнопрофильных и тонкостенных ЭИ. Высокий уровень адаптивности метода в условиях опытного производства. Возможность получения ЭИ с высокими показателями шероховатости. Высокая производительность	Ограниченнная номенклатура материалов ЭИ. Высокая стоимость оборудования. Литейные дефекты (поры, усадочные раковины, трещины). Высокая стоимость оборудования
Метод послойной наплавки (FDM)	[70], [75], [76], [77], [78], [79], [80]	Возможность получения сложнопрофильных и тонкостенных ЭИ. Высокий уровень адаптивности метода в условиях опытного производства. Сниженные массогабаритные характеристики ЭИ. Низкая стоимость оборудования	Сложность изготовления крупногабаритных изделий. Низкие показатели точности и шероховатости ЭИ. Технологические сложности при металлизации
Селективное лазерное спекание (SLS)	[81], [82], [83], [84], [85], [86], [87], [88]	Возможность получения сложнопрофильных и тонкостенных ЭИ. Высокий уровень адаптивности метода в условиях опытного производства. Широкая номенклатура материалов ЭИ	Структурные дефекты и неоднородность свойств получаемого изделия. Высокая стоимость оборудования. Низкие показатели точности и шероховатости ЭИ
Стереолитография (SLA), электроформование	[10], [89], [90], [91], [92], [93], [94], [101], [102]	Возможность получения сложнопрофильных и тонкостенных ЭИ. Высокий уровень адаптивности метода в условиях опытного производства. Сниженные массогабаритные характеристики ЭИ. Низкая стоимость оборудования	Сложность изготовления крупногабаритных изделий. Технологические сложности при металлизации. Низкий ресурс ЭИ. Дефекты покрытий



4. Оптимизация режимов FDM-печати электродов-инструментов для улучшения показателей точности и шероховатости обрабатываемых изделий.

5. Расширение номенклатуры ТПМ и ЭПМ для FDM-печати электродов-инструментов.

6. Расширение номенклатуры новых порошковых материалов с повышенными электроэрозионными свойствами для обеспечения производительности электродов-инструментов, полученных методом SLS, сопоставимой с электродами-инструментами, изготовленными традиционными методами.

7. Оптимизация режимов SLS-печати для снижения пористости и, следовательно, износа электрода-инструмента, а также для повышения точности обработки.

8. Повышение толщины и качества покрытий электродов-инструментов, полученных с применением технологий быстрого прототипирования, для повышения их ресурса за счет стабилизации теплоотвода, увеличения прочностных и электроэрозионных характеристик.

Список литературы

1. Егорова А.О. Конкурентные стратегии предприятий машиностроения: современная российская практика // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2013. – № 2 (34). – С. 45–51.

2. Гунина И.А., Савич Ю.А. К вопросу о проблемах повышения конкурентоспособности машиностроительных предприятий // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2017. – Т. 13, № 2. – С. 136–140.

3. Сергеев А.А. Конкурентоспособность машиностроения: реальность и перспективы // Экономика. Налоги. Право. – 2014. – № 5. – С. 44–49.

4. Головухин С.А., Данилkin В.А. Формирование спроса на наукоемкую машиностроительную продукцию путем обеспечения конкурентных преимуществ // Реформирование системы управления на современном предприятии: сборник материалов конференции. – Пенза: МНИЦ, 2003. – С. 29–30.

5. Самочкин В.Н. Закономерность гибкого развития машиностроительного предприятия как основа его конкурентоспособности // Известия Тульского государственного университета. Экономические и юридические науки. – 2017. – № 4-1. – С. 236–241.

6. Ширяева Ю.С., Оранова М.В. Современный взгляд на опытное производство и механизм управ-

ления им на промышленном предприятии // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2007. – № 6. – С. 197–200.

7. Феоктистов А.Н., Феоктистов К.А., Масюков А.А. Инновационные подходы к технологической подготовке производства в условиях опытного производства самолётов // Наука, техника и образование. – 2024. – № 4 (96). – С. 16–21. – EDN BADMWD.

8. Фокина Д.А., Джамай Е.В., Зинченко А.С. Гибкие производственные системы как основа инновационного развития промышленных предприятий // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Экономика. – 2024. – № 2. – С. 113–121. – DOI: 10.18384/2949-5024-2024-2-113-121. – EDN CLIJVH.

9. Кужсанбаев Р.Т. Особенности планирования и управления мультисерийным производством // Вестник евразийской науки. – 2019. – Т. 11, № 6. – С. 73.

10. Blom R.J. Production and evaluation of rapid tooling for electric discharge machining using electro-forming and spray metal deposition techniques: Master thesis. – Queensland: Queensland University of Technology, 2005. – 169 p.

11. Recent trends and developments in the electrical discharge machining industry: A review / A.A. Kamenskikh, K.R. Muratov, E.S. Shlykov, S.S. Sidhu, A. Mahajan, Y.S. Kuznetsova, T.R. Ablyaz // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2023. – Vol. 7 (6). – P. 204. – DOI: 10.3390/jmmp7060204.

12. Vijayan V., Saju K.K. A comprehensive review of performance improvement in electrical discharge machining and future research scopes: Enhancing performance through cutting-edge technologies // Johnson Matthey Technology Review. – 2025. – Vol. 69 (3). – P. 358–377. – DOI: 10.1595/205651325X17309868513523.

13. Митрюшин Е.А., Моргунов Ю.А., Саукин С.Б. Унифицированные технологии изготовления штампов с применением электрофизических методов обработки // Металлообработка. – 2010. – № 2 (56). – С. 42–45.

14. Тимошенко В.А. Использование электроэрозионного легирования в комплексе мер повышения износостойкости разделительных штампов // Электронная обработка материалов. – 2000. – № 4. – С. 12–16.

15. Khan M.Y., Rao P.S. Electrical discharge machining: Vital to manufacturing industries // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. – 2019. – Vol. 8 (11). – P. 1516–1520. – DOI: 10.35940/ijitee.K1516.0981119.

16. Das S., Paul S., Doloi B. Feasibility assessment of some alternative dielectric mediums for sustainable electrical discharge machining: a review work // Journal

- of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2020. – Vol. 42 (148). – P. 1–21. – DOI: 10.1007/s40430-020-2238-1.
17. Study of the EDM process of bimetallic materials using a composite electrode tool / T.R. Ablyaz, E.S. Shlykov, K.R. Muratov, A.V. Zhurin // Materials. – 2022. – Vol. 15 (3). – DOI: 10.3390/ma15030750.
18. Schulze V., Ruhs C. On-machine measurement for the micro-EDM-milling process using a confocal white-light sensor // Proceedings of the 10th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN). – Delft, 2010. – Vol. 2. – P. 37–40.
19. Электроэррозионная и электрохимическая обработка: расчет, проектирование, изготовление и применение электродов-инструментов. В 2 ч. Ч. 1. Электроэррозионная обработка / под ред. А.Л. Лившица, А. Рома. – М., 1980. – 224 с.
20. Interaction of machining parameters on MRR of sintered NdFeB processed by EDM-milling / X. Zhang, X. Bai, T. Yang, L. Li // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15 (9). – DOI: 10.3390/app15094897.
21. Uhlmann E., Polte M., Yabroudi S. Novel advances in machine tools, tool electrodes and processes for high-performance and high-precision EDM // Procedia CIRP. – 2022. – Vol. 113. – P. 611–635. – DOI: 10.1016/j.procir.2022.10.080.
22. The non-traditional and multi-energy field hybrid machining processes of cemented carbide: a comprehensive review / K. Zeng, X. Wu, F. Jiang, J. Shen, L. Zhu, Q. Wen, H. Li // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – Vol. 133. – P. 3561–3592. – DOI: 10.1007/s00170-024-13791-6.
23. Experimental analysis of wire-EDM on sub-cooled low-carbon tool steel using hybrid MARCOS method and honey badger algorithm / M. Priyadarshini, S. Pradhan, A. Barua, A. Behera, S. Kanchan // Surface Review and Letters. – 2023. – Vol. 31 (2). – DOI: 10.1142/S0218625X24500495.
24. Khan A., Ali M., Haque M.M. A study of electrode shape configuration on the performance of die sinking EDM // International Journal of Mechanical and Materials Engineering. – 2009. – Vol. 4 (1). – P. 19–23.
25. Yamaguchi A., Okada A., Miyake T. Development of curved hole drilling method by EDM with suspended ball electrode – optimization of suspending parts structure and possibility of curved hole drilling // Seimitsu Kogaku Kaishi / Journal of the Japan Society for Precision Engineering. – 2015. – Vol. 81 (5). – P. 435–440. – DOI: 10.2493/jjspe.81.435.
26. Shah J. Optimization of process parameters for AISI 304 using micro-EDM drilling process: A review // Journal of Mechanical Engineering and Technology. – 2024. – Vol. 13 (1). – P. 26–37.
27. A comprehensive review on powder mixed electrical discharge machining: advances in dielectric enhancement and machining efficiency / D. Kumar, V. Pathak, R. Singh, M. Dikshit // Discover Applied Sciences. – 2025. – Vol. 7 (1). – DOI: 10.1007/s42452-025-07365-8.
28. Puertas-Arbizu I., Salvide-González U., Luis-Pérez C. Study of spacing surface roughness parameters and proposal of a wear behaviour criterion in die-sinking EDM of cobalt-bonded tungsten carbide // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. – Vol. 139. – P. 1–13. – DOI: 10.1007/s00170-025-16091-9.
29. Unravelling the analysis of electrical discharge machining process parameters, microstructural morphology, surface integrity, recast layer formation, and material properties: A comparative study of aluminum, brass, and Inconel 617 materials / K. Paswan, S. Sharma, C. Li, K. Mohammed, A. Kumar, M. Abbas, E. Tag-Eldin // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Vol. 27. – P. 2881–2902. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.11.186.
30. Self-adjusting EDM/ECM high speed drilling of film cooling holes / C. Li, B. Zhang, Y. Li, H. Tong, S. Ding, Z. Wang, L. Zhao // Journal of Materials Processing Technology. – 2018. – Vol. 262. – P. 95–103. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.06.026.
31. The state of the art of electrical discharge drilling: a review / X. Mao, S. de Almeida, J. Mo, S. Ding // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – Vol. 121 (7–8). – P. 4919–4950. – DOI: 10.1007/s00170-022-09549-7.
32. Chuvaree S., Kanlayasiri K. Effects of side flushing and multi-aperture inner flushing on characteristics of electrical discharge machining macro deep holes // Metals. – 2021. – Vol. 11 (1). – DOI: 10.3390/met11010148.
33. Karim M.A., Jahan M.P. Electrical discharge machining technologies in the aerospace industry // Modern Manufacturing Processes for Aircraft Materials. – Elsevier, 2024. – P. 171–226. – DOI: 10.1016/B978-0-323-95318-4.00007-0.
34. Kumar R., Singh I. Productivity improvement of micro EDM process by improvised tool // Precision Engineering. – 2018. – Vol. 51. – P. 529–535. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.10.008.
35. Helical electrodes for electro-discharge drilling: experimental and CFD-based analysis of the influence of internal and external flushing geometries on the process characteristics / E. Uhlmann, M. Polte, S. Yabroudi, N. Gerhard, E. Sakharova, K. Thißen, W. Penske // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2023. – Vol. 7 (6). – DOI: 10.3390/jmmp7060217.
36. Jamkamon K., Janmanee P. Improving machining performance for deep hole drilling in the electrical

- discharge machining process using a step cylindrical electrode // *Applied Sciences.* – 2021. – Vol. 11 (5). – DOI: 10.3390/app11052084.
37. *Sahoo A., Mishra D.* Experimental characteristic evaluation of micro hole EDM drilling of $\text{Ni}_{51.58}\text{Ti}_{48.34}$ alloy with copper electrode and response optimization using GRG assisted with // *Journal of Engineering and Applied Science.* – 2024. – Vol. 71 (1). – P. 1–22. – DOI: 10.1186/s44147-024-00447-1.
38. High speed short electric arc deep hole drilling experimental study based on tube electrode / G. Hu, F. Fu, S. Zhang, W. Gao, J. Zhang, J. Wang // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2025. – Vol. 139. – P. 1087–1103. – DOI: 10.1007/s00170-025-15827-x.
39. *Jamkamon K., Kumkoon P., Chuvaree S.* Influence of electrical parameters on the machining performance in the small hole drilling by EDM process // *Solid State Phenomena.* – 2023. – Vol. 349. – P. 33–39. – DOI: 10.4028/p-CtB8KO.
40. Machining performance of silicon carbide ceramic in end electric discharge milling / R. Ji, Y. Liu, Y. Zhang, F. Wang // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials.* – 2011. – Vol. 29 (1). – P. 117–122. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2010.09.001.
41. Патент № 2802609 C1 Российской Федерации, МПК B23H 7/32, B23H 9/14. Устройство для электроэрозионной прошивки отверстия электродом-инструментом: № 2022127775: заявл. 26.10.2022: опубл. 30.08.2023 / Т.Р. Абляз, Е.С. Шлыков, И.В. Осинников [и др.]; заявитель Пермский национальный исследовательский политехнический университет.
42. *Makireddi D., Puri Y., Ghuge V.* Development of crank-connecting rod attachment for electric discharge machining of curved holes // *Advances in Mechanical Engineering.* – Singapore: Springer, 2021. – P. 777–783. – DOI: 10.1007/978-981-15-3639-7_93.
43. *Okada A., Yamaguchi A., Ota K.* Improvement of curved hole EDM drilling performance using suspended ball electrode by workpiece vibration // *CIRP Annals.* – 2017. – Vol. 66 (1). – P. 189–192. – DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.125.
44. Development of curved hole drilling method by EDM with suspended ball electrode-improvement in shape accuracy of bending holes using foil supporting guide / A. Yamaguchi, Y. Inaba, S. Shiraga, A. Okada // *Seimitsu Kogaku Kaishi / Journal of the Japan Society for Precision Engineering.* – 2021. – Vol. 87 (5). – P. 461–466. – DOI: 10.2493/jjspe.87.461.
45. Fundamental study on internal space forming by EDM / Y. Inaba, S. Li, A. Yamaguchi, A. Okada // *Procedia CIRP.* – 2020. – Vol. 95. – P. 215–219. – DOI: 10.1016/j.procir.2020.01.156.
46. *Hsue A.W.J., Pan Y.D., Lu L.W.* A novel string-bead EDM mechanism for dressing of the conformal cooling channel fabricated by the SLM-additive manufacture // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2021. – Vol. 2020 (1). – DOI: 10.1088/1742-6596/2020/1/012035.
47. *Grzesik W., Ruszaj A.* Physical fundamentals of conventional and unconventional machining processes // Grzesik W., Ruszaj A. *Hybrid manufacturing processes.* – Cham: Springer, 2021. – P. 35–60. – DOI: 10.1007/978-3-030-77107-2_4.
48. *Singh K., Singh K., Khan M.* Investigation and optimization of process parameters in the electrical discharge machining process for Inconel 660 using response surface methodology // *Future Technology.* – 2025. – Vol. 4. – P. 22–29. – DOI: 10.55670/fpl.futech.4.2.3.
49. Особенности применения электродов-инструментов, изготовленных аддитивными технологиями, при электроэррозионной обработке изделий / Т.Р. Абляз, В.Б. Блохин, Е.С. Шлыков, К.Р. Муратов, И.В. Осинников // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).* – 2024. – Т. 26, № 3. – С. 135–148. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-135-148.
50. *Lozhkin D.V., Maksimov P.V.* Topological optimization of a part taking into account technological constraints // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2021. – Vol. 1100 (1). – DOI: 10.1088/1757-899x/1100/1/012036.
51. *Даглдяян А.О., Ложкин Д.В., Максимов П.В.* Методология топологической оптимизации изделий с ячеистыми структурами // *Научно-технический вестник Поволжья.* – 2022. – № 12. – С. 41–44.
52. *Ложкин Д.В., Максимов П.В.* Проектирование облегченных изделий на основе методов топологической оптимизации // *Математика и междисциплинарные исследования – 2021: материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием.* – Пермь, 2021. – С. 76–80.
53. Использование топологической оптимизации и сетчатых микроструктур в проектировании деталей для аддитивного производства / П.В. Максимов, К.В. Фетисов, А.И. Курчев, А.С. Белоусов // *СТИН.* – 2021. – № 2. – С. 38–44.
54. *Ambrosi A., Shi R.R.S., Webster R.D.* 3D-printing for electrolytic processes and electrochemical flow systems // *Journal of Materials Chemistry A.* – 2020. – Vol. 8 (42). – P. 21902–21929. – DOI: 10.1039/D0TA07939A.
55. *Forner-Cuenca A., Brushett F.R.* Engineering porous electrodes for next-generation redox flow batteries: recent progress and opportunities // *Current Opinion in Electrochemistry.* – 2019. – Vol. 18. – P. 113–122. – DOI: 10.1016/j.coelec.2019.11.002.
56. *Haverkort J.* A theoretical analysis of the optimal electrode thickness and porosity // *Electrochimica Acta.*

- Acta. – 2019. – Vol. 295. – P. 846–860. – DOI: 10.1016/j.electacta.2018.10.065.
57. Roy T., Salazar de Troya M.A., Beck V.A. LLNL/TOPE: topology optimization for porous electrodes // Zenodo. – 2022. – DOI: 10.5281/zenodo.6366849.
58. Topology optimization for the design of porous electrodes / T. Roy, M.A. Salazar de Troya, M.A. Worsley, V.A. Beck // Structural and Multi-disciplinary Optimization. – 2022. – Vol. 65. – Art. 171. – DOI: 10.1007/s00158-022-03249-2.
59. 3D microstructure design of lithium-ion battery electrodes assisted by X-ray nano-computed tomography and modelling / X. Lu, A. Bertei, D.P. Finegan, C. Tan, S.R. Daemi, J.S. Weaving, K.B. O'Regan, T.M.M. Heenan, G. Hinds, E. Kendrick, D.J.L. Brett, P.R. Shearing // Nature Communications. – 2020. – Vol. 11. – DOI: 10.1038/s41467-020-15811-x.
60. Park S.H., Goodall G., Kim W.S. Perspective on 3D-designed micro-supercapacitors // Materials & Design. – 2020. – Vol. 193. – DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108797.
61. Strategies and challenge of thick electrodes for energy storage: A review / J. Zheng, G. Xing, L. Jin, Y. Lu, N. Qin, S. Gao, J. Zheng // Batteries. – 2023. – Vol. 9 (3). – DOI: 10.3390/batteries9030151.
62. Goiogana M., Elkaseer A. Self-flushing in EDM drilling of Ti6Al4V using rotating shaped electrodes // Materials. – 2019. – Vol. 12 (6). – DOI: 10.3390/ma12060989.
63. Insight into various casting material selections in rapid investment casting for making EDM electrodes / T.T. Nguyen, V.-T. Nguyen, V.T. Tran, A.T. Le, T.D. Nguyen, Q.D. Huynh, M.T. Ho, M.P. Dang, H.G. Le, V.T.T. Nguyen // Micromachines. – 2025. – Vol. 16 (5). – DOI: 10.3390/mi16050595.
64. A critical insight into the use of FDM for production of EDM electrode / A. Equbal, M.I. Equbal, I.A. Badruddin, A.A. Algahtani // Alexandria Engineering Journal. – 2022. – Vol. 61 (5). – P. 4057–4066. – DOI: 10.1016/j.aej.2021.09.033.
65. Equbal A., Equbal M.I., Sood A.K. An investigation on the feasibility of fused deposition modelling process in EDM electrode manufacturing // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2019. – Vol. 26. – P. 10–25. – DOI: 10.1016/j.cirpj.2019.07.001.
66. Khan M., Rao P.S., Pabla B.S. On the use of copper tool developed by Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) process for electrical discharge machining // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 455. – DOI: 10.1051/e3sconf/202345502014.
67. Purwar U., Javed A., Vidya S. A review on research aspects and trends in rapid prototyping and tooling assisted investment casting // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 46 (11). – P. 6704–6707. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.04.172.
68. Innovative electrode tool manufacturing methods for electrode discharge machining / M. Sugavaneswaran, R.A. John, H. Bhagywani, V. Wilson, J. Swaminathan, S. Selvaraj // Artificial Intelligence in Material Science. – Boca Raton: CRC Press, 2024. – P. 81–107. – DOI: 10.1201/9781003452515-5.
69. Significance of the powder metallurgy approach and its processing parameters on the mechanical behavior of magnesium-based materials / S. Sharma, S. Gajević, L. Sharma, D.G. Mohan, Y. Sharma, M. Radojković, B. Stojanovic // Nanomaterials. – 2025. – Vol. 15 (2). – DOI: 10.3390/nano15020092.
70. A review of electrode manufacturing methods for electrical discharge machining: current status and future perspectives for surface alloying / E. Garba, A.M. Abdul-Rani, N.A. Yunus, A.A.A. Aliyu, I.A. Gul, M. Al-Amin, R.A. Aliyu // Machines. – 2023. – Vol. 11 (9). – DOI: 10.3390/machines11090906.
71. Sundaram C., Sivasubramanian R., Sivakumar M. Development of new metal matrix composite electrodes for electrical discharge machining through powder metallurgy process // Carbon – Science and Technology. – 2014. – Vol. 6 (4). – P. 34–40.
72. Investigation of controlled microrelief formation on products obtained by selective laser melting using copy-penetrating electro-erosion processing / T.R. Ablyaz, E.S. Shlykov, K.R. Muratov, V.B. Blokhin, I.V. Osinnikov, V.V. Shiryaev // Russian Engineering Research. – 2024. – Vol. 44 (12). – P. 1823–1826. – DOI: 10.3103/S1068798X24703076.
73. Equbal A., Equbal M.I., Sood A.K. PCA-based desirability method for dimensional improvement of part extruded by fused deposition modeling technology // Progress in Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 4 (3). – P. 269–280. – DOI: 10.1007/s40964-018-00072-4.
74. Evaluating machining performance of acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) based electrical discharge machining (EDM) electrodes fabricated by fused deposition modelling (FDM) followed by a novel metallization method / A. Equbal, S. Ahmad, I. Badruddin, Z. Khan, S. Kamangar, J. Syed // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2023. – Vol. 238 (2). – P. 209–222. – DOI: 10.1177/09544054221151093.
75. Shirbhate N.J., Vinchurkar S.M., Borade A.B. FDM technology for EDM electrode fabrication: progress, prospects, and perspectives // International Journal of Mechanical Engineering. – 2024. – Vol. 11 (9). – P. 11–27. – DOI: 10.14445/23488360/IJME-V11I9P102.
76. Understanding melt pool characteristics in laser powder bed fusion: An overview of single- and multi-track melt pools for process optimization / J. Wang, R. Zhu, Y. Liu, L. Zhang // Advanced Powder

Materials. – 2023. – Vol. 2 (4). – DOI: 10.1016/j.apmate.2023.100137.

77. Electric discharge machining – A potential choice for surface modification of metallic implants for orthopedic applications: a review / C. Prakash, H.K. Kansal, B. Pabla, S. Puri, A. Aggarwal // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2016. – Vol. 230 (2). – P. 331–353. – DOI: 10.1177/0954405415579113.

78. *Fefar S.D., Karajagikar M.J.S.* Study and analysis of metallized electrode fabricated with FDM rapid prototyping technique for electro discharge machining (EDM) // Proceedings of the 5th International & 26th All India Manufacturing Technology Design and Research Conference (AIMTDR 2014). – 2014. – P. 37–42.

79. Surface modification of strenx 900 steel using electrical discharge alloying process with Cu-10Ni-Cr_x powder metallurgy sintered electrode / S. Sridhar, S.V. Valeti, V. Koti, S. Sathish, R.R. Chand, N.S. Sivakumar, M. Mahesh., R. Subbiah, G. Veerappan // Materials Research. – 2022. – Vol. 25. – DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2021-0390.

80. *Danade U.A., Londhe S.D., Metkar R.M.* Machining performance of 3D-printed ABS electrode coated with copper in EDM // Rapid Prototyping Journal. – 2019. – Vol. 25 (7). – P. 1224–1231. – DOI: 10.1108/RPJ-11-2018-0297.

81. *Dürr H., Pilz R., Eleser N.S.* Rapid tooling of EDM electrodes by means of selective laser sintering // Computers in Industry. – 1999. – Vol. 39 (1). – P. 35–45. – DOI: 10.1016/S0166-3615(98)00123-7.

82. Performance of sinking EDM electrodes made by selective laser sintering technique / F.L. Amorim, A. Lohrengel, N. Müller, G. Schäfer, T. Czelusniak // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 65 (9–12). – P. 1423–1428. – DOI: 10.1007/s00170-012-4267-0.

83. Electro-discharge machining using copper-coated additively-manufactured AlSi10Mg electrodes / A. Sahu, S. Mahapatra, A. Patterson, M. Leite, P. Peças, Y. Singh, S. Sahoo // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. – 2024. – Vol. 239 (8). – P. 1462–1471. – DOI: 10.1177/14644207241293919.

84. A study in EDM electrode manufacturing using additive manufacturing / R. Mohije, H. Titre, V. Gohil, D.B. Meshram // Materials Today: Proceedings. – 2023. – DOI: 10.1016/j.matpr.2023.01.044.

85. *Amorim F.L., Czelusniak T., Higa C.F.* Producing sinking EDM electrodes using selective laser sintering technique // 7th Brazilian Congress on Manufacturing Engineering. – Penedo, Brazil, 2013. – P. 1–10.

86. *Torres A., Luis C.J., Puertas I.* Analysis of the influence of EDM parameters on surface finish, material removal rate, and electrode wear of an INCONEL

600 alloy // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 80 (1–4). – P. 123–140. – DOI: 10.1007/s00170-015-6974-9.

87. A study on the SLS manufacturing and experimenting of TiB₂-CuNi EDM electrodes / F.L. Amorim, A. Lohrengel, G. Schäfer, T. Czelusniak // Rapid Prototyping Journal. – 2013. – Vol. 19 (6). – P. 418–429. – DOI: 10.1108/RPJ-03-2012-0019.

88. Development and application of new composite materials as EDM electrodes manufactured via selective laser sintering / T. Czelusniak, F.L. Amorim, C.F. Higa, A. Lohrengel // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 72 (9). – P. 1503–1512. – DOI: 10.1007/s00170-014-5765-z.

89. *Harris R.A., Hague R.J.M., Dickens P.M.* The structure of parts produced by stereolithography injection mould tools and the effect on part shrinkage // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2004. – Vol. 44 (1). – P. 59–64. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2003.08.007.

90. *Harris R.A., Newlyn H.A., Dickens P.M.* Part shrinkage anomalies from stereolithography injection mould tooling // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2003. – Vol. 43 (9). – P. 879–887. – DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00080-4.

91. *Noguchi H., Nakagawa T.* Manufacturing of high precision forming tool transferred from laser stereolithography models by powder casting method // Computers in Industry. – 1999. – Vol. 39 (1). – P. 55–60.

92. *Chan S.F., Law C.K., Wong T.T.* Re-engineering the roto-casting mould making process // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 139 (1–3). – P. 527–534. – DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00532-6.

93. *Leu M.C., Yang B., Yao W.* Feasibility study of EDM tooling using metallized stereolithography models // Society of Manufacturing Engineers (SME) Engineering Technical Paper. MR98-180. – SME, 1998. – P. 1–6.

94. *Jensen K.L., Hovtun R.* Making electrodes for EDM with rapid prototyping // 2nd European Conference of Rapid Prototyping. – University of Nottingham, 1993. – P. 221–233.

95. A review on additively manufactured electrodes for use in electro-discharge process / E. Garba, A. Majdi, A. Azeez, A.A. Aliyu, I. Gul, R. Aliyu // Journal of Electrical Systems. – 2024. – Vol. 20 (10s). – P. 6919–6930.

96. Electrical discharge machining by rapid tools prepared by micro stereo-lithography process with copper metallization / A. Sahu, S. Mahapatra, A. Martin, A. Schubert, M. Leite, P. Peças // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – Art. 22667. – DOI: 10.1038/s41598-025-07020-7.

97. Identifying adhesion characteristics of metal-polymer interfaces: Recent advances in the case of electroplated acrylonitrile butadiene styrene /

- A. Yudhanto, X. Li, R. Tao, R. Melentiev, G. Lubineau // Materials Today Communications. – 2023. – Vol. 35. – DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106218.
98. Mandal P., Chatterjee S., Chakraborty S. Bi-objective optimization of an EDM process with Cu-MWCNT composite tool using single-valued neutrosophic grey relational analysis // World Journal of Engineering. – 2025. – Vol. 22 (3). – P. 472–481. – DOI: 10.1108/WJE-10-2023-0443.
99. Constructing antibacterial responsive multi-functionalized agent CSA13 loaded on a hydroxyapatite-TiO₂ nanotube network / S. Swain, M. Pradhan, S. Das, T. Rautray // Materials Chemistry and Physics. – 2025. – Vol. 333. – DOI: 10.1016/j.matchemphys.2024.130337.
100. Wang L.-N., Luo J.-L. Preparation of hydroxyapatite coating on CoCrMo implant using an effective electrochemically-assisted deposition pretreatment // Materials Characterization. – 2011. – Vol. 62 (11). – P. 1076–1086. – DOI: 10.1016/j.matchar.2011.08.002.
101. Anil D., Çoğun C. Performance of copper-coated stereolithographic electrodes with internal cooling channels in electric discharge machining (EDM) // Rapid Prototyping Journal. – 2008. – Vol. 14. – P. 202–212. – DOI: 10.1108/13552540810896157.
102. Equbal A., Sood A.K. Problems and challenges in EDM electrode fabrication using RP: A critical review // World Applied Sciences Journal. – 2013. – Vol. 28. – P. 1127–1133. – DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.28.08.1461.
103. Reddy G.K., Esanakula J.R. Optimization of operating parameters of wire EDM using design of experiments criteria // International Conference on Self Sustainable Artificial Intelligence Systems (ICSSAS), Erode, India. – IEEE, 2023. – P. 1504–1509. – DOI: 10.1109/ICSSAS57918.2023.10331679.
104. Residual stress and its modification strategies in the surface/sub-surface layer of components machined by electrical discharge machining: a review / X. Duan, K. Saxena, J. Wang, M.H. Arshad, I. Ayesta, Y. Wang, D. Reynaerts, X. Yang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. – Vol. 139. – P. 41–58. – DOI: 10.1007/s00170-025-15861-9.
105. Improving the performance of EDM through relief-angled tool designs / N. Mufti, M. Rafaqat, N. Ahmed, M. Saleem, A. Hussain, A. Al-Ahmari // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10 (7). – Art. 2432. – DOI: 10.3390/app10072432.
106. Review on characterization, impacts and optimization of EDM parameters on composite structure in additive manufacturing / L. Selvarajan, K. Venkataraman, K.P. Srinivasa Perumal, S. Alghanmi, S. Paulraj, V. Ellappan, K. Venkatesh, B. Choudhury, S. Jayamurugan, G. Sakthivel, N. Kasthuri // Progress in Additive Manufacturing. – 2025. – Vol. 10. – P. 4573–4624. – DOI: 10.1007/s40964-024-00907-3.
107. Kumar P., Shekhar A., Yadav S.K.S. Experimental analysis of electrical discharge drilling (EDD) of carbon-carbon composite // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 22. – P. 3106–3115. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.447.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Modern methods of manufacturing of complex-profile electrode-tools for electrical discharge machining: a literature review

Timur Ablyaz^a, Ilya Osinnikov^b, Evgeniy Shlykov^{c,*}, Karim Muratov^d, Vladimir Blokhin^e

Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-6607-4692>, lowrider11-13-11@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0009-0006-4478-3803>, ilyuhaosinnikov@bk.ru;
^c <https://orcid.org/0000-0001-8076-0509>, Kruspert@mail.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0001-7612-8025>, Karimur_80@mail.ru;
^e <https://orcid.org/0009-0009-2693-6580>, warkk98@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 11 June 2025

Revised: 04 July 2025

Accepted: 09 September 2025

Available online: 15 December 2025

Keywords:

Experimental production
 Electrical discharge machining
 Tool electrode
 Tool electrode configuration
 Fabrication methods
 Additive methods
 Rapid prototyping technologies
 Investment casting
 Powder metallurgy

ABSTRACT

Introduction. Pilot production plays an important role in modern mechanical engineering. Copy-piercing electrical discharge machining (*CPEDM*) technology has become widespread in machining pilot parts manufactured in flexible production flows. Manufacturing tool-electrodes (*TE*) is one of the main stages of the *CPEDM* technological cycle. **Purpose of the work.** Review of existing studies of modern methods of manufacturing tool-electrodes for electrical discharge machining. **Research methods.** A literature review of studies in the field of electrical discharge machining devoted to tool-electrodes, carried out mainly over the past 20 years, is presented. Various configurations of structural elements machined using *CPEDM* technology, as well as *TE* configurations for their machining, are described. The dependences of the influence of the geometric parameters of the simplest *TE* configurations on the output parameters of *CPEDM* are shown. The main groups of *TE* manufacturing methods are identified. The limitations, advantages, and disadvantages of alternative methods to traditional ones are described. The main trends in the development of modern *TE* manufacturing methods are revealed. **Results and discussion.** Based on the literature review of modern research in the field of electrical discharge machining, current trends in the development of tool-electrode configurations are presented, and problems in the manufacture of complex-shaped tool-electrodes using traditional methods are identified. It has been established that among the alternative methods for manufacturing tool-electrodes, investment casting, powder metallurgy, and additive methods are of greatest interest to modern scientists. It has been shown that each method has its own advantages and disadvantages, confirmed by a number of studies. The following current areas of development of complex-shaped tool-electrodes and methods for their manufacture are highlighted: topological optimization of tool-electrodes, use of modern high-tech casting methods; expansion of the range of tool-electrodes materials with improved electrical discharge properties; optimization of powder metallurgy modes, *FDM* printing, and selective laser melting; increasing the thickness and quality of tool-electrodes coatings obtained using rapid prototyping technologies.

For citation: Ablyaz T.R., Osinnikov I.V., Shlykov E.S., Muratov K.R., Blokhin V.B. Modern methods of manufacturing of complex-profile electrode-tools for electrical discharge machining: a literature review. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 4, pp. 148–179. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-148-179. (In Russian).

References

1. Egorova A.O. Konkurentnye strategii predpriyatiy mashinostroeniya: sovremennoye rossiyskaya praktika [Mechanical engineering enterprises' competitive strategies: present-day Russian practice]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie = Modern High Technologies. Regional Application*, 2013, no. 2 (34), pp. 45–51.
2. Gunina I.A., Savich Y.A. K voprosu o problemakh povysheniya konkurentospособности mashinostroitel'nykh predpriyatiy [The questions about the problems of increase of the competitiveness of machine-building enterprise]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2017, vol. 13, no. 2, pp. 136–140.

* Corresponding author

Shlykov Evgeniy S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Perm National Research Polytechnic University,
 29 Komsomolsky prospekt,
 614990, Perm, Russian Federation
 Tel.: +7 961 759-88-49, e-mail: Kruspert@mail.ru

3. Sergeev A.A. Konkurentosposobnost' mashinostroeniya: real'nost' i perspektivy [Competitiveness of mechanical engineering: reality and prospects]. *Ekonomika. Nalogi. Pravo = Economics, Taxes & Law*, 2014, no. 5, pp. 44–49. (In Russian).
4. Golovikhin S.A., Danilkin V.A. [Formation of demand for high-tech engineering products by ensuring competitive advantages]. *Reformirovaniye sistemy upravleniya na sovremennom predpriyatiyi* [Reforming the management system at a modern enterprise]. Collection of conference materials. Penza, MNITS Publ., 2003, pp. 29–30. (In Russian).
5. Samochkin V.N. Zakonomernost' gibkogo razvitiya mashinostroitel'nogo predpriyatiya kak osnova ego konkurentosposobnosti [Principle of flexible development of machine-building enterprise as a basis for its competitiveness]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomicheskie i yuridicheskie nauki = News of the Tula State University. Economic and Legal Sciences*, 2017, no. 4-1, pp. 236–241.
6. Shiryaeva Yu.S., Oranova M.V. Sovremennyyi vzglyad na optynoe proizvodstvo i mekhanizm upravleniya im na promyshlennom predpriyatiyi [Modern views of experimental production and the mechanism of its management at an industrial enterprise]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo = Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod*, 2007, no. 6, pp. 197–200.
7. Feoktistov A.N., Feoktistov K.A., Masyukov A.A. Innovatsionnye podkhody k tekhnologicheskoi podgotovke proizvodstva v usloviyakh optytnogo proizvodstva samoletov [Innovative approaches to technological preparation of production in the conditions of pilot production of aircraft]. *Nauka, tekhnika i obrazovanie = Science, technology and education*, 2024, no. 4 (96), pp. 16–21.
8. Fokina D.A., Dzhambay E.V., Zinchenko A.S. Gibkie proizvodstvennye sistemy kak osnova innovatsionnogo razvitiya promyshlennykh predpriyatiy [Flexible production systems as the basis for innovative development of industrial enterprises]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta prosveshcheniya. Seriya: Ekonomika = Bulletin of the State University of Education. Series: Economics*, 2024, no. 2, pp. 113–121. DOI: 10.18384/2949-5024-2024-2-113-121.
9. Kuzhanbaev R.T. Osobennosti planirovaniya i upravleniya mul'tiseriinym proizvodstvom [Features of planning and management of multi-series production]. *Vestnik evraziiskoi nauki = The Eurasian Scientific Journal*, 2019, vol. 11, no. 6, p. 73. (In Russian).
10. Blom R.J. *Production and evaluation of rapid tooling for electric discharge machining using electroforming and spray metal deposition techniques*. Master thesis. Queensland, Queensland University of Technology, 2005. 169 p.
11. Kamenskikh A.A., Muratov K.R., Shlykov E.S., Sidhu S.S., Mahajan A., Kuznetsova Y.S., Ablyaz T.R. Recent trends and developments in the electrical discharge machining industry: A review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2023, vol. 7 (6), p. 204. DOI: 10.3390/jmmp7060204.
12. Vijayan V., Saju K.K. A comprehensive review of performance improvement in electrical discharge machining and future research scopes: Enhancing performance through cutting-edge technologies. *Johnson Matthey Technology Review*, 2025, vol. 69 (3), pp. 358–377. DOI: 10.1595/205651325X17309868513523.
13. Mitryushin E.A., Morgunov Yu.A., Saushkin S.B. Unifitsirovannye tekhnologii izgotovleniya shtampov s primenением elektrofizicheskikh metodov obrabotki [Unified technologies for manufacturing stamps using electrophysical processing methods]. *Metalloobrabotka = Metalworking*, 2010, no. 2 (56), pp. 42–45. (In Russian).
14. Timoshchenko V.A. Ispol'zovanie elektroerozionnogo legirovaniya v kompleksse mer povysheniya iznosostoikosti razdelitel'nykh shtampov [The use of electroerosion alloying in a complex of measures to increase the wear resistance of dividing stamps]. *Elektronnaya obrabotka materialov = Electronic Processing of Materials*, 2000, no. 4, pp. 12–16. (In Russian).
15. Khan M.Y., Rao P.S. Electrical discharge machining: Vital to manufacturing industries. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2019, vol. 8 (11), pp. 1516–1520. DOI: 10.35940/ijitee. K1516.0981119.
16. Das S., Paul S., Doloi B. Feasibility assessment of some alternative dielectric mediums for sustainable electrical discharge machining: a review work. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, vol. 42 (148), pp. 1–21. DOI: 10.1007/s40430-020-2238-1.
17. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Muratov K.R., Zhurin A.V. Study of the EDM process of bimetallic materials using a composite electrode tool. *Materials*, 2022, vol. 15 (3). DOI: 10.3390/ma15030750.
18. Schulze V., Ruhs C. On-machine measurement for the micro-EDM-milling process using a confocal white-light sensor. *Proceedings of the 10th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN)*. Delft, 2010, vol. 2, pp. 37–40.

19. Livshits A.L., Rosh A., eds. *Elektroerozionnaya i elektrokhimicheskaya obrabotka: raschet, proektirovaniye, izgotovlenie i primenenie elektrodov-instrumentov*. V 2 ch. Ch. 1. *Elektroerozionnaya obrabotka* [Electroerosive and electrochemical processing: Calculation, design, manufacture and application of electrode-tools. In 2 pt. Pt. 1: Electroerosive processing]. Moscow, 1980. 224 p. (In Russian).
20. Zhang X., Bai X., Yang T., Li L. Interaction of machining parameters on MRR of sintered NdFeB processed by EDM-milling. *Applied Sciences*, 2025, vol. 15 (9). DOI: 10.3390/app15094897.
21. Uhlmann E., Polte M., Yabroudi S. Novel advances in machine tools, tool electrodes and processes for high-performance and high-precision EDM. *Procedia CIRP*, 2022, vol. 113, pp. 611–635. DOI: 10.1016/j.procir.2022.10.080.
22. Zeng K., Wu X., Jiang F., Shen J., Zhu L., Wen Q., Li H. The non-traditional and multi-energy field hybrid machining processes of cemented carbide: a comprehensive review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, vol. 133, pp. 3561–3592. DOI: 10.1007/s00170-024-13791-6.
23. Priyadarshini M., Pradhan S., Barua A., Behera A., Kanchan S. Experimental analysis of wire-EDM on sub-cooled low-carbon tool steel using hybrid MARCOS method and honey badger algorithm. *Surface Review and Letters*, 2023, vol. 31 (2). DOI: 10.1142/S0218625X24500495.
24. Khan A., Ali M., Haque M.M. A study of electrode shape configuration on the performance of die sinking EDM. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2009, vol. 4 (1), pp. 19–23.
25. Yamaguchi A., Okada A., Miyake T. Development of curved hole drilling method by EDM with suspended ball electrode – optimization of suspending parts structure and possibility of curved hole drilling. *Seimitsu Kogaku Kaishi = Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 2015, vol. 81 (5), pp. 435–440. DOI: 10.2493/jjspe.81.435.
26. Shah J. Optimization of process parameters for AISI 304 using micro-EDM drilling process: A review. *Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2024, vol. 13 (1), pp. 26–37.
27. Kumar D., Pathak V., Singh R., Dikshit M. A comprehensive review on powder mixed electrical discharge machining: advances in dielectric enhancement and machining efficiency. *Discover Applied Sciences*, 2025, vol. 7 (1). DOI: 10.1007/s42452-025-07365-8.
28. Puertas-Arbizu I., Salvíde-González U., Luis-Pérez C. Study of spacing surface roughness parameters and proposal of a wear behaviour criterion in die-sinking EDM of cobalt-bonded tungsten carbide. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, vol. 139, pp. 1–13. DOI: 10.1007/s00170-025-16091-9.
29. Paswan K., Sharma S., Li C., Mohammed K., Kumar A., Abbas M., Tag-Eldin E. Unravelling the analysis of electrical discharge machining process parameters, microstructural morphology, surface integrity, recast layer formation, and material properties: A comparative study of aluminum, brass, and Inconel 617 materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 27, pp. 2881–2902. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.11.186.
30. Li C., Zhang B., Li Y., Tong H., Ding S., Wang Z., Zhao L. Self-adjusting EDM/ECM high speed drilling of film cooling holes. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, vol. 262, pp. 95–103. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.06.026.
31. Mao X., de Almeida S., Mo J., Ding S. The state of the art of electrical discharge drilling: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, vol. 121 (7–8), pp. 4919–4950. DOI: 10.1007/s00170-022-09549-7.
32. Chuvaree S., Kanlayasiri K. Effects of side flushing and multi-aperture inner flushing on characteristics of electrical discharge machining macro deep holes. *Metals*, 2021, vol. 11 (1). DOI: 10.3390/met11010148.
33. Karim M.A., Jahan M.P. Electrical discharge machining technologies in the aerospace industry. *Modern Manufacturing Processes for Aircraft Materials*. Elsevier, 2024, pp. 171–226. DOI: 10.1016/B978-0-323-95318-4.00007-0.
34. Kumar R., Singh I. Productivity improvement of micro EDM process by improvised tool. *Precision Engineering*, 2018, vol. 51, pp. 529–535. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.10.008.
35. Uhlmann E., Polte M., Yabroudi S., Gerhard N., Sakharova E., Thißen K., Penske W. Helical electrodes for electro-discharge drilling: experimental and CFD-based analysis of the influence of internal and external flushing geometries on the process characteristics. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2023, vol. 7 (6). DOI: 10.3390/jmmp7060217.
36. Jamkamon K., Janmanee P. Improving machining performance for deep hole drilling in the electrical discharge machining process using a step cylindrical electrode. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11 (5). DOI: 10.3390/app11052084.

37. Sahoo A., Mishra D. Experimental characteristic evaluation of micro hole EDM drilling of Ni_{51.58}Ti_{48.34} alloy with copper electrode and response optimization using GRG assisted with GA. *Journal of Engineering and Applied Science*, 2024, vol. 71 (1), pp. 1–22. DOI: 10.1186/s44147-024-00447-1.
38. Hu G., Fu F., Zhang S., Gao W., Zhang J., Wang J. High speed short electric arc deep hole drilling experimental study based on tube electrode. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, vol. 139, pp. 1087–1103. DOI: 10.1007/s00170-025-15827-x.
39. Jamkamon K., Kumkoon P., Chuvaree S. Influence of electrical parameters on the machining performance in the small hole drilling by EDM process. *Solid State Phenomena*, 2023, vol. 349, pp. 33–39. DOI: 10.4028/p-CtB8KO.
40. Ji R., Liu Y., Zhang Y., Wang F. Machining performance of silicon carbide ceramic in end electric discharge milling. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2011, vol. 29 (1), pp. 117–122. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2010.09.001.
41. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Osinnikov I.V., et al. *Ustroistvo dlya elektroerozionnoi proshivki otversitiya elektrod-instrumentom* [Device for electrical discharge piercing of a hole with an electrode-tool]. Patent RF, no. 2802609, 2023. (In Russian).
42. Makireddi D., Puri Y., Ghuge V. Development of crank-connecting rod attachment for electric discharge machining of curved holes. *Advances in Mechanical Engineering*. Singapore, Springer, 2021, pp. 777–783. DOI: 10.1007/978-981-15-3639-7_93.
43. Okada A., Yamaguchi A., Ota K. Improvement of curved hole EDM drilling performance using suspended ball electrode by workpiece vibration. *CIRP Annals*, 2017, vol. 66 (1), pp. 189–192. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.125.
44. Yamaguchi A., Inaba Y., Shiraga S., Okada A. Development of curved hole drilling method by EDM with suspended ball electrode-improvement in shape accuracy of bending holes using foil supporting guide. *Seimitsu Kogaku Kaishi = Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 2021, vol. 87 (5), pp. 461–466. DOI: 10.2493/jjspe.87.461.
45. Inaba Y., Li S., Yamaguchi A., Okada A. Fundamental study on internal space forming by EDM. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 95, pp. 215–219. DOI: 10.1016/j.procir.2020.01.156.
46. Hsue A.W.J., Pan Y.D., Lu L.W. A novel string-bead EDM mechanism for dressing of the conformal cooling channel fabricated by the SLM-additive manufacture. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2020 (1). DOI: 10.1088/1742-6596/2020/1/012035.
47. Grzesik W., Ruszaj A. Physical fundamentals of conventional and unconventional machining processes. Grzesik W., Ruszaj A. *Hybrid manufacturing processes*. Cham, Springer, 2021, pp. 35–60. DOI: 10.1007/978-3-030-77107-2_4.
48. Singh K., Singh K., Khan M. Investigation and optimization of process parameters in the electrical discharge machining process for Inconel 660 using response surface methodology. *Future Technology*, 2025, vol. 4, pp. 22–29. DOI: 10.55670/fpl.futech.4.2.3.
49. Ablyaz T.R., Blokhin V.B., Shlykov E.S., Muratov K.R., Osinnikov I.V. Features of the use of tool electrodes manufactured by additive technologies in electrical discharge machining of products. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 3, pp. 135–148. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-135-148.
50. Lozhkin D.V., Maksimov P.V. Topological optimization of a part taking into account technological constraints. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1100 (1). DOI: 10.1088/1757-899x/1100/1/012036.
51. Dagld'yan A.O., Lozhkin D.V., Maksimov P.V. Metodologiya topologicheskoi optimizatsii izdelii s yacheistyimi strukturami [Methodology of topological optimization of products with cellular structures]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Volga region Bulletin*, 2022, no. 12, pp. 41–44.
52. Lozhkin D.V., Maksimov P.V. [Designing lightweight products based on topological optimization methods]. *Matematika i mezdistsiplinarnye issledovaniya – 2021* [Mathematics and Interdisciplinary Research – 2021]. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists with International Participation. Perm, 2021, pp. 76–80. (In Russian).
53. Maksimov P.V., Fetisov K.V., Kurchev A.I., Belousov A.S. Ispol'zovanie topologicheskoi optimizatsii i setchatykh mikrostruktur v proektirovani detalei dlya additivnogo proizvodstva [Topology optimization and lattice microstructures in the design of parts for additive manufacturing]. *STIN = Russian Engineering Research*, 2021, no. 2, pp. 38–44. (In Russian).
54. Ambrosi A., Shi R.R.S., Webster R.D. 3D-printing for electrolytic processes and electrochemical flow systems. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, vol. 8 (42), pp. 21902–21929. DOI: 10.1039/D0TA07939A.

55. Forner-Cuenca A., Brushett F.R. Engineering porous electrodes for next-generation redox flow batteries: recent progress and opportunities. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2019, vol. 18, pp. 113–122. DOI: 10.1016/j. coelec.2019.11.002.
56. Haverkort J. A theoretical analysis of the optimal electrode thickness and porosity. *Electrochimica Acta*, 2019, vol. 295, pp. 846–860. DOI: 10.1016/j.electacta.2018.10.065.
57. Roy T., Salazar de Troya M.A., Beck V.A. LLNL/TOPE: topology optimization for porous electrodes. *Zenodo*, 2022. DOI: 10.5281/zenodo.6366849.
58. Roy T., Salazar de Troya M.A., Worsley M.A., Beck V.A. Topology optimization for the design of porous electrodes. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2022, vol. 65, art. 171. DOI: 10.1007/s00158-022-03249-2.
59. Lu X., Bertei A., Finegan D.P., Tan C., Daemi S.R., Weaving J.S., O'Regan K.B., Heenan T.M.M., Hinds G., Kendrick E., Brett D.J.L., Shearing P.R. 3D microstructure design of lithium-ion battery electrodes assisted by X-ray nano-computed tomography and modelling. *Nature Communications*, 2020, vol. 11. DOI: 10.1038/s41467-020-15811-x.
60. Park S.H., Goodall G., Kim W.S. Perspective on 3D-designed micro-supercapacitors. *Materials & Design*, 2020, vol. 193. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108797.
61. Zheng J., Xing G., Jin L., Lu Y., Qin N., Gao S., Zheng J. Strategies and challenge of thick electrodes for energy storage: A review. *Batteries*, 2023, vol. 9 (3). DOI: 10.3390/batteries9030151.
62. Goiogana M., Elkaseer A. Self-flushing in EDM drilling of Ti6Al4V using rotating shaped electrodes. *Materials*, 2019, vol. 12 (6). DOI: 10.3390/ma12060989.
63. Nguyen T.T., Nguyen V.-T., Tran V.T., Le A.T., Nguyen T.D., Huynh Q.D., Ho M.T., Dang M.P., Le H.G., Nguyen V.T.T. Insight into various casting material selections in rapid investment casting for making EDM electrodes. *Micromachines*, 2025, vol. 16 (5). DOI: 10.3390/mi16050595.
64. Equbal A., Equbal M.I., Badruddin I.A., Algahtani A.A. A critical insight into the use of FDM for production of EDM electrode. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, vol. 61 (5), pp. 4057–4066. DOI: 10.1016/j.aej.2021.09.033.
65. Equbal A., Equbal M.I., Sood A.K. An investigation on the feasibility of fused deposition modelling process in EDM electrode manufacturing. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2019, vol. 26, pp. 10–25. DOI: 10.1016/j.cirpj.2019.07.001.
66. Khan M., Rao P.S., Pabla B.S. On the use of copper tool developed by Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) process for electrical discharge machining. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 455. DOI: 10.1051/e3sconf/202345502014.
67. Purwar U., Javed A., Vidya S. A review on research aspects and trends in rapid prototyping and tooling assisted investment casting. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 46 (11), pp. 6704–6707. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.04.172.
68. Sugavaneswaran M., John R.A., Bhagywani H., Wilson V., Swaminathan J., Selvaraj S. Innovative electrode tool manufacturing methods for electrode discharge machining. *Artificial Intelligence in Material Science*. Boca Raton, CRC Press, 2024, pp. 81–107. DOI: 10.1201/9781003452515-5.
69. Sharma S., Gajević S., Sharma L., Mohan D.G., Sharma Y., Radojković M., Stojanovic B. Significance of the powder metallurgy approach and its processing parameters on the mechanical behavior of magnesium-based materials. *Nanomaterials*, 2025, vol. 15 (2). DOI: 10.3390/nano15020092.
70. Garba E., Abdul-Rani A.M., Yunus N.A., Aliyu A.A.A., Gul I.A., Al-Amin M., Aliyu R.A. A review of electrode manufacturing methods for electrical discharge machining: current status and future perspectives for surface alloying. *Machines*, 2023, vol. 11 (9). DOI: 10.3390/machines11090906.
71. Sundaram C., Sivasubramanian R., Sivakumar M. Development of new metal matrix composite electrodes for electrical discharge machining through powder metallurgy process. *Carbon – Science and Technology*, 2014, vol. 6 (4), pp. 34–40.
72. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Muratov K.R., Blokhin V.B., Osinnikov I.V., Shiryaev V.V. Investigation of controlled microrelief formation on products obtained by selective laser melting using copy-penetrating electro-erosion processing. *Russian Engineering Research*, 2024, vol. 44 (12), pp. 1823–1826. DOI: 10.3103/S1068798X24703076.
73. Equbal A., Equbal M.I., Sood A.K. PCA-based desirability method for dimensional improvement of part extruded by fused deposition modeling technology. *Progress in Additive Manufacturing*, 2019, vol. 4 (3), pp. 269–280. DOI: 10.1007/s40964-018-00072-4.
74. Equbal A., Ahmad S., Badruddin I., Khan Z., Kamangar S., Syed J. Evaluating machining performance of acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) based electrical discharge machining (EDM) electrodes fabricated

by fused deposition modelling (FDM) followed by a novel metallization method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2023, vol. 238 (2), pp. 209–222. DOI: 10.1177/09544054221151093.

75. Shirbhate N.J., Vinchurkar S.M., Borade A.B. FDM technology for EDM electrode fabrication: progress, prospects, and perspectives. *International Journal of Mechanical Engineering*, 2024, vol. 11 (9), pp. 11–27. DOI: 10.14445/23488360/IJME-V11I9P102.

76. Wang J., Zhu R., Liu Y., Zhang L. Understanding melt pool characteristics in laser powder bed fusion: An overview of single- and multi-track melt pools for process optimization. *Advanced Powder Materials*, 2023, vol. 2 (4). DOI: 10.1016/j.apmate.2023.100137.

77. Prakash C., Kansal H.K., Pabla B., Puri S., Aggarwal A. Electric discharge machining – A potential choice for surface modification of metallic implants for orthopedic applications: a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2016, vol. 230 (2), pp. 331–353. DOI: 10.1177/0954405415579113.

78. Fefar S.D., Karajagikar M.J.S. Study and analysis of metallized electrode fabricated with FDM rapid prototyping technique for electro discharge machining (EDM). *Proceedings of the 5th International & 26th All India Manufacturing Technology Design and Research Conference (AIMTDR 2014)*, 2014, pp. 37–42.

79. Sridhar S., Valeti S.V., Koti V., Sathish S., Chand R.R., Sivakumar N.S., Mahesh M., Subbiah R., Veerappan G. Surface modification of strenx 900 steel using electrical discharge alloying process with Cu-10Ni-Cr_x powder metallurgy sintered electrode. *Materials Research*, 2022, vol. 25. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2021-0390.

80. Danade U.A., Londhe S.D., Metkar R.M. Machining performance of 3D-printed ABS electrode coated with copper in EDM. *Rapid Prototyping Journal*, 2019, vol. 25 (7), pp. 1224–1231. DOI: 10.1108/RPJ-11-2018-0297.

81. Dürr H., Pilz R., Eleser N.S. Rapid tooling of EDM electrodes by means of selective laser sintering. *Computers in Industry*, 1999, vol. 39 (1), pp. 35–45. DOI: 10.1016/S0166-3615(98)00123-7.

82. Amorim F.L., Lohrengel A., Müller N., Schäfer G., Czelusniak T. Performance of sinking EDM electrodes made by selective laser sintering technique. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 65 (9–12), pp. 1423–1428. DOI: 10.1007/s00170-012-4267-0.

83. Sahu A., Mahapatra S., Patterson A., Leite M., Peças P., Singh Y., Sahoo S. Electro-discharge machining using copper-coated additively-manufactured AlSi10Mg electrodes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2024, vol. 239 (8), pp. 1462–1471. DOI: 10.1177/14644207241293919.

84. Mohije R., Titre H., Gohil V., Meshram D.B. A study in EDM electrode manufacturing using additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.01.044.

85. Amorim F.L., Czelusniak T., Higa C.F. Producing sinking EDM electrodes using selective laser sintering technique. *7th Brazilian Congress on Manufacturing Engineering*. Penedo, Brazil, 2013, pp. 1–10.

86. Torres A., Luis C.J., Puertas I. Analysis of the influence of EDM parameters on surface finish, material removal rate, and electrode wear of an INCONEL 600 alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 80 (1–4), pp. 123–140. DOI: 10.1007/s00170-015-6974-9.

87. Amorim F.L., Lohrengel A., Schäfer G., Czelusniak T. A study on the SLS manufacturing and experimenting of TiB₂-CuNi EDM electrodes. *Rapid Prototyping Journal*, 2013, vol. 19 (6), pp. 418–429. DOI: 10.1108/RPJ-03-2012-0019.

88. Czelusniak T., Amorim F.L., Higa C.F., Lohrengel A. Development and application of new composite materials as EDM electrodes manufactured via selective laser sintering. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 72 (9), pp. 1503–1512. DOI: 10.1007/s00170-014-5765-z.

89. Harris R.A., Hague R.J.M., Dickens P.M. The structure of parts produced by stereolithography injection mould tools and the effect on part shrinkage. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, vol. 44 (1), pp. 59–64. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2003.08.007.

90. Harris R.A., Newlyn H.A., Dickens P.M. Part shrinkage anomalies from stereolithography injection mould tooling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, vol. 43 (9), pp. 879–887. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00080-4.

91. Noguchi H., Nakagawa T. Manufacturing of high precision forming tool transferred from laser stereolithography models by powder casting method. *Computers in Industry*, 1999, vol. 39 (1), pp. 55–60.

92. Chan S.F., Law C.K., Wong T.T. Re-engineering the roto-casting mould making process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 139 (1–3), pp. 527–534. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00532-6.

93. Leu M.C., Yang B., Yao W. Feasibility study of EDM tooling using metallized stereolithography models. *Society of Manufacturing Engineers (SME) Engineering Technical Paper*. MR98-180. SME, 1998, pp. 1–6.

94. Jensen K.L., Hovtun R. Making electrodes for EDM with rapid prototyping. *2nd European Conference of Rapid Prototyping*. University of Nottingham, 1993, pp. 221–233.
95. Garba E., Majdi A., Azeez A., Aliyu A.A., Gul I., Aliyu R. A review on additively manufactured electrodes for use in electro-discharge process. *Journal of Electrical Systems*, 2024, vol. 20 (10s), pp. 6919–6930.
96. Sahu A., Mahapatra S., Martin A., Schubert A., Leite M., Peças P. Electrical discharge machining by rapid tools prepared by micro stereo-lithography process with copper metallization. *Scientific Reports*, 2025, vol. 15, art. 22667. DOI: 10.1038/s41598-025-07020-7.
97. Yudhanto A., Li X., Tao R., Melentiev R., Lubineau G. Identifying adhesion characteristics of metal-polymer interfaces: Recent advances in the case of electroplated acrylonitrile butadiene styrene. *Materials Today Communications*, 2023, vol. 35. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106218.
98. Mandal P., Chatterjee S., Chakraborty S. Bi-objective optimization of an EDM process with Cu-MWCNT composite tool using single-valued neutrosophic grey relational analysis. *World Journal of Engineering*, 2025, vol. 22 (3), pp. 472–481. DOI: 10.1108/WJE-10-2023-0443.
99. Swain S., Pradhan M., Das S., Rautray T. Constructing antibacterial responsive multi-functionalized agent CSA13 loaded on a hydroxyapatite-TiO₂ nanotube network. *Materials Chemistry and Physics*, 2025, vol. 333. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2024.130337.
100. Wang L.-N., Luo J.-L. Preparation of hydroxyapatite coating on CoCrMo implant using an effective electrochemically-assisted deposition pretreatment. *Materials Characterization*, 2011, vol. 62 (11), pp. 1076–1086. DOI: 10.1016/j.matchar.2011.08.002.
101. Anil D., Çoğun C. Performance of copper-coated stereolithographic electrodes with internal cooling channels in electric discharge machining (EDM). *Rapid Prototyping Journal*, 2008, vol. 14, pp. 202–212. DOI: 10.1108/13552540810896157.
102. Equbal A., Sood A.K. Problems and challenges in EDM electrode fabrication using RP: A critical review. *World Applied Sciences Journal*, 2013, vol. 28, pp. 1127–1133. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.28.08.1461.
103. Reddy G.K., Esanakula J.R. Optimization of operating parameters of wire EDM using design of experiments criteria. *International Conference on Self Sustainable Artificial Intelligence Systems (ICSSAS)*, Erode, India, 2023, pp. 1504–1509. DOI: 10.1109/ICSSAS57918.2023.10331679.
104. Duan X., Saxena K., Wang J., Arshad M.H., Ayesta I., Wang Y., Reynaerts D., Yang X. Residual stress and its modification strategies in the surface/sub-surface layer of components machined by electrical discharge machining: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, vol. 139, pp. 41–58. DOI: 10.1007/s00170-025-15861-9.
105. Mufti N., Rafaqat M., Ahmed N., Saleem M., Hussain A., Al-Ahmari A. Improving the performance of EDM through relief-angled tool designs. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10 (7), art. 2432. DOI: 10.3390/app10072432.
106. Selvarajan L., Venkataraman K., Srinivasa Perumal K.P., Alghanmi S., Paulraj S., Ellappan V., Venkatesh K., Choudhury B., Jayamurugan S., Sakthivel G., Kasthuri N. Review on characterization, impacts and optimization of EDM parameters on composite structure in additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*, 2025, vol. 10, pp. 4573–4624. DOI: 10.1007/s40964-024-00907-3.
107. Kumar P., Shekhar A., Yadav S.K.S. Experimental analysis of electrical discharge drilling (EDD) of carbon-carbon composite. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 22, pp. 3106–3115. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.447.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.