

Технологические приемы и оборудование плазменно-электролитной обработки металлов и сплавов

С. А. Кусманов^{a,b,*}, Б. Л. Крит^a, И. А. Кусманова^{a,b},
И. В. Тамбовский^{a,b}, Т. Л. Мухачева^{a,b}, С. Н. Григорьев^a

^aМосковский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
г. Москва, 127994, Россия

^bКостромской государственный университет,
г. Кострома, 156005, Россия,

*e-mail: sakusmanov@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.08.2024

После доработки 19.09.2024

Принята к публикации 23.09.2024

Представлены результаты анализа применяемого оборудования и технологических приемов реализации плазменно-электролитной химико-термической обработки и электролитно-плазменного полирования. Рассмотрена группа методов, основанных на погружении обрабатываемых деталей в электролизер, а также метод локальной обработки струйной подачей электролита на участок обрабатываемой поверхности. Показано влияние конструкции и характеристик электролизера, источника питания и системы подачи детали в электролит на специфику методов плазменно-электролитной обработки. Рассмотрены технологические приемы, улучшающие качество и производительность обработки. Выявлены ограничения по применимости существующего оборудования, определены перспективы совершенствования в области разработки оборудования и технологий плазменно-электролитной обработки.

Ключевые слова: плазменно-электролитная обработка, химико-термическая обработка, электролитно-плазменное полирование, струйная обработка, оборудование

УДК 544.558+66.088

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.5.54>

ВВЕДЕНИЕ

Технологии плазменно-электролитной обработки (ПЭО) находят все более широкое применение для модифицирования поверхности металлических изделий различного назначения в области машиностроения, авиастроения, судостроения, энергетики, космических и медицинских технологий и в других отраслях промышленности.

Отличительной чертой процессов ПЭО является наличие жидкой рабочей среды (электролита), контактирующей с обрабатываемым объектом (рабочим электродом), противоэлектрода (элемент конструкции и/или т.н. «жидкий электрод») и источника электрической энергии. При этом электрический режим подразумевает создание условий для электролитного нагрева поверхности рабочего электрода, приводящего к формированию устойчивой парогазовой оболочки (ПГО) и последующему переходу ПГО в плазменное состояние.

В зависимости от природы физико-химических процессов и характера воздействия на поверхность выделяют плазменно-электролитную химико-термическую обработку (ПЭХТО) [1–25], целью которой является изменение структурно-фазового состава поверх-

ностных слоев и вытекающих из этого комплекса эксплуатационных свойств; плазменно-электролитное (микродуговое) оксидирование [26–37], направленное на получение защитных керамикоподобных покрытий на металлах вентильного типа; электролитно-плазменное полирование (ЭПП) [38–45], предназначенное для выравнивания микрорельефа поверхности и удаления покрытий с металлической подложки. В последние годы стали выделяться в качестве отдельных методов ПЭО электрофоретическое осаждение покрытий из электролитов-суспензий, электроискровые технологии эрозионной обработки и легирования и ряд других [46].

За последние пару десятков лет вышло множество обзорных статей в области ПЭО, в которых затрагиваются в первую очередь вопросы изучения структурно-фазового состава и свойств модифицированных поверхностей, а также физико-химических процессов, определяющие поверхностные изменения [47–55]. В то же время в научной литературе оборудование для реализации ПЭО, как правило, не рассматривается в качестве самостоятельного объекта исследования. В подавляющем большинстве работ исследуемый образец или деталь погружается в электролизер с заданным электролитом и подвергается обработке при

различных электрофизических параметрах, а также, за некоторым исключением, при варьировании гидродинамических условий обработки. Вместе с тем для внедрения того или иного метода поверхностной обработки в производство одним из наиболее важных этапов является разработка оборудования и технических приемов, которые будут направлены на решение конкретных технологических задач.

Особенности электролизеров, а также источников питания и систем подачи детали в электролит определяют различные возможности обработки, основанные на разработанных методах и технологиях. Конструкция электролизера задает гидродинамические условия, существенно влияющие на теплофизические характеристики обработки: скорость нагревания, величину температуры и ее распределение по поверхности обрабатываемой детали, а также стабильность этих величин. Кроме того, течение электролита в камере влияет на свойства парогазовой оболочки, следовательно, и на насыщающую способность применяемой среды. Параметры источника питания определяют энергетические условия обработки, в том числе различные формы существования электролитной плазмы. В настоящее время предложено довольно много технологических приемов и технических решений, которые могут быть классифицированы по различным признакам процесса.

В предлагаемом обзоре представлены результаты анализа применяемого оборудования и технологических приемов реализации ПЭХТО и ЭПП. Процесс химико-термической обработки в электролитной плазме может протекать как при анодной, так и при катодной полярности обрабатываемой детали, поэтому в статье при необходимости будет конкретизироваться полярность активного электрода. ЭПП протекает только при анодной полярности, поэтому полярность активного электрода не будет упоминаться.

ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ ПЭХТО И ЭПП

Первые попытки классификации ПЭХТО были предприняты И.З. Ясногородским [56] для методов, основанных на погружении обрабатываемой поверхности деталей в электролизер. Они основывались на различных технологических приемах осуществления контакта между рабочим электролитом и обрабатываемой деталью. С практических позиций подобный подход не утратил своей актуальности и в настоящее время.

Самым простым является метод *концевого* нагрева, когда в электролит погружается часть

детали, остающаяся неподвижной в процессе ее ПЭХТО [57, 58]. Термин «нагрев» или «электролитный нагрев» часто применялся в научной литературе в XX веке до установившегося за последние десятилетия привычного выражения «плазменно-электролитная или электролитно-плазменная обработка», которое обозначает электрофизический режим обработки, сопровождаемый образованием вокруг активного электрода сплошной ПГО, и разогрев обрабатываемой детали до температуры, позволяющей проводить химико-термическую обработку. Примером анодного концевого нагрева может служить нитрозакалка втулок погружных скважинных насосов из стали 40Х, цементация с закалкой ступенчатой заклепки диска сцепления из стали 35 или упора из стали 20, а также нитрозакалка нитеводителей прядильной машины [59]. Отметим, что в случае цементации реализуется локальное упрочнение рабочих поверхностей. Заклепка выдерживалась при 850 °С в течение 4 мин и закаливалась, при этом ее хвостовик не подвергался обработке и сохранял необходимую пластичность. Вариантом концевого нагрева является частичное погружение вращающейся детали, например, закалка цилиндрической поверхности диска, вращающегося со скоростью 60 об/мин (рис. 1) [60]. При напряжении 220 В обод катка нагревался до 850 °С за 15 мин. Способ предлагается для нагревания цилиндрических деталей диаметром до 150 мм.

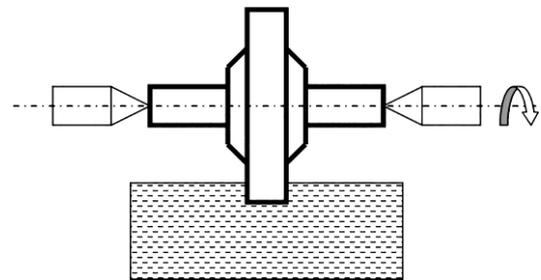


Рис. 1. Локальный нагрев вращающейся детали [60].

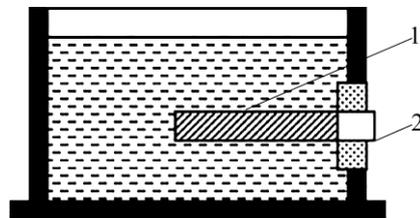


Рис. 2. Полный нагрев детали: 1 – обрабатываемая деталь; 2 – токоподвод.

Наибольшее распространение получил метод *полного* нагрева детали, осуществляемый под слоем электролита (рис. 2) [61–68]. В этом случае обрабатываемая деталь вводится в электролит через изолирующую втулку в стенке ванны. Напряжение к детали подводится с помощью токоподвода.

Для обработки заготовок и деталей большой длины разработан метод *последовательного* нагрева (рис. 3). Нагреваемое изделие может перемещаться по вертикали через втулку из огнеупорного кирпича, расположенную в дне ванны, и проходить на своем пути весь слой электролита [69]. Для того чтобы электролит не вытекал из ванны, величина зазора (на рисунке не обозначен) между втулкой и деталью не должна превышать 1–2 мм. С целью стабилизации уровня электролита верхним краем стенок ванны, через которые переливается электролит, предложено придавать зубчатый профиль [70]. Примером реализации может служить нагрев заготовки диаметром 42 мм, движущейся вверх и вниз на расстояние от 120 до 200 мм со скоростью 0,8 м/мин через слой электролита толщиной 30–60 мм. Температура нагрева 1100–1300 °С, напряжение 245 В, ток 140–220 А, суммарная продолжительность 100–215 с [71].

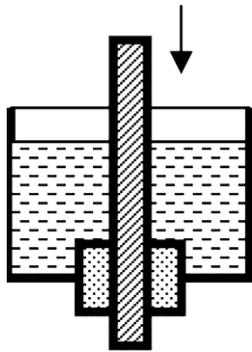


Рис. 3. Последовательный нагрев детали.

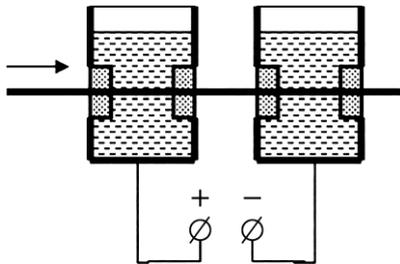


Рис. 4. Биполярное подключение проволоки.

Для обработки движущихся по горизонтали полос или проволоки разработана биполярная схема подключения источника питания к двум металлическим ваннам, в которых реализуется анодный или катодный процесс в избранном режиме (электролиза, прерываний или нагрева). Достоинством схемы является отсутствие скользящих контактов при нагреве движущейся заготовки (рис. 4).

Интенсификация последовательного нагрева достигается применением нескольких ванн, располагаемых друг над другом и составляющих одну колонну [72]. На рис. 5 изображен фрагмент установки катодного нагрева [73], состоящей из вертикально скомпонованных металлических ванн-анодов, в днищах которых

установлены керамические втулки. Каждая ванна имеет соосно расположенную дополнительную диэлектрическую ванну, которая сообщается с основной ванной через окна. Ванны имеют автономные системы подачи и слива электролита, состоящие из патрубков и сливных окон в стенках дополнительных ванн. Порог окна расположен на уровне дна предыдущей ванны. Установка работает следующим образом. Обрабатываемые детали последовательно вводятся в установку через втулки. Электролит через патрубки заполняет ванны, и излишки электролита сливаются через окна. Ход электролита указан стрелками. Обработка детали происходит при подаче напряжения на него и основные ванны. Образующиеся в процессе нагрева пары и электролизные газы отводятся через окна. Регулирование времени нагрева осуществляется путем включения или отключения некоторого количества ванн.

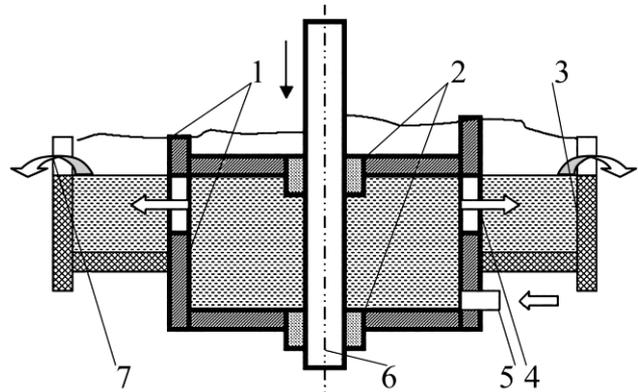


Рис. 5. Фрагмент установки для интенсификации последовательного нагрева: 1 – вертикально скомпонованные металлические ванны-аноды; 2 – керамические втулки; 3 – диэлектрическая ванна; 4 – окно; 5 – патрубок; 6 – обрабатываемая деталь; 7 – сливное окно [73].

Специфический вариант последовательного катодного нагрева заявлен в Японии [74]. В нижней части ванны содержится слой непроводящего раствора и над ним слой электролита. В ванну помещен анод. Благодаря разнице плотностей слои не смешиваются. Обрабатываемая деталь погружается в ванну, нагревается в верхнем электролите и закаливается в нижнем слое жидкости.

В ходе развития практики ПЭО сформировался устойчивый интерес к *локальной* (адресной, струйной) обработке для достижения максимального модифицирующего эффекта в зонах, непосредственно подверженных внешним воздействиям. Метод не предполагает погружения детали в электролит, а предусматривает подачу струи электролита из спрейера на локальный участок обрабатываемой поверхности. Этот подход оправдан в случаях, когда свойства материала за пределами упомянутых

зон не оказывают существенного влияния на эксплуатационные показатели изделия в целом. Помимо экономических причин, применение локальных методов поверхностной упрочняющей обработки обеспечивает синергию и возможность гибкого изменения уровня интегральных характеристик материалов [75–79].

УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МЕТОДОМ ПОГРУЖЕНИЯ ДЕТАЛИ В ЭЛЕКТРОЛИТ

Простейший вариант электролизера представляет собой сосуд с электродом, в котором обработка проводится в условиях естественной конвекции без стабилизации температуры электролита (рис. 6). Гораздо чаще используется охлаждение электролита с помощью наружного кожуха или змеевика внутри электролизера. Этот вариант применяется при катодной ПЭХТО, где требуется некоторый подогрев электролита. Медленное снижение напряжения в течение десятков секунд позволяет уменьшить скорость охлаждения стального образца ниже критической и избежать его закалывания [80]. В случае анодной ПЭХТО, где электролит необходимо охлаждать, устойчивый нагрев деталей с площадью обрабатываемой поверхности до 20 см^2 возможен в течение десятков минут. Достижимые температуры позволяют вести закалку или нитрозакалку среднеуглеродистых сталей, но недостаточны для скоростной цементации малоуглеродистых сталей.

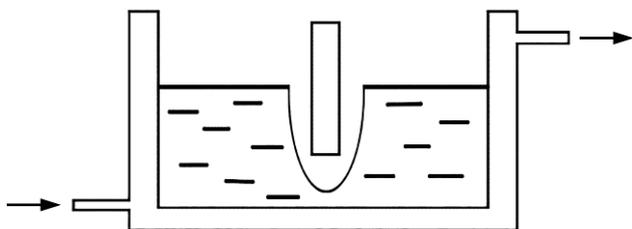


Рис. 6. Условия естественной конвекции в электролизере с наружным охлаждением водопроводной водой.

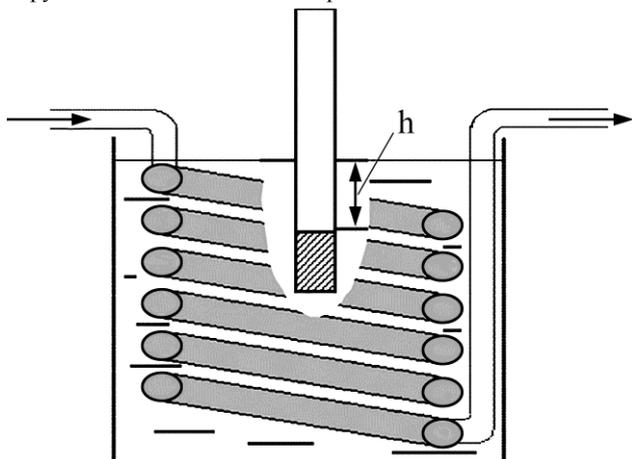


Рис. 7. Условия с размещением змеевика-теплообменника в рабочей камере [81].

Исследование теплообмена в электролизере, содержащем змеевик, показало, что температура нагрева цилиндрического образца зависит от глубины его погружения (рис. 7). Средняя температура образца диаметром 10 мм и длиной 25 мм, погруженного на полную длину, не превышает $750 \text{ }^\circ\text{C}$, но достигает $880 \text{ }^\circ\text{C}$, если погрузить его на 90 мм [81]. Эта температура достаточна для проведения закалки или нитрозакалки среднеуглеродистых сталей. Несколько меньшее влияние глубины погружения на температуру нагрева обнаружено для образца длиной 53 мм.

Более стабильные условия обеспечивает контролируемая гидродинамика в электролизере с перемешиванием охлаждаемого электролита [82]. Вращение электролита вокруг вертикальной оси выравнивает температуру электролита и образца в азимутальном направлении, но не обеспечивает снижение вертикального градиента температуры. Поэтому данная схема удобна лишь для горизонтально расположенных плоских образцов небольшой толщины.

Дополнительная интенсификация теплообмена в рабочей камере путем барботажки дает возможность получить более высокие температуры нагрева, зависящая от величины расхода подаваемого воздуха, достигается, когда верхний край образца находится на поверхности электролита. При малых напряжениях (140–160 В) и большом расходе воздуха (3 л/мин) нагрев идет очень нестабильно. При напряжениях свыше 200 В подача воздуха может быть увеличена, что позволяет вести нагрев до $950\text{--}1000 \text{ }^\circ\text{C}$ для закалки или цементации малоуглеродистых сталей.

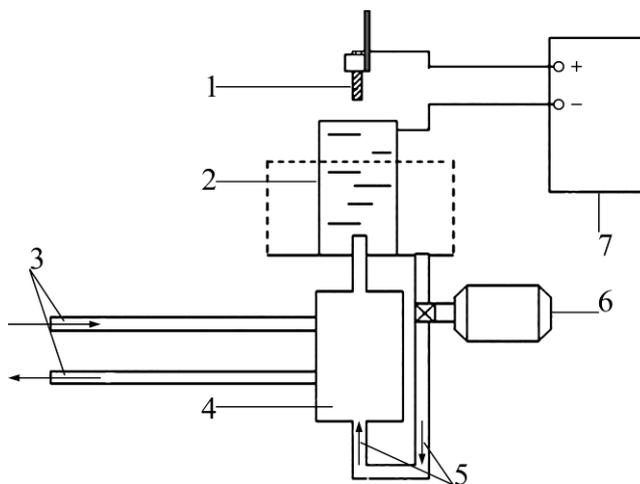


Рис. 8. Схема установки анодной ПЭХТО: 1 – обрабатываемая деталь (анод); 2 – рабочая камера (катод); 3 – водопроводная вода для охлаждения; 4 – теплообменник; 5 – электролит; 6 – насос; 7 – источник постоянного тока [17].

Устойчивое распределение температуры достигается при продольном обтекании образца или детали электролитом, который циркулирует через теплообменник. В этом случае имеется возможность фильтрации электролита и корректировки его состава в процессе обработки. Сосредоточенная подача электролита через патрубков в дне камеры обеспечивает отвод нагретого электролита из приэлектродной зоны и подвод охлажденного раствора, что приводит к утонению парогазовой оболочки и повышению температуры нагрева (рис. 8) [17]. Увеличение скорости продольного обтекания детали позволяет снизить вертикальный градиент температуры примерно в 2 раза, что существенно для обработки протяженных изделий [83].

В большинстве опытно-промышленных установок анодной ПЭХТО электролизер представляет собой цилиндрический сосуд диаметром 100–150 мм и длиной 150–200 мм. Исследования показали, что уменьшение диаметра электролизера, одновременно являющегося катодом, приводит к заметному повышению температуры нагреваемого образца-анода [84]. Можно предположить, что при уменьшении межэлектродного зазора увеличивается скорость движения перегретых масс электролита, контактирующих с поверхностью анодной парогазовой оболочки. Более интенсивный теплообмен обеспечивает увеличение теплового потока из оболочки в электролит, что приводит к уменьшению толщины оболочки, и, как следствие, увеличению температуры детали. Средний прирост температуры образца при уменьшении диаметра рабочей камеры на 40 мм составляет 61 °С.

Кроме того, с уменьшением диаметра рабочей камеры увеличивается значение среднего по длине образца градиента температуры. По этой причине выбор диаметра рабочей камеры зависит от решаемой в конкретном случае технологической задачи. Для получения однородного модифицированного слоя диаметр рабочей камеры не следует уменьшать ниже определенной величины. Рекомендуемый зазор между камерой и деталью равен 35 мм.

В то же время для достижения локальных свойств обрабатываемой детали, например, увеличения износостойкости трущейся части вала, необходима максимальная температуры нагрева детали на рабочем участке. Здесь целесообразно применение рабочей камеры с минимальным зазором. Однако применение зазора менее 10 мм усложняет позиционирование детали при погружении и может привести к пробое межэлектродного промежутка и порче изделия. Кроме того, температура нагрева детали

повышается при увеличении скорости расхода электролита в интервале 1,5–8 л/мин, при этом уменьшается вертикальный градиент температуры.

Далее рассматриваются конструкции установок для ПЭХТО и ЭПШ, дополнительные устройства и приспособления, разработанные для улучшения каких-либо свойств электролизеров.

Установки катодной ПЭХТО

Некоторые технические решения нашли воплощение в промышленных установках ПЭХТО, которые разрабатывались в Рубцовском проектно-конструкторском технологическом институте тракторостроения. Установка АЭ-4 обеспечивала катодный нагрев до 1000–1100 °С. Заготовки диаметром 10 мм, погружаемые на 10 мм, разогревались в течение 4 с. При диаметре заготовок 20 мм и глубине погружения 30 мм время разогрева составляло 20 с. Производительность установки – 300–400 шт/ч.

В установке АЭ-5 была реализована непрерывная подача деталей с производительностью 600–800 шт/ч. Детали в количестве 10 шт. размещались на подвесках в барабане. При вращении барабана детали погружались в ванну, после нагрева поднимались и сбрасывались в лоток. Установка разрабатывалась для нагрева заготовок с поверхностью 100–150 см². Ванна установки АЭ-5а снабжалась вторым отсеком для закалки в масле и третьим отсеком для мойки деталей. Производительность составляла 1200–1400 деталей в час, потребляемая мощность – 6–7 кВт.

Для закалки различных деталей, например, тракторных, изготавливались специализированные установки [60]. Поверхностная закалка пальцев из стали 50 осуществлялась на установке АЭ-17 мощностью 100 кВт с производительностью 240 шт/ч. Втулки звеньев гусениц из стали 55ПП упрочнялись на установке АЭ-36 (150 кВт, 60 шт/ч). Вал стартера из легированной стали 40ХНМА нагревался в две ступени до 850 °С и закаливался в масле. Нагрев осуществлялся при вращении горизонтально расположенной детали (70 об/мин) за несколько оборотов. В установке АЭ-28 (350 кВт, 40 шт/ч) было реализовано наложение магнитного поля. Для закалки ведущих колес трактора ДТ-54 разработана установка АЭ-32 (750 кВт, 15 шт/ч). Одновременный нагрев всей рабочей поверхности колеса выполнялся с частичным экранированием вершин зубьев и применением дополнительных анодов у впадин. В установке АЭ-26 использовался струйный нагрев среднего диска муфты сцепления (чугун СЧ 15-32) трактора

ТДТ-75 при ручной загрузке и выгрузке закаленных деталей.

Установки анодной ПЭХТО

Установки анодной ПЭХТО (тип УХТО) разрабатывались и изготавливались на Опытном заводе Института прикладной физики Молдавской академии наук [2]. Установка УХТО-2 предназначалась для закалки распорных втулок погружных скважинных насосов типа ЭЦВ. Одновременно нагревалось шесть втулок в течение 1 мин, что обеспечивало производительность до 120 шт/ч при ручной загрузке и выгрузке закаленных изделий. В установке использовалась прямоугольная ванна с неконтролируемой гидродинамикой. Потребляемая мощность установки составляла 24 кВт.

Установка УХТО-3 (25 кВт) позволяет выполнять закалку, нитрозакалку и цементацию с закалкой различных малогабаритных деталей с площадью нагреваемой поверхности до 100 см². Применение цилиндрического нагревательного устройства с продольным обтеканием детали позволяет выравнивать распределение температуры по ее поверхности и повышать качество упрочнения, а также расширять класс обрабатываемых деталей. Производительность установки определяется числом одновременно обрабатываемых деталей и составляет не менее 30 шт/ч.

Установки УХТО-4, УХТО-5 и УХТО-6 снабжены тиристорным источником питания. Выпрямитель выполнен по трехфазной мостовой схеме Ларионова с управляемыми вентилями. Включение тиристорov осуществляется фазоимпульсными преобразователями, которые обеспечивают стабильность запуска и возможность работы в автоматическом режиме. Наибольшее распространение получили установки УХТО-5М и УХТО-5Б (50 кВт, 30 шт/ч) в легкой промышленности для скоростного упрочнения малогабаритной оснастки, как правило, путем цементации с закалкой. Для работы в автоматическом режиме задаются напряжение и продолжительность этапов обработки по трехступенчатому циклу: нагрев для насыщения углеродом или азотом, стабилизация температуры перед закалкой с возможностью подстуживания, кратковременный нагрев детали перед охлаждением в электролите для реализации поверхностной закалки.

Специализированная установка УХТО-6 была разработана для упрочнения планок скребковых транспортеров ТСН 3,0 Б анодной нитрозакалкой. В этой установке реализована механизированная подача деталей из четырех бункеров в рабочую камеру. Планки укладывались стопкой в каждый бункер и периодически подавались толкателем на позиции нагрева в

автоматическом режиме. Локальный нагрев рабочей поверхности каждого отверстия осуществляется струями электролита. Производительность макетного образца установки составляла 240 шт/ч, потребляемая мощность 50 кВт.

В Костромском НИИ льняной промышленности разработана установка АТО (7 кВт, 30 шт/ч), предназначенная для упрочнения небольших деталей для легкой промышленности с площадью обрабатываемой поверхности до 25 см². Блок обработки содержит цилиндрическое нагревательное устройство с продольным обтеканием детали, охлаждение раствора осуществляется в пленочном теплообменнике. Погружение детали в раствор выполняется вручную с помощью диэлектрического рычага. Блок питания содержит силовой регулируемый автотрансформатор с выпрямителем, автотрансформатор для питания электродвигателя насоса, коммутационную и измерительную аппаратуру.

Установки ЭПП

Изучение процесса ЭПП закономерно сопровождалось поиском новых технических решений и разработкой соответствующего оборудования. Для лабораторных исследований создана лабораторная установка ЭИП-25, содержащая источник питания, электролизер с системой охлаждения или нагревания электролита и ручным механизмом перемещения образца [85]. Кроме того, в ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Беларуси разработан ряд установок ЭПП-1, ЭПП-2, ЭПП-3, ЭПП-4, ЭПП-5 различной производительности для ЭПП в промышленных условиях, которые работают на многих предприятиях стран СНГ. Источники питания мощностью от 15 до 800 кВт обеспечивают продолжительность полирования от 2 до 8 мин, снятия заусенцев от 0,1 до 2 мин на деталях с площадью поверхности от 400 до 20000 см². В Тольяттинском государственном университете создана установка УЭППИ-1 мощностью 40 кВт с максимальным током нагрузки 200 А для финишной обработки изделий с площадью до 250 см² [86].

Для массового ЭПП деталей разработан автоматизированный комплекс [87], содержащий не только источник питания, электролизер и систему подачи деталей в зону обработки, но и некоторые дополнительные устройства. Комплекс снабжен системой дозированной подачи компонентов электролита, узлом сбора и удаления шлама, а также конденсатором пара. Приготовление электролита и его нагрев выполняются в отдельной ванне с датчиками плотности и температуры раствора, который подается насосом в расположенный выше электролизер. Магистраль подачи электролита

заканчивается спрейером в виде трубки с отверстиями, расположенной по периметру электролизера, что обеспечивает равномерное распределение температуры и плотности электролита. Манипулятор обеспечивает перемещение кассеты с деталями в ванну промывки и далее потом в электролизер. После завершения обработки кассета возвращается на позицию загрузки. Шлам, образующийся при ЭПП, оседает на дно электролизера и с помощью специального устройства периодически извлекается оттуда в состоянии густой пульпы, после чего выпаривается и прессуется в брикеты. Шлам, накапливающийся в фильтрах электролита, регулярно удаляется. Выделяемый пар после охлаждения в конденсаторе стекает на его дно и сливается в ванну приготовления электролита. Очищенный от пара воздух выходит в атмосферу. Установка работает в интервале напряжения 150–320 В, при плотностях тока от 0,1 до 0,5 А/см², температуре электролита 70–90 °С. Продолжительность обработки от 0,1 до 10 мин.

На корпусе электролизера или в электролите могут размещаться излучатели ультразвуковых волн, подключаемые к генератору ультразвуковых колебаний [88, 89]. Другим вариантом усовершенствования рабочей камеры является наличие в ней индуктора для высокочастотного нагрева полируемых деталей [90, 91].

Комплексный подход к проектированию оборудования для реализации ЭПП позволил разработать установки ЭПОЛ-6Н-200 и ЭПОЛ-6-500, отличающиеся компоновкой блоков для обеспечения удобного доступа оператора к рабочей зоне и узлам управления и создания цветофункционального комфорта [92].

Повышение равномерности обработки коррекцией гидродинамических условий

Вариантом сосредоточенного обтекания является подача электролита через коническое сопло на горизонтальную обрабатываемую поверхность [93]. Этим методом удобно упрочнять плоские поверхности деталей или образцы для трибологических и коррозионных испытаний. Коническое сопло содержит перфорированный анод, через который подается электролит.

Равномерный съем металла с поверхности детали в процессе ее ЭПП достигается циркуляцией электролита в электролизере с двойными стенками (рис. 9) [94]. В верхней и придонной частях внутренней стенки имеются отверстия для циркуляции электролита. В пространстве между внутренней стенкой и обрабатываемым изделием находится поплавковый датчик. Электролит подается нагнетателем в пространство между стенками, откуда поступает во внутреннюю

часть камеры и движется вниз вдоль полируемой поверхности. Скорость циркуляции контролируется датчиком, на который действуют те же силы, что и на парогазовые пузырьки, отрывающиеся от оболочки. Задачей регулирования является равномерное распределение пузырьков по объему электролита, что соответствует равномерному распределению плотности тока по обрабатываемой поверхности и удалению материала. Требуемое состояние достигается при равенстве сил, действующих на датчик. Отклонение от равновесия вызывает уменьшение или увеличение скорости вращения нагнетателя.

В установках ЭПП электролизеры чаще всего представляют собой ванны с проточным или непроточным электролитом. Равномерность полирования не всегда обеспечивается в условиях естественной конвекции электролита, поэтому для повышения качества обработки предложены различные технические решения. Для стабилизации условий в электролизере применяется перемешивание электролита барботажем и его охлаждение наружным кожухом [95].

Экранирование обрабатываемых деталей

Для катодной обработки деталей характерны затруднения со стабилизацией температуры нагрева. Уже небольшие отклонения глубины погружения деталей приводили к их перегреву вплоть до оплавления. Причиной затруднений является неравномерное распределение плотности тока по ее поверхности. Наибольшая плотность тока в процессе нагрева достигалась на кромках детали. В качестве средства выравнивания температуры было предложено ослабление локальной плотности тока на участках перегрева с помощью диэлектрических перегородок (экранов), например, экранирование торца частично погруженной детали (рис. 10).

Контактные экраны изготавливались из огнеупорного кирпича, фарфора, винилпласта, фторопласта [96]. Известна конструкция экрана из металла (рекомендуется медь) с синтетическим покрытием на участках, не соприкасающихся с нагреваемой деталью. Такой экран имеет полость для охлаждения водой [97]. Недостатком контактных экранов является их невысокая стойкость. Более удобны экраны, расположенные на расстоянии 1–2 мм от нагреваемой детали, они могут быть изготовлены из пластмасс. Если касание допустимо или необходимо, то экраны снабжаются металлическими вставками, которые в оголенных местах подключаются к детали-катоде во избежание дуговых разрядов при плохом контакте. Частичное экранирование предусматривает расположение экрана на некотором расстоянии от нагреваемой детали для увеличения сопротивления электролита и уменьшения плотности тока (табл. 1).

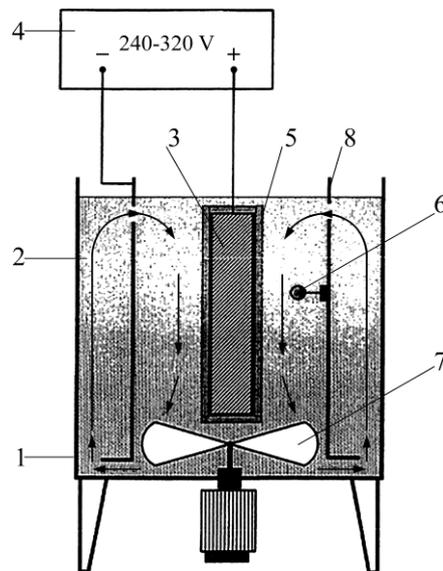


Рис. 9. Устройство для ЭПП металлических изделий: 1 – ванна; 2 – электролит; 3 – обрабатываемая деталь; 4 – источник постоянного тока; 5 – парогазовая оболочка; 6 – поплавковый датчик; 7 – нагреватель электролита; 8 – внутренние стенки с отверстиями [94].

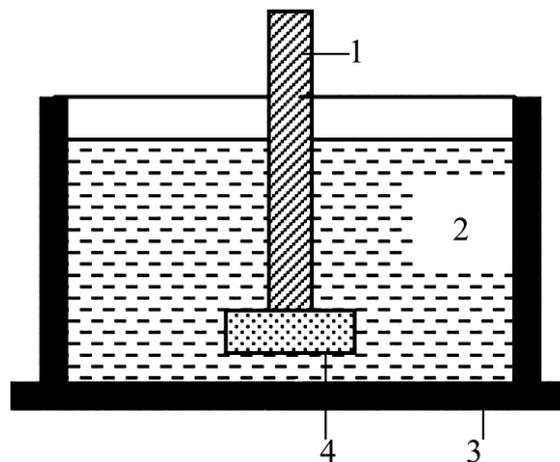


Рис. 10. Концевой нагрев детали-катода (1) с экраном (4) в ванне-аноде (3) с электролитом (2).

Таблица 1. Результаты катодной ПЭХТО образцов диаметром 6 мм при напряжении 200 В [97].

Расстояние от экрана до поверхности детали-катода, мм	Сила тока, А	Плотность тока, А/см ²
6	10 (5)	2,0 (1,0)
16	18 (9)	3,6 (1,8)
26	23 (17)	4,6 (3,4)
36	25 (25)	5,0 (5,0)
46	27 (27)	5,4 (5,4)
140	29 (29)	5,8 (5,8)

Примечания: материал экрана – пеношамотный кирпич, в скобках – данные для магнезитового кирпича.

Экраны для частичного экранирования выполняются с конусными или цилиндрическими гнездами для нагреваемой детали (рис. 11). Конический экран плавно меняет плотность тока на определенном участке нагреваемой поверхности, такая методика удобна для деталей цилиндрической формы.

Разработаны также составные экраны, предназначенные для локального разогрева рабочих поверхностей деталей, например катков или ведущих колес тракторов. Такие экраны состоят из отдельных сегментов, уложенных на резиновые подушки [98].

Торцевой экран может служить съемным упором в виде втулки с кольцевым зазором 0,5–0,8 мм, аналогично приведенному на рис. 11. Для выравнивания температуры нагреваемой поверхности этот зазор соединяется с атмосферой системой отверстий [99]. Опорный экран имеет возможность перемещения для облегчения смены обрабатываемых заготовок. В частности, экран, соединенный с рычагом, может поворачиваться под действием движущейся заготовки. После выхода заготовки из зоны нагрева экран возвращается в исходное положение [100].

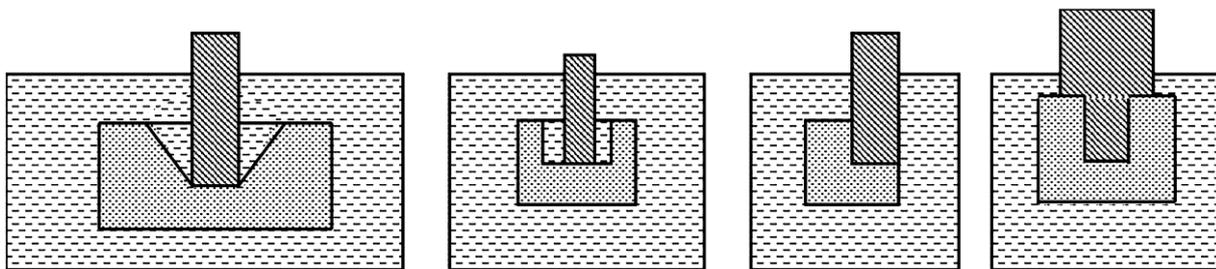


Рис. 11. Варианты экранирования нагреваемых деталей.

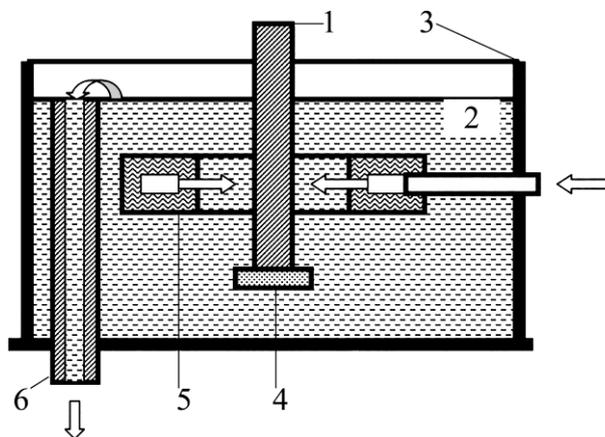


Рис. 12. Устройство концевого нагрева для выравнивания поверхностного распределения температуры: 1 – деталь-катод; 2 – электролит; 3 – ванна-анод; 4 – экран; 5 – устройство поперечного обтекания; 6 – сливной патрубкок. Направление движения электролита показано стрелками.

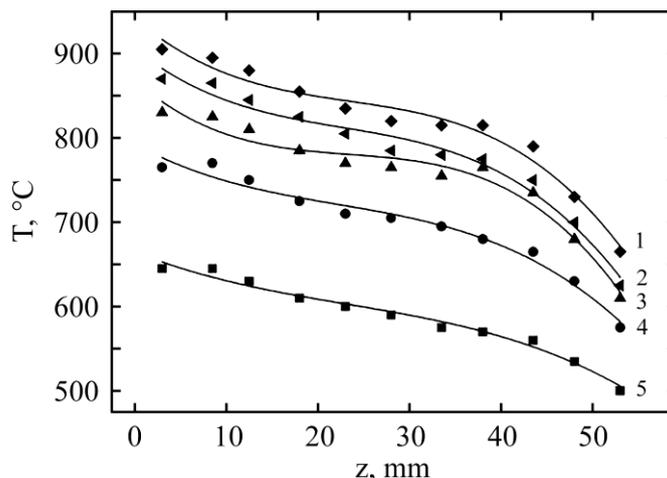


Рис. 13. Распределение температуры по высоте образца диаметром 14 мм и длиной 60 мм, погруженного в электролит на 50 мм. Напряжение (В): 1 – 260; 2 – 300; 3 – 180; 4 – 140; 5 – 100 [102].

Устройства, создающие радиальные потоки электролита

Локальное сжатие парогазовой оболочки приводит к возрастанию плотности тока и дополнительному потоку тепла в деталь на ее участке. Такой эффект обнаружен несколько десятилетий назад [71], на его основе было предложено устройство, формирующее радиальные потоки, которое может быть выполнено из металла и играть роль анода при катодной ПЭХТО, в этом случае минимальный зазор между устройством и катодом должен составлять 30–40 мм (рис. 12). В настоящее время подача струи электролита, перпендикулярной обрабатываемой поверхности, осуществляется через

коническое сопло и применяется для катодного азотирования, цементации и нитроцементации различных сталей [101].

На рис. 13 показано распределение температуры по высоте цилиндрического образца, где вертикальная координата z отсчитывается от его нижнего торца. Радиальные потоки электролита подаются на деталь из тороидального кольца [102]. На участке подачи радиальных потоков (нижние 40 мм) вертикальный градиент температуры снижается до 2 град/мм. Однако по всей длине нагреваемого участка градиент составляет 2,5–4 град/мм за счет падения температуры в верхней части образца вблизи поверхности электролита. Этот факт подчеркивает роль

Таблица 2. Средние значения градиента температуры при обтекании образцов распределенными радиальными потоками электролита. Длина образцов 70 мм, глубина погружения 60 мм [102]

Диаметр образца, мм	Напряжение, В										
	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
	Градиент температуры, °С/мм										
6	6,33	5,57	6,63	8,37	8,00	7,63	7,57	7,03	8,87	8,30	6,23
8	4,10	4,00	4,83	5,90	6,30	6,23	6,27	6,17	6,80	6,83	6,07
10	4,97	6,43	7,17	7,30	7,83	8,37	9,13	9,10	9,53	9,57	9,10
12	4,60	4,83	5,47	6,27	6,17	6,37	7,10	6,27	6,67	7,20	7,13

расширения оболочки, максимального в верхней части, и, возможного отвода тепла в выступающую часть образца вместе с системой крепления и токоподвода. Для образцов меньшего диаметра в среднем характерны более высокие значения градиента температуры (табл. 2).

Попутно отметим, что локальное утонение парогазовой оболочки, создающее дополнительный поток тепла в деталь или образец, также достигается оттоком перегретого электролита из приэлектродной области, на смену которому к парогазовой оболочке подходит охлажденный электролит. Тогда на участке отбора электролита парогазовая оболочка сжимается, а местная температура повышается, что снижает ее вертикальный градиент [103]. Увеличение скорости электролита приводит к увеличению температуры образца лишь в определенных пределах. Возможной причиной такого максимума температуры может быть следующее. В прианодной области протекают два конкурирующих процесса. Удаление перегретого электролита приводит к поступлению в зону нагрева охлажденного раствора, вследствие чего локальная, а значит и средняя температура анода возрастает. В то же время при больших скоростях оттока перепад давлений в электролите может способствовать механическому расширению парогазовой оболочки, что ведет к снижению температуры обрабатываемой детали. Сильнее всего возможное уменьшение давления проявляется при меньших напряжениях нагрева, для которых характерна меньшая мощность, вводимая в парогазовую оболочку.

Устройство, обеспечивающее продольное распределенное обтекание

Градиент температуры может быть снижен распределенной подачей электролита через несколько отверстий в горизонтальной перегородке, расположенной над дном камеры [104]. Вертикальные потоки электролита, примерно параллельные обрабатываемой поверхности, повышают эффективность удаления перегретого электролита и обеспечивают утонение оболочки, увеличение плотности тока через нее и температуры нагрева верхних участков изделия, что позволяет значительно снизить общий градиент

температуры. Разработанная конструкция электролизера представлена на рис. 14.

Размеры устройства связаны со спецификой ПЭО и с размерами обрабатываемой детали. Расстояние от перегородки до торца изделия h выбирается в интервале 5–20 мм. Значения менее 5 мм могут привести к размягчению материала перегородки из-за близости к раскаленному электроду. При значениях более 20 мм снижается действие струй, что приводит к уменьшению температуры нагрева.

Диаметр отверстия в перегородке d выбирается в интервале 4–6 мм. Значения менее 4 мм создают повышенное гидравлическое сопротивление, что требует неоправданного увеличения мощности насоса. Значения более 6 мм приводят к снижению скорости струй, что ослабляет их действие и уменьшает температуру нагрева изделия. Самым важным параметром является расстояние r от оси камеры до осей отверстий в перегородке, которое определяется согласно следующей формуле:

$$\begin{aligned} r &\leq 0,36 \times l - 6,26 + 0,41 \times h + 0,5 \times (D + d) \\ r &\geq 0,21 \times l - 6,26 + 0,41 \times h + 0,5 \times (D + d), \end{aligned} \quad (1)$$

где l – длина обрабатываемого изделия; h – расстояние от перегородки до торца изделия; D – диаметр обрабатываемого изделия.

На рис. 15 представлены результаты измерений температуры в образце с распределенным продольным обтеканием четырьмя струями, смещенными относительно оси камеры. Можно предположить, что для данной конструкции электролизера характерно меньшее давление на парогазовую оболочку, но гораздо более эффективное удаление перегретого электролита из зоны нагрева. Именно этот вариант дает наименьшие значения градиента температуры. Результаты применения распределенного продольного обтекания цилиндрического образца приводятся в табл. 3.

В заключение отметим, что условия работы деталей не всегда требуют равномерного распределения твердости или иных свойств по их поверхности. Существуют участки детали, подвергаемые повышенной нагрузке по сравнению с соседними участками, поэтому

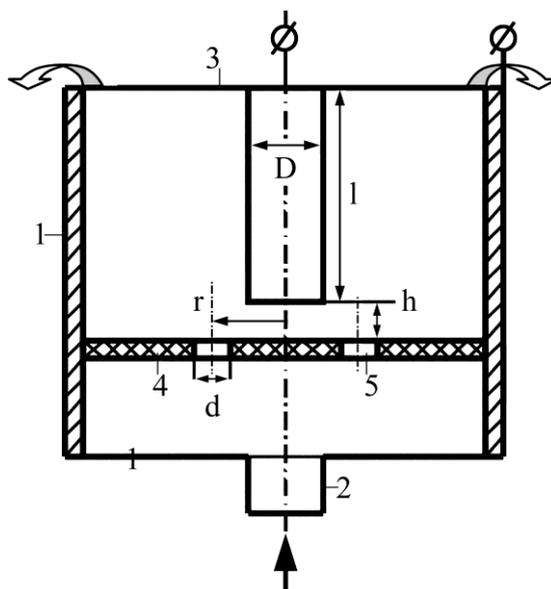


Рис. 14. Электролизер с распределенным продольным обтеканием детали электролитом: 1 – рабочая камера; 2 – патрубок подачи электролита; 3 – обрабатываемая деталь; 4 – перегородка; 5 – отверстия в перегородке [104].

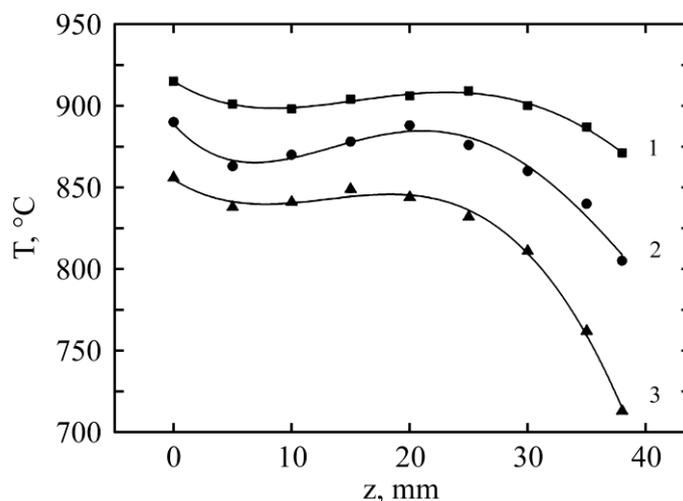


Рис. 15. Температурные поля образцов, нагреваемых при напряжении 200 В, с обтеканием четырьмя продольными струями, удаленными на 13 мм от оси камеры. Расход электролита (10% хлорида аммония) (л/мин): 1 – 6,1; 2 – 3,9; 3 – 2,5; Диаметр образца 10 мм, длина 50 мм, глубина погружения 40 мм [104].

Таблица 3. Характеристики распределения температуры вдоль оси цилиндрического образца ($\varnothing 10 \times 40$ мм). Напряжение 200 В, скорость расхода электролита 6,1 л/мин [104]

Расстояние между отверстиями в горизонтальной перегородке и осью камеры, мм	Одна струя	Четыре струи			
	0	10	13	16	19
Средняя температура, °C	938	925	901	886	863
Среднеквадратичный градиент, °C/мм	4,1	1,7	0,8	1,9	1,0
Среднеквадратичное отклонение средней температуры, °C	41	12,5	8,3	14,4	28
Среднеквадратичный градиент, °C/мм	4,2	2,6	1,7	3,5	5,8

неравномерное упрочнение детали, адекватное внешнему воздействию, способно дополнительно повысить ресурс изделия. Такими возможностями обладают ПЭО, что является их преимуществом.

Устройство для повышения долговечности электролита

Срок службы электролита может быть увеличен частичным возвращением его компо-

нентов, испаряющихся в ПГО. Для этого предложена дополнительная камера, способствующая повышению стабильности температуры насыщения и долговечности применяемого электролита [105]. Эта камера размещается над электролизером, содержит обрабатываемую деталь с системой ее крепления и подключается через насос к ванне с электролитом (рис. 16). Камера создает дополнительный контур

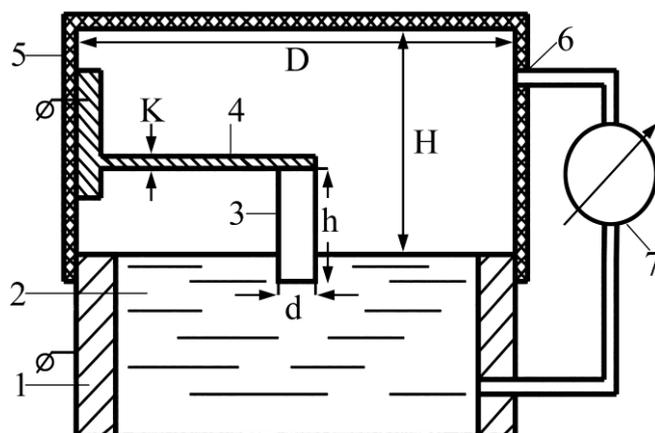


Рис. 16. Контур возврата в электролит паров и газов, выделяющихся в процессе ПЭХТО: 1 – катод; 2 – электролит; 3 – обрабатываемая деталь; 4 – держатель и источник тока; 5 – внешняя камера; 6 – труба; 7 – насос [105].

возвращения в электролит выделяющихся газов, что обеспечивает корректировку химического состава электролита и повышение качества обработки.

Устройство работает следующим образом. Обрабатываемое изделие помещается в наружную камеру и устанавливается в системе крепления. На деталь и стенки рабочей камеры подается рабочее напряжение, после чего обрабатываемое изделие погружается в электролит на заданную глубину. В момент соприкосновения детали с поверхностью электролита включается насос, который откачивает выделяющиеся из зоны обработки пары и газы и направляет их в электролит. Летучие компоненты электролита и продукты их разложения растворяются в электролите и восстанавливают его состав и свойства. После окончания обработки деталь поднимается из электролита, напряжение отключается, деталь вынимается из крепления, промывается и сушится.

Геометрические размеры наружной камеры в миллиметрах выполнены в соответствии с формулой:

$$\begin{aligned} h + 10 &\leq H \leq K + 50 \\ 15 &\leq (D - d) / 2 \leq 50, \end{aligned} \quad (2)$$

где h – длина обрабатываемой детали; H – высота потолка наружной камеры над поверхностью электролита; K – вертикальный габаритный размер системы крепления при ее размещении внутри наружной камеры; d – горизонтальный габаритный размер обрабатываемой детали; D – внутренний диаметр наружной камеры.

Внутренняя высота наружной камеры H должна превышать длину обрабатываемой детали хотя бы на 10 мм при размещении системы крепления снаружи камеры. При меньшем различии высоты камеры и длины детали имеется опасность оплавления потолка

наружной камеры, поскольку температура детали, извлекаемой из электролита после обработки, может составлять сотни градусов. В случае размещения системы крепления внутри камеры ее высота должна превышать вертикальный габарит системы крепления на величину зазора между системой крепления и поверхностью электролита не менее 20 мм во избежание электрического пробоя между ними. Превышение высоты наружной камеры над вертикальным габаритом системы крепления более чем на 50 мм ведет к нецелесообразному увеличению объема камеры.

Внутренний диаметр наружной камеры должен превышать горизонтальный габарит обрабатываемой детали хотя бы на 30 мм во избежание электрического пробоя между деталью и стенкой-электродом рабочей камеры. Внутренний диаметр наружной камеры не должен превышать горизонтальный габарит обрабатываемой детали больше, чем на 50 мм, во избежание неоправданного увеличения объема рабочей камеры и находящегося в ней электролита.

Насос, отводящий газы в электролит, размещается вне наружной камеры во избежание коррозионных повреждений его корпуса.

Устройство для обработки длинномерных объектов

Устройство для ПЭО длинномерного изделия содержит обрабатывающий модуль, который включает вертикально расположенную ванну для электролита, токоподводящее устройство и систему прокачки электролита. Обрабатывающий модуль выполнен с возможностью вертикального перемещения по закрепленным на раме направляющим и содержит последовательно расположенные вдоль обрабатываемого изделия сверху вниз блок контроля размеров обрабатываемого изделия, круговую форсунку с кольцевым электродом и коническим соплом,

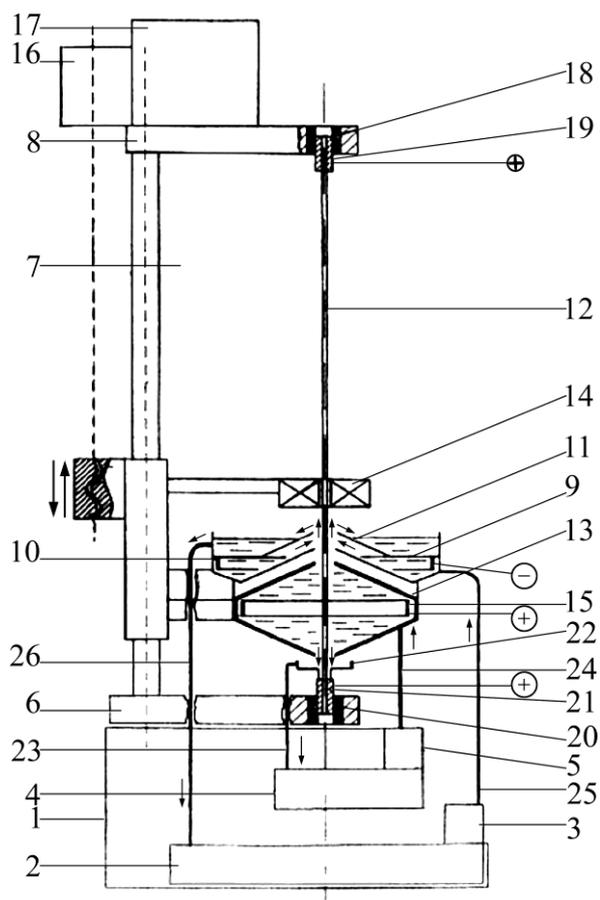


Рис. 17. Устройство для ПЭО длинномерного изделия: 1 – рама; 2 – ванна рабочего электролита; 3 – насос; 4 – ванна контактного электролита; 5 – насос; 6 – нижняя плита; 7 – направляющая; 8 – верхняя плита; 9 – круговая форсунка; 10 – кольцевой электрод; 11 – коническое сопло; 12 – обрабатываемое изделие; 13 – контактная камера; 14 – блок контроля размеров обрабатываемого изделия; 15 – кольцевой электрод; 16 – привод перемещения обрабатываемого модуля; 17 – блок управления; 18 – изолирующая втулка; 19 – зажимной токоподвод; 20 – изолирующая втулка; 21 – зажимной токоподвод; 22 – воронка для сбора вытекающего электролита; 23 – сливной патрубков; 24 – напорный патрубок; 25 – напорный трубопровод; 26 – сливной трубопровод [106].

охватывающим обрабатываемое изделие по контуру, и контактную камеру с кольцевым электродом внутри, выполненную из изолирующего материала в непосредственной близости от кольцевой зоны обработки круговой форсунки. Круговая форсунка гидравлически соединена с ванной для рабочего электролита через сливной и напорный с насосом рабочего электролита трубопроводы, ванна для контактного электролита гидравлически соединена с контактной камерой через напорный патрубок с насосом контактного электролита и через сливной патрубок с воронкой для сбора вытекающего электролита, установленной на обрабатываемом изделии под контактной камерой. Токоподводящее устройство выполнено в виде изолированных зажимных токоподводов, установленных на раме соосно коническому соплу обрабатываемого модуля, связанного с блоком управления вертикальными перемещениями, причем зажимные токоподводы и кольцевой электрод контактной

камеры аноднополяризованы, а кольцевой электрод катоднополяризован [106] (рис. 17).

ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОЙ ПЭО

Для проведения локальной (местной) обработки струя электролита направляется из спрейера на участок изделия, подлежащего модифицированию. Напряжение подается на изделие и второй электрод, помещенный внутри спрейера, или на его металлический корпус, играющий роль электрода. Такой способ упрочнения применялся для закалки кулачков распределительного вала трактора [60]. Вал зажимался в центрах и вращался со скоростью 30–40 об/мин, спрейер устанавливался под кулачками и шейками на расстоянии 20–30 мм (рис. 18). Равномерный нагрев кулачка, имеющего выступающую часть, достигался дополнительным перемещением спрейера по копиру. На вращающуюся деталь через трубку диаметром 12 мм подавалась струя электролита

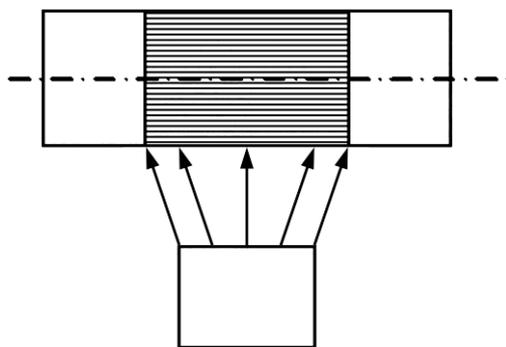
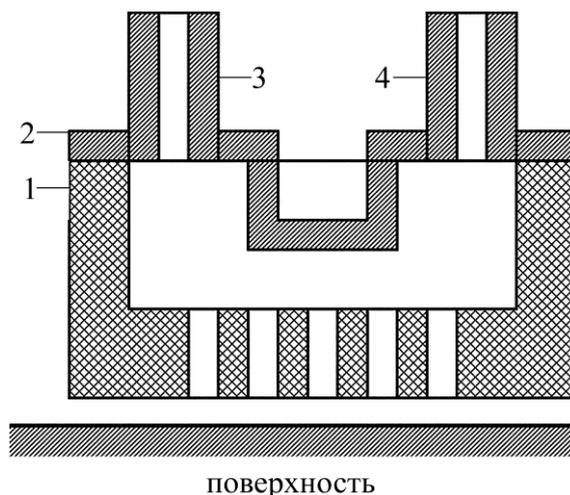


Рис. 18. Струйный нагрев вращающейся детали [60].



поверхность

Рис. 19. Устройство струйного нагрева: 1 – керамическая емкость; 2 – крышка-анод; 3 – патрубок для подачи электролита; 4 – патрубок для отвода избыточного электролита [107].

(10%-й раствор гидроксида натрия), затем включилось напряжение. После заданной выдержки для нагрева детали напряжение отключалось и деталь закаливалась струей электролита. В результате кулачок вала нагревался до 850 °С за 75 с, а шейка диаметром 55 мм – за 120 с. Полученный слой мартенсита составил 0,7–0,9 мм, ниже которого образовался подслои троостита с мартенситом и троостита с сорбитом 2,5–3 мм.

Вариант нагревательного устройства предложен в виде керамической емкости со сквозными каналами в донной части, расположенными на расстоянии 7–12 мм друг от друга [107] (рис. 19). Донная часть керамического элемента выполнена подобно форме поверхности обрабатываемого изделия. Емкость может иметь форму короба, стакана или иную. Крышка-анод выполняется плоской, выпуклой или вогнутой в сторону емкости. В верхней части крышки расположены патрубок для подачи электролита и патрубок для отвода избыточного электролита, а также электролизных газов и паров из внутренней полости устройства. Нагреваемое изделие помещают вблизи донной части керамического элемента устройства на минимально возможном по условиям нагрева расстоянии, например 3–4 мм. Изделие подключают к отрицательному полюсу источника питания, а

крышку – к положительному. Скорость (давление) подачи электролита и выхода его через каналы и патрубок регулируется дозирующими кранами (на рисунке не показаны). Сквозные каналы в донной части керамического элемента должны иметь минимальное, но достаточное для обеспечения нагрева сечение. Суммарная площадь их поперечных сечений не должна превышать поверхность анода, включая дополнительные аноды, если таковые установлены в полости устройства. Устройство можно перемещать по обрабатываемой поверхности в любом направлении для последовательной обработки различных участков. Замкнутый объем устройства дает возможность обрабатывать поверхности, расположенные под углом к горизонту, включая обработку поверхностей снизу. Два устройства, расположенные противоположно друг другу снизу и сверху движущейся или неподвижной ленты, могут обрабатывать ее с двух сторон одновременно. Автономность каждого устройства позволяет задавать им самостоятельные режимы работы для одновременной реализации электролитной очистки от окислов и загрязнений, светлого отжига второго рода, закалки и других применений ПЭХТО.

Струйный нагрев удобен для локального упрочнения рабочих поверхностей деталей или инструментов, в частности при анодной поляр-

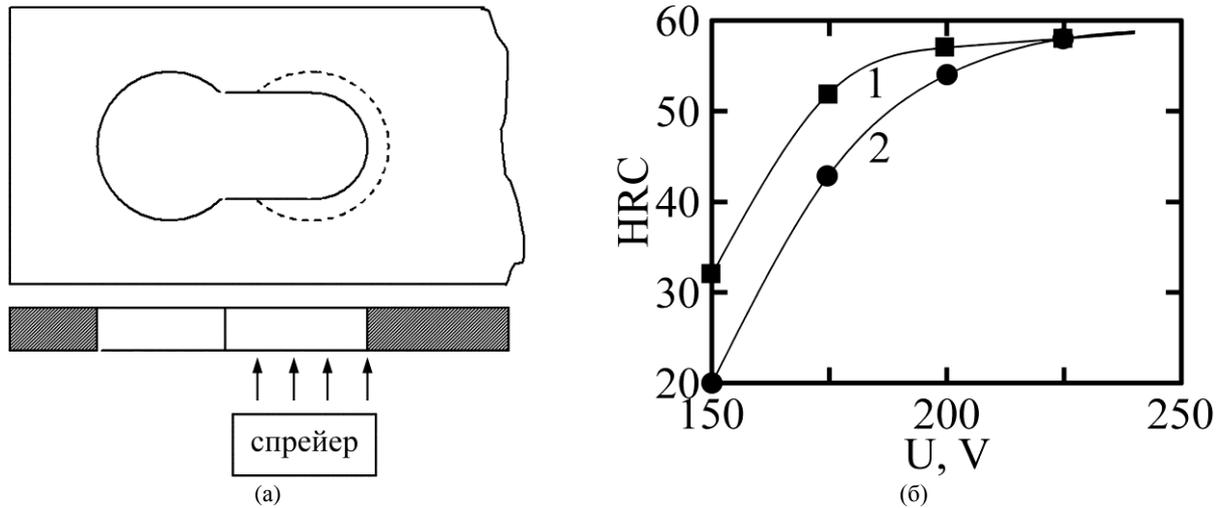


Рис. 20. Схема струйной закалки рабочего участка планки (а) и твердость нижней (1) и верхней (2) поверхностей планки при различных напряжениях (б) [109].

ности обрабатываемого изделия. Примерами реализации могут служить закалка рабочего участка режущего зуба пильной цепи ПЦУ-30, изготовленного из стали 9ХФ [108], или цементация с закалкой поверхности трения фиксатора замка автомобиля «Жигули» (сталь 08 кп) [59]. В последнем случае использовался фигурный спрейер, форма щели которого соответствовала контуру обрабатываемой детали. Толщина упрочненного слоя достигала 0,5 мм с поверхностной микротвердостью до 800 кгс/мм². Температура нагрева составляла 900 °С, продолжительность – 4 мин.

Другим достоинством струйной обработки является возможность упрочнения внутренних поверхностей деталей, работающих в качестве пар трения. К таким относятся многие втулки, рычаги и др. В качестве примера рассмотрим планку скребкового транспортера ТСН 3,0Б, изготавливаемую из стали 45 [109]. Эта деталь, обычно не упрочняемая никакими способами, подвержена интенсивному абразивному износу в паре с осью транспортера [110]. Подача струи электролита на рабочий участок фигурного отверстия позволяет осуществить нагрев внутренней поверхности детали с последующей закалкой (рис. 20а). Зона воздействия струи изображена на рисунке пунктиром. Нагрев планки осуществлялся по следующему циклу: включение рабочего напряжения, подача струи электролита на обрабатываемую поверхность, выдержка для разогрева детали, отключение напряжения и охлаждение детали струей электролита, промывка и сушка детали. Величина зазора между спрейером и нижней поверхностью горизонтально расположенной планки составляла 10 мм. Электролит – 15%-й водный раствор хлорида аммония. На рис. 20б

представлено влияние напряжения нагрева на твердость верхней и нижней поверхностей планки, измеряемой на расстоянии 1,5 мм от края отверстия. Продолжительность обработки – 30 с. Верхняя плоскость планки разогревается медленнее, чем нижняя, поэтому при меньших напряжениях ее твердость ниже. Такие же различия наблюдаются при кратковременном нагреве в течение 20–30 с. При напряжениях свыше 200 В и длительности нагрева более 30 с температуры верхних и нижних плоскостей упрочняемого участка выравниваются, а значения поверхностной твердости совпадают. Отметим, что закалка выполнялась без предварительной очистки или подготовки поверхности детали.

В качестве примера реализации метода локальной обработки можно привести устройство для ПЭО токопроводящих изделий, позволяющее существенно уменьшить электрическую мощность и металлоемкость электро-технического оборудования, а также значительно улучшить качество обработки (рис. 21) [111]. Помимо собственно ПЭХТО, авторы предлагают дополнительное ассистирование процесса модифицирования лазерным излучением и/или индуктором высокочастотного нагрева. Устройство работает следующим образом. Ванну заполняют электролитом (водным раствором соли низкой концентрации) и с помощью блока коррекции температуры электролита в ванной (насоса, охладителя и нагревателя) устанавливают рабочую температуру электролита (обычно 70–95 °С). Затем опускают в электролит обрабатываемое изделие и выдерживают его в горячем электролите определенное время для нагрева до температуры электролита. Затем подводят к поверхности обрабатываемого изделия малогабаритный катодный модуль, включают источник

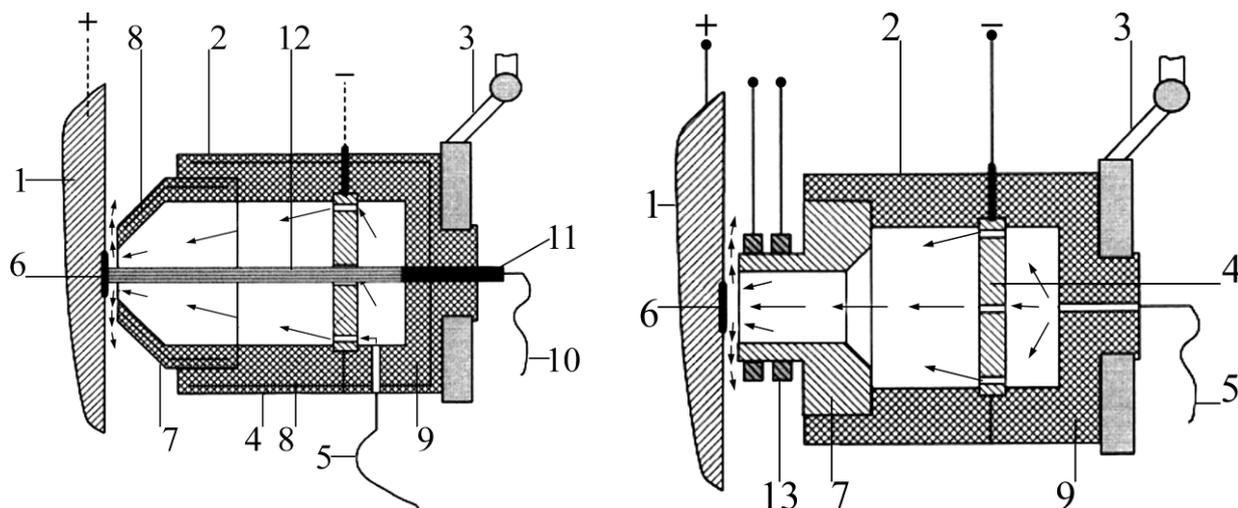


Рис. 21. Устройство для ПЭО: 1 – обрабатываемое изделие; 2 – малогабаритный катодный модуль; 3 – механизм промышленного робота; 4 – катод; 5 – шланг; 6 – источник нагрева локальной зоны; 7 – насадка малогабаритного катодного модуля; 8 – экран от электрического поля; 9 – корпус малогабаритного катодного модуля; 10 – оптоволоконный кабель; 11 – лазерный излучатель; 12 – лазерный пучок; 13 – индуктор высокочастотного нагрева [111].

постоянного тока и источник нагрева локальной зоны поверхности обрабатываемого изделия (лазерный излучатель или индуктор высокочастотного нагрева). Лазерный пучок или электромагнитное излучение индуктора осуществляют дополнительный нагрев локальной зоны на обрабатываемой поверхности, в результате чего в этой локальной зоне образуется парогазовая пленка с потоком плазмы. При этом начинается обработка локальной зоны (полировка или травление в зависимости от технологических факторов). Устойчивость парогазовой пленки в локальной зоне дополнительно поддерживается путем регулировки зазора между насадкой и обрабатываемой поверхностью, а также с помощью дополнительной коррекции температуры электролита, который подводится к модулю через шланг, нагревателем. Электролит подводится во внутреннюю полость малогабаритного катодного модуля, проходит через отверстия в катоде и вытекает через узкую щель между обрабатываемой поверхностью и стенками выходного отверстия насадки. Промышленный робот манипулирует положением модуля относительно изделия. Весь процесс обработки может осуществляться автоматически с помощью контроллера, связанного с системой управления процессом.

Метод локальной обработки нашел применение для ЭПП металлических деталей, в том числе со сложным профилем. В работе [112] описан способ ПЭО поверхности изделия – анода в струе электролита, подаваемой из сопла-катада вертикально вверх на обрабатываемую поверхность при напряжении 230–350 В и температуре 80–85 °С. Оборудование для реали-

зации способа содержит устройство позиционирования изделия относительно насадки для струйной подачи электролита, емкость с электролитом и источник постоянного тока.

Авторами [113] изучены технологические возможности применения струйного течения электролита при ЭПП в водном растворе сернокислого натрия (Na_2SO_4) стали аустенитного класса 12X18H10T. Была построена эмпирическая интерполяционная модель зависимости изменения шероховатости поверхности от напряжения, концентрации и скорости течения электролита, времени обработки. Расчеты в соответствии с моделью показали, что максимально значимыми факторами являются напряжение и концентрация электролита в выбранных диапазонах варьирования ($U = 300\text{--}380$ В, $c = 0,2\text{--}0,3$ моль/л, $v = 0,2\text{--}0,9$ л/мин, $\tau = 3\text{--}6$ мин). При одновременном увеличении всех факторов изменение шероховатости R_a увеличивается от 0,49 до 1,18 мкм, поэтому для изменения шероховатости на 0,5 мкм авторы рекомендуют следующий режим: напряжение 300 В; время полирования 3 мин; концентрация Na_2SO_4 в электролите 0,2 моль/л; скорость течения электролита 0,2 л/мин.

Неравномерный съем металла по обрабатываемой поверхности на краях или иных концентраторах можно преодолеть использованием фасонного электрода-инструмента с профилем заготовки [114]. Для повышения точности ЭПП разработано устройство, обеспечивающее синхронизированное перемещение обрабатываемой турбинной лопатки и катодного модуля по заданной программе [115]. Установка и технология рекомендуются для полирования деталей типа вала и других изделий сложной криволи-

нейной формы. Также предложена конструкция электролизера, над которым расположены элементы, отклоняющие конвейерную цепь с полируемыми изделиями на заданный угол от 10 до 40 градусов [116]. В результате поступательное перемещение изделий сопровождается их качанием в вертикальной плоскости, параллельной направлению движения, что способствует равномерной обработке сложной поверхности изделий и повышению их качества.

Внутренние поверхности различной кривизны могут обрабатываться непосредственной подачей электролита в замкнутое пространство [117]. На выходе электролита из обрабатываемого корпуса устанавливается анод, на входе – катод. Электролит циркулирует с помощью насоса через фильтр, ванну, куда заливается вода и вносятся компоненты раствора, теплообменник и нагреватель, отключаемый после достижения электролитом нижней границы диапазона рабочих температур на входе в ванну. Далее подается напряжение на катод. Необходимая температура электролита поддерживается регулятором его расхода.

Обработка отдельных поверхностей может выполняться перемещением катодного модуля с заданной высотой и скоростью над поверхностью лопатки [118]. При обычном погружении нарушаются геометрические параметры изделия по вертикали из-за более активного растворения на глубине. Кроме того, изменяются размеры лопатки в зоне утонений пера, острых углов, увеличивается радиус выходных кромок. Струйная обработка повышает точность профиля лопатки, особенно на кромках и поверхностях малых радиусных переходов. Узкий пучок плазменного шнура позволяет повысить плотность тока в зоне обработки, что увеличивает скорость съема.

В работе [119] описано применение опытно-экспериментальной установки с бесступенчатой регулировкой напряжения и полым катодом с целью обработки поверхности образцов электролитической плазменной струей без применения абразивного воздействия для получения металлографических микрошлифов с недеформированными поверхностными слоями для анализа. В качестве электролита для размерной обработки стали 95X18 исследовали 10%-й раствор NaCl, а для суперфинишной обработки – (0,03% Na₂SO₄ + 0,02% H₂SO₄) в водопроводной воде. Обработка позволила получить полированные поверхности с параметром шероховатости R_a от 0,5 до 0,015 мкм при исходной шероховатости поверхности $R_a > 25$.

Таким образом, достигаемым техническим результатом применения локальной обработки при ПЭО является повышение качества обработки сложнопрофильных поверхностей,

повторяемость результатов обработки, уменьшение электрической мощности и металлоемкости электротехнического оборудования.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

В большинстве публикаций ПЭХТО и ЭПП осуществляется с помощью источников постоянного тока различного типа. Простейшим вариантом является двухполупериодный выпрямитель переменного тока с трансформатором и шунтирующей емкостью. Серийные установки 1980-х годов комплектовались тиристорными источниками питания с выпрямителем по трехфазной мостовой схеме Ларионова. В настоящее время используются самые разные конструкции на современной элементной базе. Как правило, основой источников питания установок для ЭПП являются трехфазные трансформаторы [86, 114] или три однофазных трансформатора с электро-механическим приводом [120], которые дополняются выпрямителем на диодах [120, 114] или тиристорах [86] и конденсатором.

Перспективной тенденцией можно считать переход на импульсные источники питания. Разработан источник питания, формирующий импульсы тока амплитудой до 50 А при напряжении от нуля до 400 В обеих полярностей с регулированием длительности импульсов и паузы между ними в диапазоне от 10 мкс до 8,1 с, а также соотношения длительности импульсов и пауз от 1:1 до 1:9 [121].

Применение импульсного источника дает возможность увеличить стабильность свойств обрабатываемой поверхности за счет удаления катодных отложений, повысить отношение скорости сглаживания микронеровностей к общему съему металла, полировать материалы в простых электролитах без хромового ангидрида и предварительного нагрева электролита, полировать труднообрабатываемые материалы в солевых растворах без плавиковой кислоты.

Предложено также дополнительное наложение высокочастотного напряжения (350 кГц), помимо постоянного, что способствует выравниванию температуры детали, предохраняет ее от перегрева и оплавления кромок, а также приводит к увеличению толщины диффузионного слоя при цементации [122]. Схема подключения показана на рис. 22.

Дополнительное наложение униполярного и импульсного напряжения позволяет снизить потребляемую мощность. В этом случае начальный разогрев осуществляется обычным источником постоянного тока. После образования ПГО по всей обрабатываемой поверхности

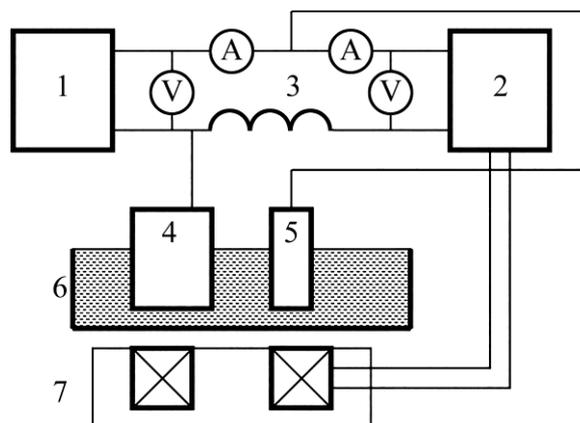


Рис. 22. Схема катодной ПЭХТО с наложением тока высокой частоты: 1 – источник высокочастотного тока (0–100 В; 0–10 А); 2 – источник постоянного тока (0–300 В; 0–50 А); 3 – индуктивность; 4 – графитовый электрод; 5 – нагреваемый образец-катод; 6 – ванна с электролитом; 7 – катушка с магнитным полем [122].

Таблица 4. Потребляемая мощность (Вт) при нагреве стальных образцов (диаметр 8,6 мм, высота 24 мм) в 10% водном растворе нитрата аммония. Предварительное напряжение 180 В. Крутизна нарастания импульсного напряжения 10^7 В/с, крутизна спада – 10^3 В/с [123]

Условия нагрева	Температура нагрева, °С							
	620	670	710	750	780	825	890	950
При постоянном напряжении	1230	1300	1343	1380	1386	1395	1452	1554
При импульсном напряжении	630	680	730	786	804	892	977	1113

на деталь подают униполярные импульсы треугольной формы с достаточно высокой крутизной нарастания (свыше 10^6 В/с). Нестационарные условия выделения энергии в оболочке обеспечивают более высокие тепловые потоки в анод, что позволяет вести нагрев при меньших затратах энергии [123] (табл. 4). Снижение потребляемой мощности составляет от 15 до 60% в зависимости от изменения отношения крутизны нарастания к крутизне спада импульса напряжения в диапазоне от 10^2 до 10^4 .

УСТРОЙСТВА ПОДАЧИ ДЕТАЛЕЙ В ЗОНУ ОБРАБОТКИ

Для единичной обработки образцов или небольшой партии деталей используются зажимные устройства с возможностью плавного погружения изделия в электролит с помощью механической подачи или вручную. После окончания обработки деталь поднимается из раствора, промывается водой и сушится. В ряде установок деталь закрепляется в ванне, включается напряжение и лишь после этого в ванну подается электролит. В случае серийной обработки целесообразна непрерывная подача обрабатываемых деталей, которая может осуществляться на базе различных технических решений. Разработано устройство с механизированной подачей изделий в зону обработки [124], где кольцевой постоянный катод размещен соосно со сменной направляющей втулкой (рис. 23). Эта втулка изготавливается из фторопласта и крепится на крышке (на рисунке не

изображена) ванны. При необходимости она может экранировать конец изделия, если уровень электролита в ванне, контролируемый сливным патрубком, достигает втулки. Постоянный катод экранирован от электролита капроновой шайбой. При загрузке изделие опирается на перемещающийся упор, электрически связанный с катодом. Кроме того, устройство содержит анод, штуцер для подачи электролита в ванну и второй патрубок, обеспечивающий полный слив электролита из ванны с управляемым шариковым клапаном, которые на рисунке не показаны.

Устройство работает следующим образом. Изделие подается через втулку и катод из загрузочного бункера, затем фиксируется упором. В этот момент открыт управляемый клапан, через который сливался весь электролит из ванны. Затем клапан закрывается, на катод подается заданное напряжение, и электролит заполняет рабочую камеру. По окончании цикла нагрева открывают клапан для слива электролита и перемещают упор, благодаря чему изделие выпадает из ванны. Изменением положения упора по вертикали можно управлять длиной нагреваемой части изделия. Точно так же изменением положения втулки можно варьировать длину конца изделия, предохраняемого от перегрева, если ванна заполняется электролитом полностью. При переходе от одного диаметра изделий на другой производят замену втулки и катода с экранирующей шайбой. В модифицированном устройстве втулка имеет возможность перемещения для регулирования длины

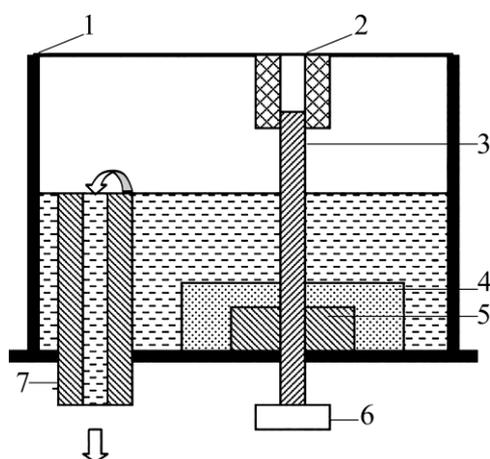


Рис. 23. Устройство ПЭХТО с механизированной подачей деталей в зону обработки: 1 – крышка ванны; 2 – втулка; 3 – обрабатываемая деталь; 4 – капроновая шайба; 5 – постоянный катод; 6 – упор; 7 – сливной патрубок [124].

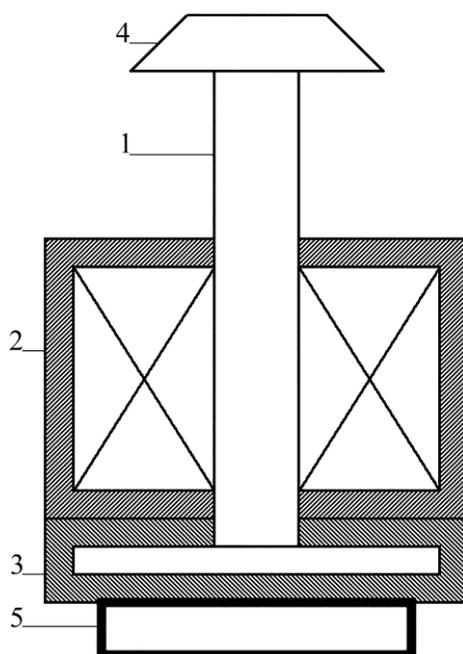


Рис. 24. Электромагнит для захвата обрабатываемой детали: 1 – стержень; 2 – электромагнитная катушка; 3 – водоохлаждаемая пластина; 4 – коническая шестерня; 5 – обрабатываемая деталь [127].

обрабатываемой детали, а анод выполняется телескопическим. Наружное кольцо анода соединяется с втулкой, а внутреннее крепится на ванне [125].

Для крепления и перемещения нагреваемых деталей предложены электромагнитные затворы. Сердечник электромагнита может иметь способность к перемещению, это позволяет поворачивать обрабатываемую деталь и вести ее обработку с двух сторон [126]. Такой способ крепления удобен для нагрева достаточно крупных деталей, но не пригоден для обработки изделий малой толщины. Поверхность, противоположная нагреваемой, из-за отсутствия условий для отвода тепла достигает температуры выше точки Кюри и перестает удерживаться патроном. Для устранения этого недостатка предложена конструкция электромагнита, снабженного полый водоохлаждаемой пластиной (рис. 24) [127]. Устройство состоит из стержня, электро-

магнитной катушки, полый водоохлаждаемой пластины из материала с высокой теплопроводностью, например меди. Вода поступает в полость пластины и отводится из нее с помощью штуцеров (на рисунке не показаны). На верхний конец стержня надета коническая шестерня, зацепленная за шестерню привода вращения электромагнита. Вращение обрабатываемой детали вокруг своей оси на протяжении всего времени обработки обеспечивает равномерную толщину закаленного слоя по поверхности упрочнения.

Для переноса детали с позиции загрузки на позицию обработки применяется устройство, выполненное в виде колонны с поворотным плечом (рис. 25). Механизм работает следующим образом. Обрабатываемая деталь подается из кассеты (на рисунке не показана) на подставку и захватывается электромагнитом. Затем колонна с электромагнитом поворачиваются на позицию

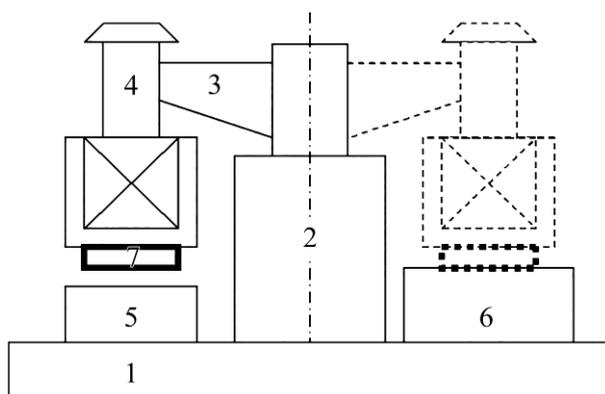


Рис. 25. Установка для закалки деталей: 1 – бак-станина; 2 – поворотная колонна; 3 – плечо; 4 – электромагнит; 5 – ванна; 6 – подставка; 7 – обрабатываемая деталь [127].

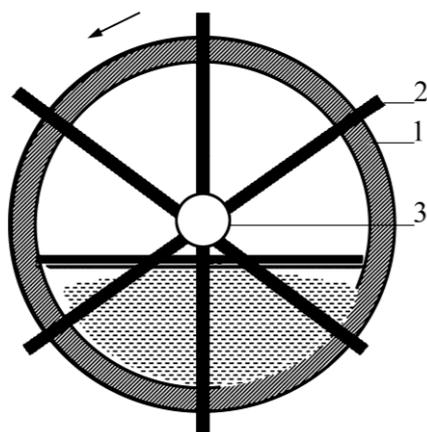


Рис. 26. Установка для ПЭХТО во вращающейся ванне: 1 – барабан; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – контактная втулка [129].

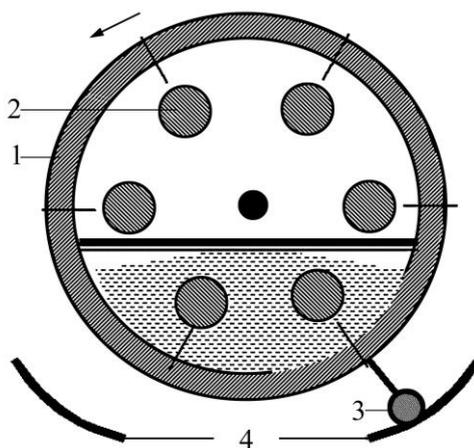


Рис. 27. Установка для ПЭХТО во вращающейся ванне: 1 – барабан; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – ползун; 4 – неподвижная колодка [129].

нагрева и закалки. При этом включается вращение электромагнита и обрабатываемой детали, подается напряжение нагрева, а электролит подается в ванну из бака-станины насосом. Для закалки детали постоянный ток отключается, а в ванну дополнительно подается электролит, обеспечивающий интенсивное охлаждение. После окончания охлаждения электролит сливается обратно в бак-станину, колонна поворачивается на позицию выгрузки,

ток в электромагните выключается и деталь падает специальный лоток.

Для одновременной обработки нескольких деталей их можно размещать на столе с возможностью опускать в ванну с электролитом и поднимать из нее после обработки [128]. Кроме того, предложена вращающаяся ванна в виде барабана для катодного нагрева нескольких заготовок (рис. 26) [129]. Концы заготовок зажимаются в центре контактной втулкой, к ним

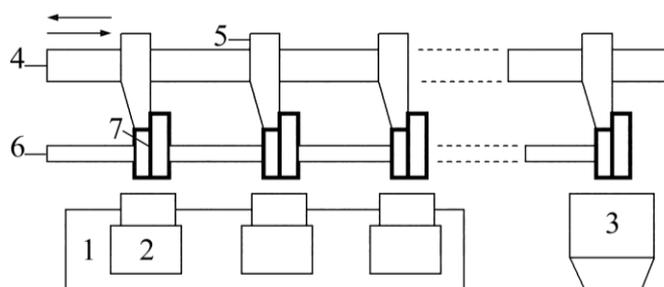


Рис. 28. Устройство для ПЭХТО с применением шагового конвейера: 1 – бак-станина; 2 – ванна; 3 – спрейер; 4 – толкающая штанга; 5 – защелка; 6 – направляющий пруток; 7 – обрабатываемая деталь [134].

подводится отрицательный потенциал контактными вилками. Другие концы заготовок выпущены через отверстия в барабане. Погружение заготовок осуществляется поворотом ванны вокруг ее оси, расположенной горизонтально.

Другой вариант обработки заготовок во вращающейся ванне представлен на рис. 27 [130]. В барабане заготовки размещаются горизонтально. В торцах барабана имеются устройства для выталкивания нагретых заготовок. На наружной стороне цилиндрической поверхности барабана имеется ползун, через который подается напряжение с неподвижных колодок. В случае двухступенчатого нагрева с колодок подаются начальное большее и рабочее меньшее напряжения. На заготовки подается отрицательный потенциал через отдельные коллекторные устройства (на рисунке не показаны).

В некоторых установках имеются отдельные позиции нагрева для различных одновременно обрабатываемых деталей в виде ванн или струйных устройств. Ванна может быть разделена на отдельные секции с независимыми средствами приема и выгрузки заготовок [131, 132]. Наличие нескольких позиций нагрева с независимыми контактными устройствами, системами циркуляции электролита и механизмами перемещения деталей позволяет совмещать операции нагрева, загрузки и разгрузки [133].

Разработана также циклическая подача деталей на позицию нагрева с помощью шагового конвейера (рис. 28) [134]. Устройство работает следующим образом. Подача деталей на направляющие прутки, а также фиксация этих прутков осуществляются механизмом. Продвижение деталей с одной позиции обработки на другую и на позицию закалки спрейером происходит под действием защелок толкающих штанг. В течение нагрева или закалки деталей на различных позициях совершается обратное движение толкающих штанг, а также сбрасывание закаленных деталей на лоток. Предлагаемое устройство разработано для

закалки беговых дорожек щек гусеничной цепи в Алтайском НИИ технологии машиностроения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В обзоре представлены результаты анализа технологических особенностей ПЭО, в частности ПЭХТО и ЭПП. Рассмотрена группа методов, основанных на погружении обрабатываемых деталей в электролизер: концевой, полный и последовательный нагрев, а также метод струйной обработки, заключающийся в подаче струи электролита на участок обрабатываемой поверхности. Указаны особенности и определено назначение каждого метода.

Показано определяющее влияние характеристик электролизера, источника питания и системы подачи детали в электролит на возможности обработки. Данные характеристики оборудования наряду с применяемыми технологическими приемами определяют специфику того или иного метода ПЭО. Установлено влияние конструкции электролизера на гидродинамические условия, существенно влияющие на теплофизические характеристики обработки и, соответственно, на насыщающую способность ПГО. Рассмотрены технологические приемы, улучшающие качество и производительность обработки, которые направлены на повышение равномерности обработки коррекцией гидродинамических условий, включают экранирование обрабатываемых деталей, создают радиальные потоки электролита, обеспечивают продольное распределенное обтекание, а также повышают долговечность электролита. Показано, что характеристики источника питания определяют энергетические условия обработки, в том числе различные режимы существования электролитной плазмы.

Определено, что наиболее изученными и усовершенствованными являются технологии, в которых происходит погружение обрабатываемой детали в электролизер с электролитом. Уровень развития данных технологий дошел до разработки и использования в серийном произ-

водстве промышленных установок. Необходимость погружения обрабатываемой детали в электролит не позволяет равномерно обрабатывать изделия сложной формы, площадь обрабатываемой поверхности ограничивается размерами электролизера, мощностью источника тока и эффективностью теплообменника. Невозможна обработка внутренних поверхностей. Перспективным видится развитие технологий локальной обработки, в частности, струйной подачи электролита на участок поверхности. Такие технологии могут быть использованы для решения задач по обработке изделий сложной формы, больших размеров, внутренних поверхностей, а также для дифференциального повышения твердости, износостойкости и коррозионной стойкости отдельных участков металлических изделий.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00391, <https://rscf.ru/project/24-19-00391/>

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Belkin, P., Kusmanov, S., Shadrin, S. and Dyakov, I., *The Plasma Electrolytic Modification of Metals and Alloys*. Newcastle upon Tyne: Cambridge Scholars Publishing, 2023. 671 p.
- Кусманов, С.А., Дьяков, И.Г., Белкин, П.Н., *Теоретические основы электролитно-плазменного нагрева и его применение для диффузионного насыщения металлов и сплавов*. Кострома: Изд-во Костром. гос. ун-та, 2017. 420 с.
- Белкин, П.Н., *Электрохимико-термическая обработка металлов и сплавов*. М.: Мир, 2005. 336 с.
- Bayatanova, L., Rakhadilov, B., Kurbanbekov, S., Skakov, D., et al., Fine structure of low-carbon steel after electrolytic plasma treatment, *Materialpruefung/Materials Testing*, 2021, vol. 63, p. 842. <https://doi.org/10.1515/mt-2020-0119>
- Kazerooni, N.A., Bahrololoom, M.E., Shariat, M.H., Mahzoon, F., et al., Effect of ringer's solution on wear and friction of stainless steel 316L after plasma electrolytic nitrocarburising at low voltages, *J. Mat. Sci. Technol.*, 2011, vol. 27, p. 906. [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(11\)60163-1](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(11)60163-1)
- Chongyang, N., Tianlin, Z., Yue, X., Lixia, Y., et al., Study on preparation and friction characteristics of steel 1045 modified layer based on plasma electrolytic carbonitriding, *Mater. Today Commun.*, 2022, vol. 33, art. ID 104518. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104518>
- Kusmanov, S.A., Dyakov, I.G., Belkin, P.N., Gracheva, L.A., et al., Plasma Electrolytic Modification of the VT1-0 titanium alloy surface, *J. Surf. Investig.*, 2015, vol. 9, no. 1., p. 98. <https://doi.org/10.1134/S1027451015010139>
- Jiang, Y.F., Bao, Y.F. and Yang, K., Effect of C/N concentration fluctuation on formation of plasma electrolytic carbonitriding coating on Q235, *J. Iron Steel Res.*, 2012, vol. 19, p. 39. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60018-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60018-7)
- Rastkar, A.R. and Shokri, B., Surface modification and wear test of carbon steel by plasma electrolytic nitrocarburizing, *Surf. Interface Anal.*, 2012, vol. 44, p. 342. <https://doi.org/10.1002/sia.3808>
- Kusmanov, S.A., Smirnov, A.A., Silkin, S.A. and Belkin, P.N., Increasing wear and corrosion resistance of low-alloy steel by anode plasma electrolytic nitriding, *Surf. Coat. Technol.*, 2016, vol. 307, p. 1350. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.07.050>
- Jin, X., Chen, L., Wei, K., Liu, R., et al., Fabrication and wear behavior of PEN/C hardened layer on pure iron, *Surf. Rev. Lett.*, 2022, vol. 29, art. ID 2250027. <https://doi.org/10.1142/S0218625X22500275>
- Zarchi, M.K., Shariat, M.H., Dehghan, S.A. and Solhjoo, S., Characterization of nitrocarburized surface layer on AISI 1020 steel by electrolytic plasma processing in a urea electrolyte, *J. Mater. Res. Technol.*, 2013, vol. 2, p. 213. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.011>
- Pérez, H., Vargas, G., Magdaleno, C. and Silva, R., Oxy-nitriding AISI 304 stainless steel by plasma electrolytic surface saturation to increase wear resistance, *Metals*, 2023, vol. 13, art. ID 309. <https://doi.org/10.3390/met13020309>
- Pohrelyuk, I.M., Tkachuk, O.V., Proskurnyak, R.V., Kuznetsov, O.V., et al., Morphology and corrosion properties of hydroxyapatite coating on VT6 titanium alloy, *Mat. Sci.*, 2023, vol. 58, p. 781. <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00730-1>
- Mukhacheva, T.L., Belkin, P.N., Dyakov, I.G. and Kusmanov, S.A., Wear mechanism of medium carbon steel after its plasma electrolytic nitrocarburising, *Wear*, 2020, vol. 462-463, art. ID 203516. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203516>
- Chen, F., Yu, Sh., Lu, W., Pang, J., et al., Effect of rare earth elements on plasma electrolytic carbonitriding of Ti-6Al-4V alloy, *Mater. Sci. Technol.*, 2019, vol. 35, p. 2275. <https://doi.org/10.1080/02670836.2019.1673027>
- Smirnov, A.A., Kusmanov, S.A., Kusmanova, I.A. and Belkin, P.N., Effect of electrolyte depletion on the characteristics of the anodic plasma electrolytic nitriding of a VT22 titanium alloy, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2017, vol. 53, no. 5, p. 413. <https://doi.org/10.3103/S106837551705012X>
- Wu, J., Liu, R., Xue, W., Wang, B., et al., Analyses of quenching process during turn-off of plasma electrolytic carburizing on carbon steel, *Appl. Surf. Sc.*, 2014, vol. 316, p. 102. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.07.193>
- Kusmanov, S.A., Tambovskiy, I.V., Silkin, S.A., Kusmanova, I.A., et al., Anode plasma electrolytic borocarburing of alpha + beta-titanium alloy, *Surf. Interfaces*, 2020, vol. 21, art. ID 100717. <https://doi.org/10.1016/j.surf.2020.100717>

20. Wu, J., Deng, J., Dong, L. and Hou, D., Direct growth of oxide layer on carbon steel by cathodic plasma electrolysis, *Surf. Coat. Technol.*, 2018, vol. 338, p. 63. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.01.080>
21. Yerokhin, A.L., Leyland, A., Tsotsos, C., Wilson, A.D., et al., Duplex surface treatments combining plasma electrolytic nitrocarburising and plasma-immersion ion-assisted deposition, *Surf. Coat. Technol.*, 2001, vol. 142–144, p. 1129. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01097-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01097-0)
22. Sheng, Y., Zhang, Z. and Li, W., Effects of pulse frequency and duty cycle on the plasma discharge characteristics and surface microstructure of carbon steel by plasma electrolytic nitrocarburizing, *Surf. Coat. Technol.*, 2017, vol. 330, p. 113. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.09.031>
23. Tavakoli, H., Mousavi Khoie, S.M., Marashi, S.P.H. and Bolhasani, O., Effect of electrolyte composition on characteristics of plasma electrolysis nitrocarburizing, *J. Mater. Eng. Perform.*, 2013, vol. 22, p. 2351. <https://doi.org/10.1007/s11665-013-0505-3>
24. Nie, X., Tsotsos, C., Wilson, A., Yerokhin, A.L., et al., Characteristics of a plasma electrolytic nitrocarburising treatment for stainless steels, *Surf. Coat. Technol.*, 2001, vol. 139, p. 135. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01025-8](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01025-8)
25. Belkin, P., Kusmanov, S., Naumov, A. and Parkaeva, Yu., Anodic plasma electrolytic nitrocarburizing of low-carbon steel, *Adv. Mater. Res.*, 2013, vol. 704, p. 31. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.704.31>
26. Суминов, И.В., Эпельфельд, А.В., Людин, В.Б., Крит, Б.Л., и др., *Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование)*. М.: ЭКОМЕТ, 2005. 368 с.
27. Эпельфельд, А.В., Белкин, П.Н., Борисов, А.М., Васин, В.А., и др., *Современные технологии модификации поверхности материалов и нанесения защитных покрытий: в 3-х, т. М.; СПб.: Реноме, 2017. Т. I: Микродуговое оксидирование. 648 с.*
28. Гордиенко, П.С., Доставалов, В.А., Ефименко А.В., *Микродуговое оксидирование металлов и сплавов*. Владивосток: ДВФУ, 2013. 521 с.
29. Ракоч, А.Г., Дуб, А.В., Гладкова, А.А., *Анодирование лёгких сплавов при различных электрических режимах. Плазменно-электролитическая нанотехнология*. М.: Старая Басманная, 2012. 496 с.
30. Apelfeld, A., Grigoriev, S., Krit, B., Ludin, V., et al., Improving the stability of the coating properties for group plasma electrolytic oxidation, *Manuf. Lett.*, 2022, vol. 33, p. 54. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2022.08.005>
31. Kuroda, P.A.B., Cardoso, G.C., Rossi, M.C., Afonso, C.R.M., et al., Analyzing PEO anodization time to monitor coatings phases, composition, morphology, thickness, and microhardness during the growth of TiO₂ pores on the CP-Ti surface, *Mater. Lett.*, 2024, vol. 363, art. ID 136226. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.136226>
32. Grigoriev, S., Peretyagin, N., Apelfeld, A., Smirnov, A., et al., Investigation of Tribological Characteristics of PEO Coatings Formed on Ti6Al4V Titanium Alloy in Electrolytes with Graphene Oxide Additives, *Materials*, 2023, vol. 16, p. 3928. <https://doi.org/10.3390/ma16113928>
33. Valizade, N., Sabour Rouh Aghdam, A. and Jarjoura, G., Corrosion and biological study on biofunctionalized porous coating on titanium produced by plasma electrolytic oxidation, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 2024, vol. 688, p. 133567. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133567>
34. Grigoriev, S.N., Kondratsky, I.O., Krit, B.L., Ludin, V.B., et al., Protective and Thermophysical Characteristics of Plasma-Electrolytic Coatings on the Ultralight Magnesium Alloy, *J. Eng. Mater. Technol.*, 2022, vol. 144, art. ID 021006. <https://doi.org/10.1115/1.4052718>
35. Lashkarara, S., Fazlali, A., Ghaseminezhad, K., Fleck, C., et al., Mechanism of plasma electrolytic oxidation in Mg3ZnCa implants: a study of double-layer formation and properties through nanoindentation, *Sci. Rep.*, 2024, vol. 14, p. 7380. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58008-8>
36. Hoseini, A. and Yarmand, B., Photoelectrocatalytic and photocorrosion behavior of MoS₂- and rGO-containing TiO₂ bilayer photocatalyst immobilized by plasma electrolytic oxidation, *J. Alloys Compd.*, 2024, vol. 984, art. ID 173976. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.173976>
37. Grigoriev, S., Peretyagin, N., Apelfeld, A., Smirnov, A., et al., Investigation of the characteristics of MAO coatings formed on Ti6Al4V titanium alloy in electrolytes with graphene oxide additives, *J. Compos. Sci.*, 2023, vol. 7, art. ID 142. <https://doi.org/10.3390/jcs7040142>
38. Синькевич, Ю.В., Шелег, В.К., Янковский, И.Н., Беляев, Г.Я., *Электроимпульсное полирование сплавов на основе железа, хрома и никеля*. Минск: БНТУ, 2014. 325 с.
39. Попов, А.И., Атомно-дислокационная модель удаления поверхностных слоев струйным электролитно-плазменным полированием, *Воронежский научно-технический вестник*, 2024, № 1(47), с. 31. <http://dx.doi.org/10.34220/2311-8873-2024-31-51>
40. Xiang, Y., Sun, H., Yang, D., Ji, G., et al., Material removal model for describing the plasma discharge effect in magnetic-electrolytic plasma polishing, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2023, vol. 131, p. 5023. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13328-x>
41. Yang, D., Sun, H., Wang, J., Ji, G., et al., The formation and stripping mechanism of oxide film on Ti6Al4V alloy surface during electrolytic plasma polishing, *Surf. Coat. Technol.*, 2024, vol. 478, art. ID 130469. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130469>
42. Apelfeld, A., Borisov, A., Dyakov, I., Grigoriev, S., et al., Enhancement of medium-carbon steel corrosion and wear resistance by plasma electrolytic nitriding and polishing, *Metals*, 2021, vol. 11, art. ID 1599. <https://doi.org/10.3390/met11101599>

43. Witzke, K., Kensbock, R., Willsch, C.U., Fricke, K., et al., Mechanical and plasma electrolytic polishing of dental alloys, *Materials*, 2023, vol. 16, art. ID 6222. <https://doi.org/10.3390/ma16186222>
44. An, S., Hansen, L., Wolff, T., Foest, R., et al., Energetic characterization during plasma electrolytic polishing of cemented tungsten carbide, *J. Appl. Phys.*, 2023, vol. 134, art. ID. 033305. <https://doi.org/10.1063/5.0155581>
45. Parfenov, E.V., Farrakhov, R.G., Mukaev, V.R., Gusarov, A.V., et al., Electric field effect on surface layer removal during electrolytic plasma polishing, *Surf. Coat. Technol.*, 2016, v. 307, p. 1329. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.08.066>
46. Григорьев, С.Н., Крит, Б.Л., Кусманов, С.А., Мухачёва, Т.Л., и др., *Электрофизические технологии: плазменно-электролитная химико-термическая обработка материалов*. М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2023. 366 с.
47. Belkin, P.N., Yerokhin, A. and Kusmanov, S.A., Plasma electrolytic saturation of steels with nitrogen and carbon, *Surf. Coat. Technol.*, 2016, vol. 307, p. 1194. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.06.027>
48. Fattah-alhosseini, A., Molaei, M. and Kaseem, M., A review on the plasma electrolytic oxidation (PEO) process applied to copper and brass, *Surf. Interfaces*, 2024, vol. 46, art. ID 104179. <https://doi.org/10.1016/j.surfint.2024.104179>
49. Belkin, P.N., Borisov, A.M. and Kusmanov, S.A., Plasma electrolytic saturation of titanium and its alloys with light elements, *J. Surf. Investig.*, 2016, vol. 10, no. 3, p. 516. <https://doi.org/10.1134/S1027451016030058>
50. Aliofkhaezrai, M., Macdonald, D.D., Matykina, E., et al., Review of plasma electrolytic oxidation of titanium substrates: Mechanism, properties, applications and limitations, *Appl. Surf. Sci. Advances*, 2021, vol. 5, art. ID 100121. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100121>
51. Belkin, P.N. and Kusmanov, S.A., Plasma electrolytic nitriding of steels, *J. Surf. Investig.*, 2017, vol. 11, no. 4, p. 767. <https://doi.org/10.1134/S1027451017020045>
52. Yerokhin, A.L., Nie, X., Leyland, A., Matthews, A., et al., Plasma electrolysis for surface engineering, *Surf. Coat. Technol.*, 1999, vol. 122, p. 73. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00441-7](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00441-7)
53. Belkin, P.N. and Kusmanov, S.A., Plasma electrolytic boriding of steels and titanium alloys, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2019, vol. 55, no 1, p. 1. <https://doi.org/10.3103/S106837551901006X>
54. Sikdar, S., Menezes, P.V., Maccione, R., Jacob, T., et al., Plasma electrolytic oxidation (Peo) process—processing, properties, and applications, *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, no. 6, art. ID 1375. <https://doi.org/10.3390/nano11061375>
55. Belkin, P.N., Kusmanov, S.A. and Parfenov, E.V., Mechanism and technological opportunity of plasma electrolytic polishing of metals and alloys surfaces, *Appl. Surf. Sci. Advances*, 2020, vol. 1, art. ID 100016. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2020.100016>
56. Ясногородский, И.З. *Автоматический нагрев в электролите*. М.: Оборонгиз, 1947. 24 с.
57. Суминов, И.В., Белкин, П.Н., Эпельфельд, А.В., Людин, В.Б., и др., *Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов*. В 2-х томах. М.: Техносфера, 2011. Т. 1. 464 с.
58. Тарасов, А.Н., Прокофьев, М.А., Упрочнение концевое стоматологического инструмента из титановых сплавов электролитным азотированием на установке УХТО-5М/А, *ЭОМ*, 1991, № 2, с. 20.
59. Факторович, А.А., Пасинковский, Е.А., Белкин, П.Н., Азотирование и нитроцементация в электролитной плазме, *Защитные покрытия на металлах*, 1980, № 14, с. 50.
60. Ясногородский, И.З. *Нагрев металлов и сплавов в электролите*. М.: Машгиз, 1949. 127 с.
61. Kusmanov, S.A., Smirnov, A.A., Silkin, S.A., Parfenyuk, V.I., et al., Plasma electrolytic nitriding of alpha- and beta-titanium alloy in ammonia-based electrolyte, *Surf. Coat. Technol.*, 2016, vol. 307, p. 1291. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.08.019>
62. Belkin, P.N., Kusmanov, S.A., Zhironov, A.V., Belkin, V.S., et al., Anode plasma electrolytic saturation of titanium alloys with nitrogen and oxygen, *J. Mat. Sci. Technol.*, 2016, vol. 32, p. 1027. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2016.06.005>
63. Kusmanov, S.A., Kusmanova, Yu.V., Naumov, A.R. and Belkin, P.N., Formation of diffusion layers by anode plasma electrolytic nitrocarburizing of low-carbon steel, *J. Mat. Eng. Perform.*, 2015, vol. 24, no. 8, p. 3187. <https://doi.org/10.1007/s11665-015-1578-y>
64. Kusmanov, S.A., Tambovskiy, I.V., Korableva, S.S., Dyakov, I.G., et al., Enhancement of wear and corrosion resistance in medium carbon steel by plasma electrolytic nitriding and polishing, *J. Mat. Eng. Perform.*, 2019, vol. 28, no. 9, p. 5425. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04342-2>
65. Kusmanov, S.A., Tambovskii, I.V., Kusmanova, I.A. and Belkin, P.N., Improving the wear resistance of VT22 titanium alloy by anodic plasma electrolytic boriding, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2021, vol. 57, no. 4, p. 419. <https://doi.org/10.3103/S1068375521040098>
66. Kusmanov, S.A., Tambovskii, I.V., Korableva, S.S., Silkin, S.A., et al., Increase in hardness and corrosion resistance of a medium-carbon steel surface using cathodic plasma electrolytic nitriding, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2022, vol. 58, p. 323. <https://doi.org/10.3103/S106837552204010X>
67. Belkin, P.N., Dyakov, I.G., Zhironov, A.V., Kusmanov, S.A., et al., Effect of compositions of active electrolytes on properties of anodic carburization, *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2010, vol. 46, no. 6, p. 715. <https://doi.org/10.1134/S2070205110060158>
68. Tambovskiy, I., Mukhacheva, T., Gorokhov, I., Suminov, I., et al., Features of cathodic plasma electrolytic nitrocarburizing of low-carbon steel in an aqueous electrolyte of ammonium nitrate and glycerin, *Metals*, 2022, vol. 12, art. ID 1773. <https://doi.org/10.3390/met12101773>
69. Ясногородский, И.З., *Устройство для последовательного нагрева металлических изделий (лент, труб, прутков и т. д.)*, СССР А.с. 83803,

1975. 5 с. <https://patents.su/5-83803-ustrojstvo-dlya-posledovatel'nogo-nagreva-metallicheskih-izdelij-lent-prutkov-trub-i-t-p.html>
70. Речкалов, И.Т., Давыдов, С.Н., *Ванна для нагрева изделий*, СССР А.с. 507659, 1976. Бюл. № 1. 3 с. <https://patents.su/2-507659-vanna-dlya-nagreva-izdelij.html>
71. Ясногородский, И.З. *Использование в промышленности нагрева в электролите*. Л.: Машгиз, 1953. 23 с.
72. Котлярский, Б.Б., Голубничий, А.И., Бобро, Ю.Г., Казарцев, В.В., *Установка для нагрева изделий в электролите*, СССР А.с. 931760, 1982. Бюл. № 20. 5 с. <https://patents.su/5-931760-ustrojstvo-dlya-nagreva-izdelij-v-ehlektrolite.html>
73. Ярмицкий, С.П., Левлев, В.Б., Лоффе, М.Л., Куксов, А.П., и др., *Устройство для последовательного нагрева изделий в электролите*, СССР А.с. 711124, 1980. Бюл. № 3. 2 с. <https://patents.su/2-711124-ustrojstvo-dlya-posledovatel'nogo-nagreva-izdelij-v-ehlektrolite.html>
74. Toyota Motor Corporation. *Method of electrolytic quenching with immersion*. Japan Application 52-1368, issued January 13, 1977.
75. Попов, А.И., Попова, А.И., Попова, Д.А., Технологические аспекты струйной электролитно-плазменной обработки, *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*, 2019, т. 25, № 4, с. 54. <https://doi.org/10.18721/JEST.25405>
76. Гайсин, Ф.М., Сон, Э.Е., *Электрические разряды в парогазовой среде с нетрадиционными электродами*. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 2000. 241 с.
77. Сапатаев, Е.Е., Скаков, М.К., Управление процессом локального модифицирования при воздействии электролитной плазмой, *Вестник КазНТУ*, 2017, № 1(119), с. 351.
78. Popov, A.I., Novikov, V.I. and Radkevich, M.M., Characteristics of the development of electric discharge between the jet electrolyte cathode and the metal anode at atmospheric pressure, *High temperature*, 2019, vol. 57, no. 4, p. 483.
79. Popov, A.I., Popova, A.I., Zakharov, S.V., Novoselov, M.V., et al., Processes of contact interaction of an electrolyte plasma jet with a surface, *Adv. Mech. Eng.*, 2022, p. 176. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91553-7_19
80. Wu, J., Liu, R., Xue, W., Wang, B., et al., Analyses of quenching process during turn-off of plasma electrolytic carburizing on carbon steel, *Appl. Surf. Sc.*, 2014, vol. 316, p. 102. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.07.193>
81. Dyakov, I.G., Shadrin, S.Y. and Belkin, P.N., Features of anode heating in movement of electrolyte in a free convection regime, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2004, No 4, p. 107.
82. Aliofkhaeaei, M., Sabour Rouhaghdam, A. and Gupta, P., Nano-fabrication by cathodic plasma electrolysis, *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, 2011, vol. 36, p. 174. <http://dx.doi.org/10.1080/10408436.2011.593269>
83. Белихов, А.Б., *Анодная цементация материалов на основе железа с целью повышения их износостойкости*, автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кострома, 1999. 16 с.
84. Комаров, А.О., Влияние диаметра рабочей камеры на температуру анодного нагрева в водных электролитах, *Инженер*. Донецк: ДонНТУ, 2006, № 7, с. 41.
85. Куликов, И.С., Ващенко, С.В., Каменев, А.Я., *Электролитно-плазменная обработка материалов*. Минск: Беларус. навука, 2010. 232 с. <https://avidreaders.ru/book/elektrolitno-plazmennaya-obrabotka-materialov.html>
86. Воленко, А.П., Бойченко, О.В., Чиркунова, Н.В., Внедрение технологии электролитно-плазменного полирования металлических изделий, *Вектор науки Тольяттинского госуд. ун-ва*, 2016, № 1, с. 11. <http://dx.doi.org/10.18323/2073-5073-2016-1-11-16>
87. Одинцов, Л.Г., Куценко, А.К., Зеликов, Э.Т., Дзегиленок, В.Н., и др., *Автоматизированный комплекс электроимпульсного полирования деталей*, РФ пат. 2049163, 1995. 7 с. https://yandex.ru/patents/doc/RU2049163C1_19951127
88. Синькевич, Ю.В., Бирич, А.В., Бирич, В.В., *Устройство для электроимпульсного полирования поверхностей изделия из токопроводящего материала*, Респ. Беларусь пат. 18112, 2014. <https://rep.bntu.by/handle/data/58522>
89. Клубович, В.В., Паршутто, А.Э., Томило, В.А., Клушин, В.А., и др., *Устройство для электрофизической обработки поверхности изделий из токопроводящего материала*, Респ. Беларусь пат. 2640 U, 2006. <https://rep.bntu.by/handle/data/59999>
90. Смыслов, А.М., Смыслова, М.К., Мингажев, А.Д., Селиванов, К.С., и др., *Способ электролитно-плазменной обработки деталей*, РФ пат. 2355828, 2009. Бюл. № 14. 11 с. https://yandex.ru/patents/doc/RU2355828C2_20090520
91. Синькевич, Ю.В., Яновский, И.Н., Электроимпульсная полировка тепловыделяющих элементов, *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*, 2007, № 33, с. 259.
92. Синькевич, Ю.В., Комплексный подход к разработке технологического оборудования для электроимпульсного полирования, *Вестник Белорусского нац. техн. ун-ва*, 2009, № 6, с. 15.
93. Skakov, M., Rakhadilov, B., Scheffner, M., Karipbaeva, G., et al., Electrolyte plasma nitriding of high-speed steel, *Appl. Mech. Mater.*, 2013, vol. 379, p. 161. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.379.161>
94. Кревсун, Э.П., Ермаков, В.Л., Каменев, А.Я., Куликов, И.С., *Устройство для электролитно-плазменного полирования металлического изделия*, Респ. Беларусь пат. 13937, 2010. 4 с. <http://bypatents.com/4-13937-ustrojstvo-dlya-elektrolitno->

- [plazmennogo-polirovaniya-metallicheskogo-izdeliya.html](#)
95. Valiev, R.L., Khafizov, A.A., Shakirov, Y.I. and Sushchikova, A.N., Polishing and deburring of machine parts of glow discharge between solid and liquid electrodes, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2015, vol. 86, art. ID 012026. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/86/1/012026>
 96. Ясногородский, И.З., Артемов, В.И., Иванов, В.И. *Горячая штамповка на электрических машинах с нагревом в электролите*. М.: ЦИНТИАМ, 1963. 21 с.
 97. Ясногородский, И.З., *Экран для защиты деталей при нагреве в электролите*, СССР А.с. 267661, 1970. Бюл. № 13. 2 с. <https://patents.su/2-267661-ehkran-dlya-zashhity-detalejj-pri-nagreve-v-ehlektrolite.html>
 98. Ясногородский, И.З., *Устройство для нагрева в электролите рабочих поверхностей деталей, например катков и ведущих колес тракторов*, СССР А.с. 190930, 1967. Бюл. № 3. 2 с. <https://patents.su/2-190930-ustrojstvo-dlya-nagreva-v-ehlektrolite.html>
 99. Фоминов, А.Я., *Устройство для нагрева деталей в электролите*, СССР А.с. 254545, 1970. Бюл. № 32. 3 с. <https://patents.su/3-254545-ustrojstvo-dlya-nagreva-detalejj-v-ehlektrolite.html>
 100. Бабкин, Ю.А., Зейгерман, В.А., Экранирующее устройство для защиты деталей при нагреве в электролите, СССР А.с. 663731, 1979. Бюл. № 19. 2 с. <https://patents.su/2-663731-ehkraniruyushhee-ustrojstvo-dlya-zashhity-detalejj-pri-nagreve-v-ehlektrolite.html>
 101. Скаков М.К., Рахадиллов Б.К., Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру, фазовый состав и микротвердость стали Р6М5, *Вестник Казахского нац. технич. ун-ва*, 2012, № 3. <http://vestnik.kazntu.kz/files/newspapers/50/1547/1547.pdf>
 102. Komarov, A.O., Mukhacheva, T.L., Dyakov, I.G. and Belkin, P.N., Influence of hydrodynamical peculiarities of electrolyte flows on temperature of cylindrical workpiece by plasma electrolysis, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2012, vol. 48, no. 2, p. 141. <http://dx.doi.org/10.3103/S1068375512020081>
 103. Дьяков, И.Г., Азарян, Н.С., Мухачева, Т.Л., Влияние радиального обтекания анода электролитом на характеристики его нагрева, *Вестник Воронежского госуд. технич. ун-ва*, 2004, т. 7, № 4, с. 151.
 104. Комаров, А.О., Мухачева, Т.Л., Белкин, П.Н., *Устройство электролитного нагрева металлических изделий*, РФ пат. 124682, 2013. Бюл. № 4. 4 с. https://yandex.ru/patents/doc/RU124682U1_20130210
 105. Белкин, П.Н., Кусманов, С.А., Смирнов, А.А., *Устройство электролитного нагрева металлических изделий*, РФ пат. 164083, 2016. Бюл. № 23. 14 с. https://yandex.ru/patents/doc/RU164083U1_20160820
 106. Нисс, В.С., Кособуцкий, А.А., Минченя, В.Т., Алексеев, Ю.Г., и др., *Устройство для электролитно-плазменной обработки длинномерного изделия*, Респ. Беларусь пат. 15881, 2012. <https://bypatents.com/4-15881-ustrojstvo-dlya-ehlektrolitno-plazmennoj-obrabotki-dlinnomernogo-izdeliya.html>
 107. Мурас, В.С., Северденко, В.П., *Устройство для электролитного нагрева электропроводных изделий*. СССР А.с. 457742, 1975. Бюл. № 3. 3 с. <https://patents.su/3-457742-ustrojstvo-dya-ehlektrolitnogo-nagreva-ehlektroprovodnykh-izdelijj.html>
 108. Белкин, П.Н., Товарков, А.К., Пасинковский, Е.А., Миняев, В.А., и др., Локальное упрочнение зубьев пильных цепей электролитной нитрозакалкой, *ЭОМ*, 1988, № 3, с. 79.
 109. Белкин П.Н., Товарков А.К., Упрочнение деталей транспортера нитрозакалкой при электролитном нагреве, *ЭОМ*, 1986, № 6, с. 77.
 110. Бетин С.Г., Долговечность цепей навозоборочных транспортеров, *Механизация и электрификация сельского хозяйства*, 1982, № 7, с. 27.
 111. Кревсун, Э.П., Куликов, И.С., Нагула, П.К., *Устройство для электролитно-плазменной обработки токопроводящего изделия*, Респ. Беларусь пат. 16063, 2012. <https://bypatents.com/4-16063-ustrojstvo-dlya-ehlektrolitno-plazmennoj-obrabotki-tokoprovodyashhego-izdeliya.html>
 112. Зарубин, Д.А., *Способ струйного электролитно-плазменного полирования металлических изделий сложного профиля и устройство для его реализации*, РФ пат. 2640213, 2017. Бюл. № 36. 10 с. https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002640213_2_0171227_C1_RU/
 113. Ушомирская, Л.А., Герасимов, А.С., Технологические возможности применения струйного течения электролита при электролитно-плазменном полировании, *Металлообработка*, 2015, № 4(88), с. 25.
 114. Ушомирская, Л.А., Новиков, В.И., Полирование легированных сталей в нетоксичных электролитах при высоком напряжении, *Металлообработка*, 2008, № 1(43), с. 22.
 115. Попов, А.И., Радкевич, М.М., Кудрявцев, В.Н., Захаров, С.В. и др., *Установка для электролитно-плазменной обработки турбинных лопаток*, РФ пат. 2623555, 2017. Бюл. № 18. 9 с. https://yandex.ru/patents/doc/RU2623555C1_20170627
 116. Станишевский, В.К., Кособуцкий, А.А., Тапунов, Н.Я., Владюк, В.Е., и др., *Устройство для электролитно-плазменной обработки изделий сложной формы*, СССР пат. 1659534, 1991. Бюл. № 24. 4 с. <https://patents.su/4-1659534-ustrojstvo-dlya-ehlektrolitno-plazmennoj-obrabotki-izdelijj-slozhnoj-formy.html>
 117. Володин, А.Ю., Технологические особенности электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей корпусов ТНА ЖРД, *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2017, т. 1, № 13, с. 129.

118. Попов, А.И., Тюхняев, М.И., Радкевич, М.М., Новиков, В.И., и др., Технология струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки, *Современное машиностроение. Наука и образование*, 2016, № 5, с. 1160.
119. Петрович, В.С., Теплухин, В.Г., Новоселов, М.В., Попов, А.И., *Применение струйной электролитно-плазменной обработки для изготовления металлографических образцов. Инновационные идеи в машиностроении*. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. с. 591.
120. Синкевич, Ю.В., Шелег, В.К., Янковский, И.Н., Беляев, Г.Я., *Электроимпульсное полирование сплавов на основе железа, хрома и никеля*. Минск: БНТУ, 2014. 324 с. <https://rep.bntu.by/handle/data/10963>
121. Алексеев, Ю.Г., Королев, А.Ю., Нисс, В.С., Паршута, А.Э., и др., Источник питания для исследования импульсных электрохимических процессов, *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*, 2018, т. 61, № 3, с. 246.
122. Inoue, K. *Method of electrolytic heating*. Japan Patent 970, issued January 13, 1970.
123. Рыбалко, А.В., Галанин, С.И., Хамурарь, В.И., Белкин, П.Н., и др., *Способ электролитного нагрева*, СССР А.с. 1349012, 1986. Бюл. № 40. 4 с. <https://patents.su/4-1349012-sposob-ehlektrolitnogo-nagreva.html>
124. Ясногородский, Я.З., Лян, С.Ш., Гунер, В.И., *Устройство для нагрева деталей в электролите*, СССР А.с. 427065, 1974. Бюл. № 17. 2 с. <https://patents.su/2-427065-ustrojstvo-dlya-nagreva-detalejj-v-ehlektrolite.html>
125. Кузнецов, В.В., *Устройство для нагрева деталей в электролите*, СССР А.с. 968081, 1980. Бюл. № 39. 3 с. <https://patents.su/3-968081-ustrojstvo-dlya-nagreva-detalejj-v-ehlektrolite.html>
126. Ясногородский, Я.З., *Устройство для поверхностной закалки деталей*, СССР А.с. 765380, 1980. Бюл. № 35. 3 с. <https://patents.su/3-765380-ustrojstvo-dlya-poverkhnostnoj-zakalki-detalejj.html>
127. Гунер, В.И., Ясногородский, Я.З., Илюхина, З.Г., Губер, И.С., *Установка для закалки в электролите деталей*, СССР А.с. 675079, 1979. Бюл. № 27. 4 с. <https://patents.su/4-675079-ustanovka-dlya-zakalki-v-ehlektrolite-detalejj.html>
128. Ясногородский, Я.З., Гунер, В.И., Губер, И.С., Ветошкин, Г.Г., и др., *Установка для поверхностного упрочнения*, СССР А.с. 310942, 1971. Бюл. № 24. 2 с. <https://patents.su/2-310942-ustanovka-dlya-poverkhnostnogo-uprochneniya.html>
129. Фоминов, А.Я., Анагорский, Л.А., *Установка для нагрева заготовок в электролите*, СССР А.с. 133481, 1960. 3 с. <https://patents.su/3-133481-ustanovka-dlya-nagreva-zagotovok-v-ehlektrolite.html>
130. Фоминов, А.Я., *Установка для нагрева заготовки под слоем электролита*, СССР А.с. 282380, 1970. Бюл. № 30. 4 с. <https://patents.su/4-282380-ustanovka-dlya-nagreva-zagotovki-pod-sloem-ehlektrolita.html>
131. Ясногородский, И.З., Гунер, В.И., Ветошкин, Г.Г., Лян, С.Ш., и др., *Механизм безокислительного электролитного нагрева заготовок*, СССР А.с. 373312, 1973. Бюл. № 14. 3 с. <https://patents.su/3-373312-mekhanizm-bezokislitel'nogo-ehlektrolitnogo-nagreva-zagotovok.html>
132. Бабкин, Ю.А., Рейншторм, Е.А., Ясногородский, М.Е.-Х., *Установка для местного нагрева концов заготовок в электролите*, СССР А.с. 553296, 1977. Бюл. № 13. 3 с. <https://patents.su/3-553296-ustanovka-dlya-mestnogo-nagreva-koncov-zagotovok-v-ehlektrolite.html>
133. Фоминов, А.Я., *Установка для местного нагрева стержней в электролите*, СССР А.с. 511355, 1976. Бюл. № 15. 6 с. <https://patents.su/6-511355-ustanovka-dlya-mestnogo-nagreva-sterzhnej-v-ehlektrolite.html>
134. Ясногородский, Я.З., Гунер, В.И., Лян, С.Ш., Губер, И.С., *Устройство для закалки изделий*, СССР А.с. 501085, 1976. Бюл. № 4. 3 с. <https://patents.su/3-501085-ustrojstvo-dlya-zakalki-izdelij.html>

Summary

The proposed review presents the results of the analysis of the equipment and technological methods for implementing the plasma electrolytic chemical-thermal treatment and plasma electrolytic polishing. A group of methods based on the immersion of workpieces in an electrolyzer was considered, as well as a method of a local treatment by the jet feed of an electrolyte to the area of the surface being treated. The influence of the design and characteristics of the electrolyzer, the power source and the system for feeding the workpiece into the electrolyte on the specifics of plasma electrolytic treatment methods is shown. Technological methods improving the quality and productivity of treatment are considered. Limitations in the applicability of the existing equipment were revealed, and the prospects for the improvement in the field of development of equipment and technologies for plasma electrolytic treatment were determined.

Keywords: plasma electrolytic treatment, chemical-thermal treatment, plasma electrolytic polishing, jet treatment, equipment