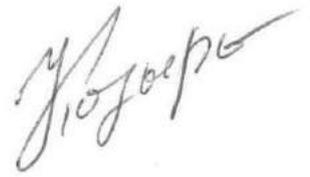


На правах рукописи



КОЗЫРЬ Денис Владимирович

ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПРОВОДЯЩИХ ЛАЗЕРНЫХ КАНАЛОВ

Специальность: 05.02.07 - Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»

Научный руководитель: Любимов Виктор Васильевич
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: Борисов Анатолий Михайлович
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «МАТИ – Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского», г. Москва, профессор кафедры «ТОМПВЭ»,

Варев Геннадий Александрович
кандидат технических наук,
ООО «Русский инженерный клуб», г. Тула,
технический директор.

Ведущее предприятие: ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет».

Защита диссертации состоится «24» декабря 2014 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.01 при ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, просп. Ленина, 92, 9-й корп., ауд. 101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» <http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/kozir-dv/>.

Автореферат разослан «06» ноября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Черняев Алексей
Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований

В настоящее время электроэрозионная обработка (ЭЭО) является одним из самых распространенных методов электрофизической обработки, что обусловлено достоинствами – высокой точностью обработки, низкой шероховатостью обработанных поверхностей, малой зависимостью производительности от механических свойств обрабатываемого материала. Однако одним из основных сдерживающих факторов дальнейшего развития ЭЭО является применение твердотельных электродов-инструментов. Твердотельные электроды-инструменты подвержены износу и деформации, имеют ограничения по минимальным и максимальным размерам, токовой нагрузке. Это приводит к снижению точности и качества обработки, повышает ее стоимость. Устранить названные недостатки можно путем замены твердотельных электродов-инструментов на нетвердотельные. В качестве электродов-инструментов могут быть использованы плазменные каналы, полученные в результате оптического пробоя. Они обладают высокой электропроводностью и геометрической определенностью, могут быть сформированы с большим отношением длины к диаметру. Таким образом, исследование процесса электроэрозионной обработки с использованием проводящих лазерных каналов является **актуальной** задачей.

Цель работы

Целью работы является совершенствование технологических схем электроэрозионной обработки путем использования в качестве электродов-инструментов проводящих лазерных каналов, полученных в результате оптического пробоя.

Достижение указанной цели потребовало решения следующих задач.

1. Обосновать область применения проводящих лазерных каналов, полученных в результате оптического пробоя, в электрофизических методах обработки.
2. Провести теоретические исследования процесса электроэрозионной обработки с использованием проводящих лазерных каналов для получения информации об основных физических процессах, происходящих в зоне обработки.
3. Разработать технологические схемы электроэрозионной обработки, позволяющие применять проводящие лазерные каналы в качестве электродов-инструментов.
4. Разработать экспериментальное оборудование для исследования процесса электроэрозионной обработки с использованием проводящих лазерных каналов.
5. Провести экспериментальные исследования свойств проводящих лазерных каналов как инструментов в электроэрозионной обработке и единичных актов эрозии.
6. Провести экспериментальные исследования электроэрозионного формообразования с использованием проводящих лазерных каналов.

Объект исследования: электроэрозионная обработка с использованием нетвердотельных электродов-инструментов.

Предмет исследования: процесс электроэрозионной обработки с использованием в качестве электродов-инструментов проводящих лазерных каналов, полученных в результате оптического пробоя.

Методы исследования

Теоретические исследования проводились с использованием основных положений теплопроводности, теории электрических цепей и математического моделирования. При проведении экспериментальных исследований использовалась разработанная и изготовленная установка ЭУ-1, а также современная измерительная и регистрирующая аппаратура (сканирующий зондовый микроскоп Solver PRO P47H, профилограф – профилометр Surf Corder 1400a, лазерный сканирующий микроскоп Keyence VK-9700, микротвердомер – микроскоп Zwickr-Roell ZHμ и др.).

Положения, выносимые на защиту

1. Модель, связывающая технологические параметры процесса электроэрозионной обработки с использованием проводящих лазерных каналов с параметрами проводящих лазерных каналов и электрических импульсов.

2. Технологические схемы электроэрозионной обработки, обеспечивающие возможность обработки с использованием проводящих лазерных каналов в качестве электродов-инструментов.

3. Результаты экспериментальных исследований влияния технологических параметров процесса ЭЭО с использованием проводящих лазерных каналов (энергия электрических импульсов, тип рабочей жидкости, материал заготовки) на погрешность, производительность обработки и качество обработанной поверхности.

Научная новизна заключается в обосновании энергетических условий функционирования схем электроэрозионной обработки с двумя плазменными каналами, один из которых является проводящим лазерным каналом с переменными геометрическими и электрическими параметрами, а другой – каналом электрического разряда.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1) На основании проведенных исследований разработаны технологические рекомендации для осуществления ЭЭО с использованием проводящих лазерных каналов;

2) Разработана и изготовлена экспериментальная установка для осуществления ЭЭО с использованием проводящих лазерных каналов.

Теоретическая значимость работы состоит в обосновании рациональных режимов ЭЭО с использованием проводящих лазерных каналов на основе решения задачи теплопроводности с нестационарным тепловым потоком на поверхности заготовки, зависящим от свойств проводящих лазерных каналов.

Реализация работы

Отдельные результаты исследований использованы в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению 150700 «Машиностроение» и включены в разделы лекционных курсов дисциплин «Технология и методы обработки концентрированными потоками энергии», «Технология физико-химической обработки металлических и неметаллических материалов», «Физико-химические методы микро- и нанообработки», применяются при выполнении курсовых и дипломных проектов на кафедре «Электро и нанотехнологии» ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет».

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на региональной Всероссийской научно-технической конференции «Высокие, критические, электро- и нанотехнологии» (Тула, ТулГУ, 2011-2013 г.), на конференциях профессорско-преподавательского состава ТулГУ (2011 – 2013 гг.), на международных заочных научных конференциях «Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы» (Саратов, БМА СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2012, 2014 гг.).

Публикации.

По результатам исследований опубликовано 13 статей, в том числе 3 – в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных журналов ВАК. Общий объем публикаций 4,3 п.л.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, списка используемой литературы из 148 наименований; общий объем – 163 страницы машинописного текста, включая 84 рисунков и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы актуальность решаемой задачи, ее практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ современного состояния электроэрозионной обработки. Установлено, что существенное влияние на показатели ЭЭО обработки оказывают свойства электродов-инструментов. Износ электрода-инструмента снижает точность обработки, пределы по электрическим нагрузкам сдерживают повышение производительности, ограничения механических нагрузок и малая жесткость инструмента также оказывают влияние на точность и качество обработки. Ограничения, накладываемые на ЭЭО применением твердотельных электродов-инструментов, принципиально не устранимы. Возможно лишь их частичная компенсация за счет ухудшения других параметров обработки. Сделан вывод о том, что для устранения названных ограничений необходимо использование принципиально других, нетвердотельных инструментов. Было предложено использовать в качестве электродов-инструментов плазменные каналы, полученные в результате оптического пробоя различных сред лазерным излучением. Плазменные каналы, полученные при помощи оптического пробоя, характеризуются высокой электропроводностью. Они могут иметь диаметр менее 20 мкм и протяженность десятки и сотни миллиметров. Для обозначения плазменных каналов оптического пробоя, используемых в качестве электрода-инструмента в ЭЭО, введено понятие «проводящий лазерный канал» (ПЛК). Введение такого понятия обусловлено тем, что плазменные каналы, используемые в качестве электрода-инструмента, должны обладать рядом параметров – высокой электропроводностью, сплошной структурой, возможность введения электрической энергии и осуществления электрообработки. Сделан вывод об актуальности исследования электроэрозионной обработки с использованием проводящих лазерных каналов. Сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию процесса электроэрозионной обработки с использованием ПЛК. Электроэрозионная обработка с использованием ПЛК представляет собой сложный процесс, включающий в себя различные физические явления. В настоящей работе были рассмотрены явления, имеющие место в зоне обработки в период действия электрического разряда. На рис.1 изображена схема обработки в названный период времени.

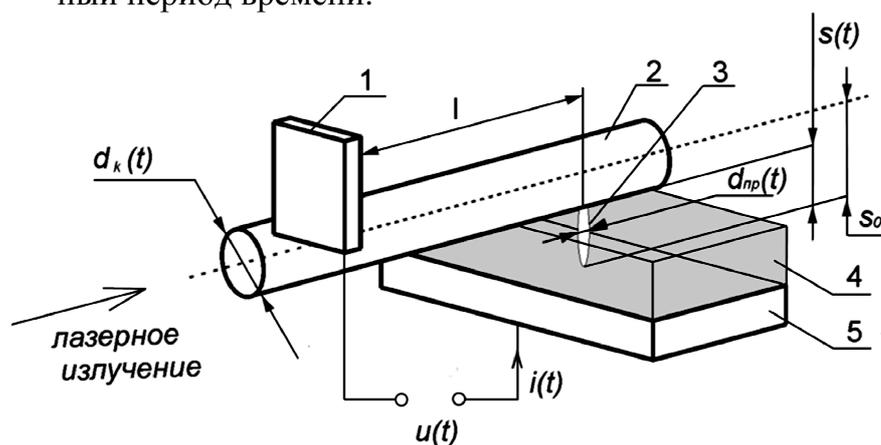


Рис. 1. Схема электроэрозионной обработки с использованием ПЛК:

1 – токоподвод, 2 – ПЛК, 3 – электрический разряд, 4 – рабочая жидкость, 5 – заготовка; $d_k(t)$ – диаметр ПЛК, l – расстояние между токоподводом и местом электрического разряда, $s(t)$ – межэлектродный зазор (МЭЗ), $i(t)$ – ток, $u(t)$ – напряжение, $d_{np}(t)$ – диаметр канала электрического разряда, s_0 – расстояние между оптической осью и заготовкой

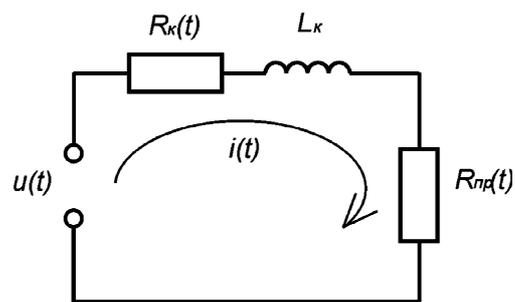


Рис. 2. Эквивалентная электрическая принципиальная схема рабочей ячейки:

$R_k(t)$ – сопротивление проводящего лазерного канала, $R_{np}(t)$ – сопротивление канала электрического разряда, L_k – индуктивность проводящего лазерного канала, $i(t)$ – ток в цепи, $u(t)$ – напряжение на генераторе импульсов

ПЛК сформирован на расстоянии МЭЗ s от заготовки. Распределение энергии в цепи электроэрозионной ячейки при ЭЭО с использованием ПЛК отличается от распределения при ЭЭО с использованием твердотельных электродов-инструментов. Эквивалентная электрическая схема электроэрозионной ячейки представлена на рис. 2. Сопротивление R_k и диаметр d_{np} ПЛК являются переменными. Изменение диаметра ПЛК приводит к изменению МЭЗ. В электрической цепи рабочей ячейки присутствуют два изменяющихся во времени сопротивления $R_k(t)$, $R_{np}(t)$ и индуктивность L_k . Ток в цепи электроэрозионной ячейки был найден из дифференциального уравнения $di(t)/dt = (u(t) - i(t) \cdot (R_k(t) + R_{np}(t))) / L_k$ с нестационарными коэффициентами

$$R_k(t) = l / (\sigma_k(t) \cdot \pi \cdot (d_k(t) / 2)^2), R_{np}(t) = s(t) / (\sigma_n \pi R^2(t)), \quad s(t) = s_0 - r_k(t),$$

$$R(t) = 0,788 \cdot t^{0.75}, \quad \text{что позволило найти энергию } E_a = \eta \int_0^{t_{раз}} R_{np}(t) \cdot i^2(t) dt \text{ и мощность}$$

$W_a(t) = \eta \cdot R_{np}(t) \cdot i^2(t)$, выделяющуюся на заготовке. Здесь η – коэффициент, учитывающий часть энергии, направленной на нагрев анода; $\sigma_k(t)$ – электропроводность проводящего лазерного канала; σ_n – электропроводность плазмы; $R(t)$ – радиус канала электрического разряда; t_p – длительность электрического импульса.

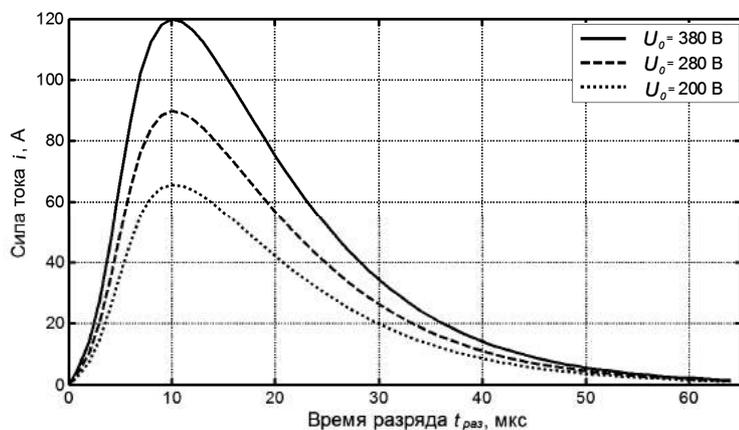


Рис. 3. Изменения силы тока в цепи электроэрозионной ячейки в период действия электрического разряда, для амплитудных значений напряжения U_0 : 200, 280, 380 В

Получены зависимости силы тока в разрядной цепи от амплитуды электрических импульсов (рис. 3) при использовании в качестве генератора импульсов RC-генератора с длительностью импульсов 65 мкс. Максимальные значения сила тока достигает через 10...12 мкс после начала импульса, к 50...60 мкс сила тока в цепи падает практически до нулевых значений. Найдены зависимости величины энергии, выделяющейся на заготовке, от длины ПЛК l и задержки между началом формирования ПЛК и электрическим импульсом b (рис. 4). С увеличением длины ПЛК l происходит пропорциональное снижение энергии для импульсов всех амплитуд напряжений (рис.4). Таким образом, для эффективного расходования энергии необходимо минимизировать расстояние между токоподводом и местом обработки. Задержка между началом формирования ПЛК и электрическим импульсом определяет состояние ПЛК (его геометрические и электрически параметры) в момент электрического пробоя. На основании зависимостей (рис. 4) сделан вывод о том, что для уменьшения энергетических потерь время за-

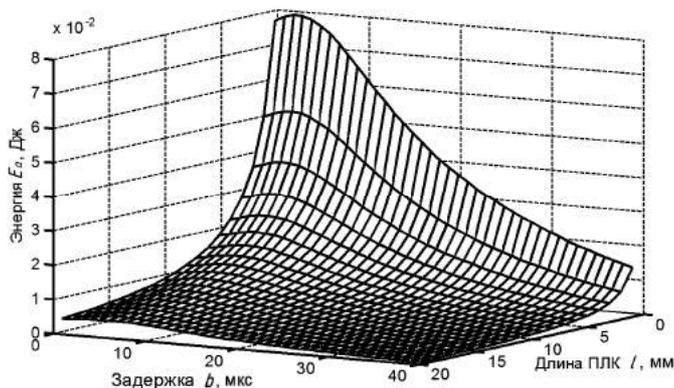


Рис. 4. Зависимость энергии, выделяющейся на заготовке, от длины ПЛК l и задержки между началом формирования ПЛК и электрическим разрядом b

для уменьшения энергетических потерь время за-

держки между началом формирования ПЛК и электрическим импульсом должно быть от 0 до 5 мкс. Зависимости мощности, выделяющейся на заготовке, от времени и амплитуды электрических импульсов даны на рис. 5.

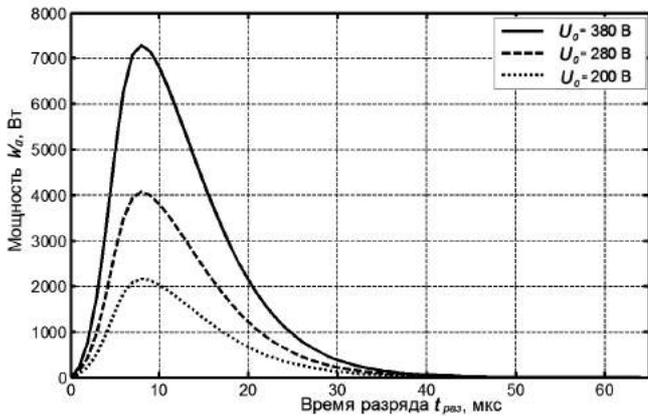


Рис. 5. Зависимости мощности, выделяющейся на заготовке, от времени и амплитуды электрических разрядов U_0

Затем происходит постепенное уменьшение выделяющейся мощности, и после 40 мкс мощность на заготовке практически не выделяется. При повышении амплитуды электрических импульсов в два раза мощность, выделяющаяся на заготовке, возрастает в 3,3...3,5 раза.

Распределение мощности, выделяющейся на заготовке, позволило определить величину теплового потока, приходящего на ее поверхность $q(r, t) = W_a(t) / (\pi R^2(t) \exp(-r^2 / R(t)^2))$, где r - координата, описывающая расстояние от центра канала электрического разряда (рис. 6). В месте контакта канала разряда с заготовкой создается поверхностный источник тепла. Предполагается осевая симметрия относительно оси z интенсивности теплового потока, создаваемого каналом разряда, и параметры детали не изменяются во всем объеме. От трехмерной задачи теплопроводности можно перейти к двухмерной, рассмотрев перенос тепла в плоскости сечения заготовки (рис. 6). Граничные условия: граница 1 – место контакта канала электрического разряда с поверхностью заготовки: $0 \leq r \leq R(t), z = Z_y: \lambda \cdot \partial T(r, z, t) / \partial z = q(r, t)$, на остальной поверхности заготовки происходит теплообмен с рабочей жидкостью: $R(t) \leq r \leq Z_x, z = Z_y: \lambda \cdot \partial T(r, z, t) / \partial z = a(T_g - T(r, z, t))$, где a – коэффициент теплообмена материала заготовки с рабочей жидкостью; граница 2 – теплообмен с воздухом на боковой поверхности: $r = Z_x, 0 < z < Z_y: \lambda \cdot \partial T(r, z, t) / \partial r = k(T_v - T(r, z, t))$, где k – коэффициент теплообмена материала заготовки с воздухом; граница 3 – теплообмен с воздухом на тыльной стороне заготовки: $0 \leq r \leq Z_x, z = 0: -\lambda \cdot \partial T(r, z, t) / \partial z = k(T_v - T(r, z, t))$; граница 4 – условие симметрии на оси $z, r = 0, 0 < z < Z_y: \lambda \cdot \partial T(r, z, t) / \partial r = 0$. Были построены изотермы в объеме заготовки на основе данных о распределении температурного поля после окончания электрического импульса (рис. 7). Изотермы температуры плавления позволяют судить о форме и геометрических размерах лунок. Лунки в результате электроэрозионной обработки с использованием ПЛК имеют форму шарового сегмента, глубина и диаметр которого зависят от материала заготовки. Распространение тепла в глубь заготовки в непосредственной близости от образованной лунки определяет глубину слоя материала, подвергшегося тепловому воздействию. Для стали и титанового сплава величина слоя, подвергшегося тепловому воздействию, составляет 15...20 мкм, для алюминиевого сплава – 100...120 мкм.

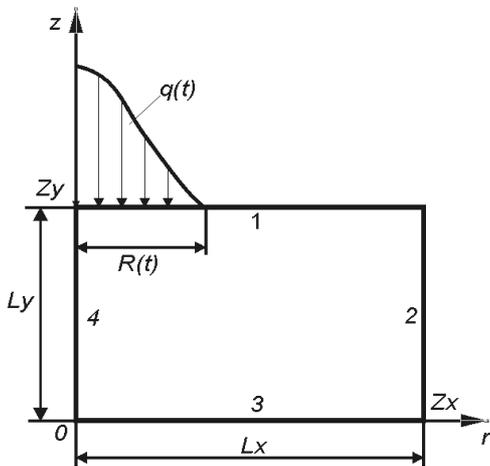


Рис. 6. Схема моделирования теплопереноса в объеме заготовки

Были построены изотермы в объеме заготовки на основе данных о распределении температурного поля после окончания электрического импульса (рис. 7). Изотермы

температуры плавления позволяют судить о форме и геометрических размерах лунок. Лунки в результате электроэрозионной обработки с использованием ПЛК имеют форму шарового сегмента, глубина и диаметр которого зависят от материала заготовки. Распространение тепла в глубь заготовки в непосредственной близости от образованной лунки определяет глубину слоя материала, подвергшегося тепловому воздействию. Для стали и титанового сплава величина слоя, подвергшегося тепловому воздействию, составляет 15...20 мкм, для алюминиевого сплава – 100...120 мкм.

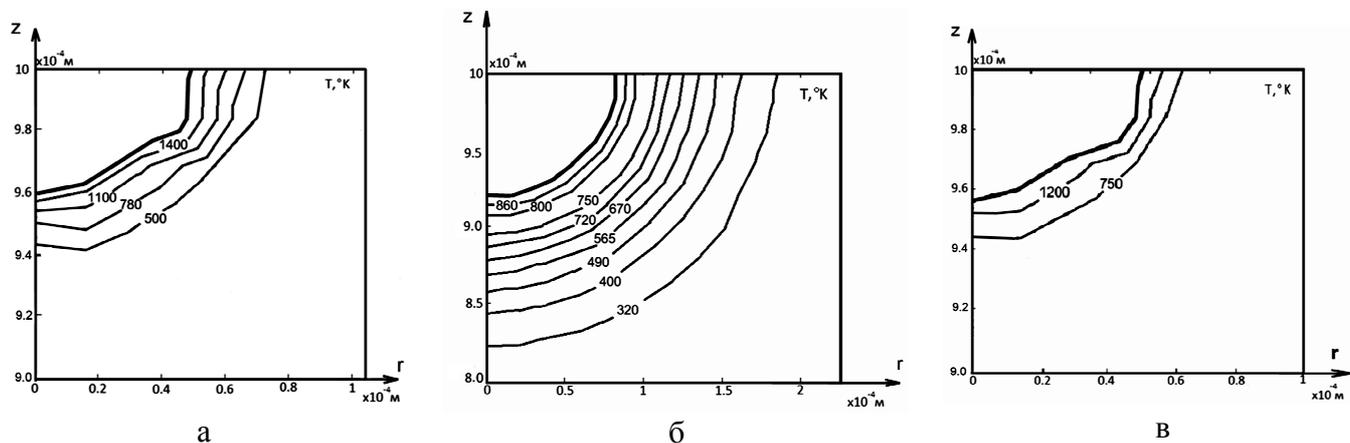


Рис. 7. Изотермы в плоскости сечения заготовки после окончания электрического импульса. Материал заготовки: а - 12X18H10T, б - АК-4, в - ВТ-14.

Получены зависимости глубины и диаметра лунок от амплитуды электрических импульсов и обрабатываемого материала (рис. 8).

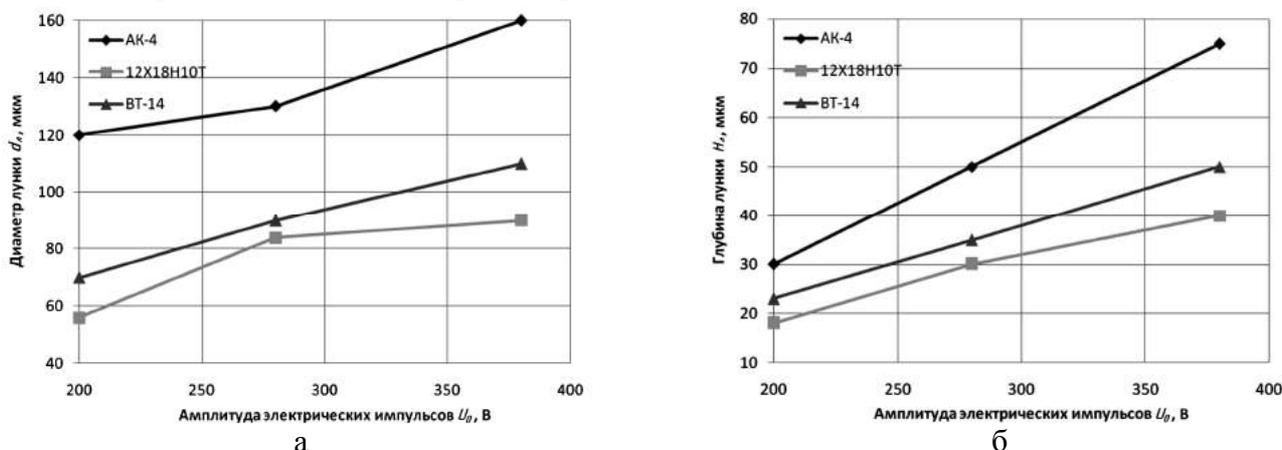


Рис. 8. Зависимости диаметра – (а) и глубины – (б) электроэрозионных лунок от амплитуды электрических импульсов и материала заготовки

Для всех исследованных материалов размеры лунок возрастают по мере увеличения амплитуды электрического импульса. Наибольшие размеры лунок зафиксированы для образца из алюминиевого сплава АК-4, наименьшие размеры – для заготовок из стали 12X18H10T.

Третья глава посвящена разработке технологических схем электроэрозионной обработки с использованием проводящих лазерных каналов и созданию экспериментального оборудования для исследования названного процесса. Были предложены схемы обработки, состоящие из схем вырезания (рис. 9, а, б, в, г), модифицирования поверхностей (рис. 9, д) и точения (рис. 9, е). Спроектирована и изготовлена экспериментальная установка для исследования процесса электроэрозионной обработки с использованием проводящих лазерных каналов (рис. 10). Работа экспериментальной установки осуществляется следующим образом. Лазерное излучение выходит из апертуры излучателя 6, преломляется призмой 5 и фокусируется линзой 4. Сфокусированное излучение поступает в рабочую ячейку 3, где происходит оптический пробой и формируется ПЛК. В рабочей ячейке закреплена обрабатываемая заготовка. Позиционирование заготовки относительно ПЛК происходит посредством координатного стола 2, управляемого контроллером 10, который соединен с персональным компьютером 7.

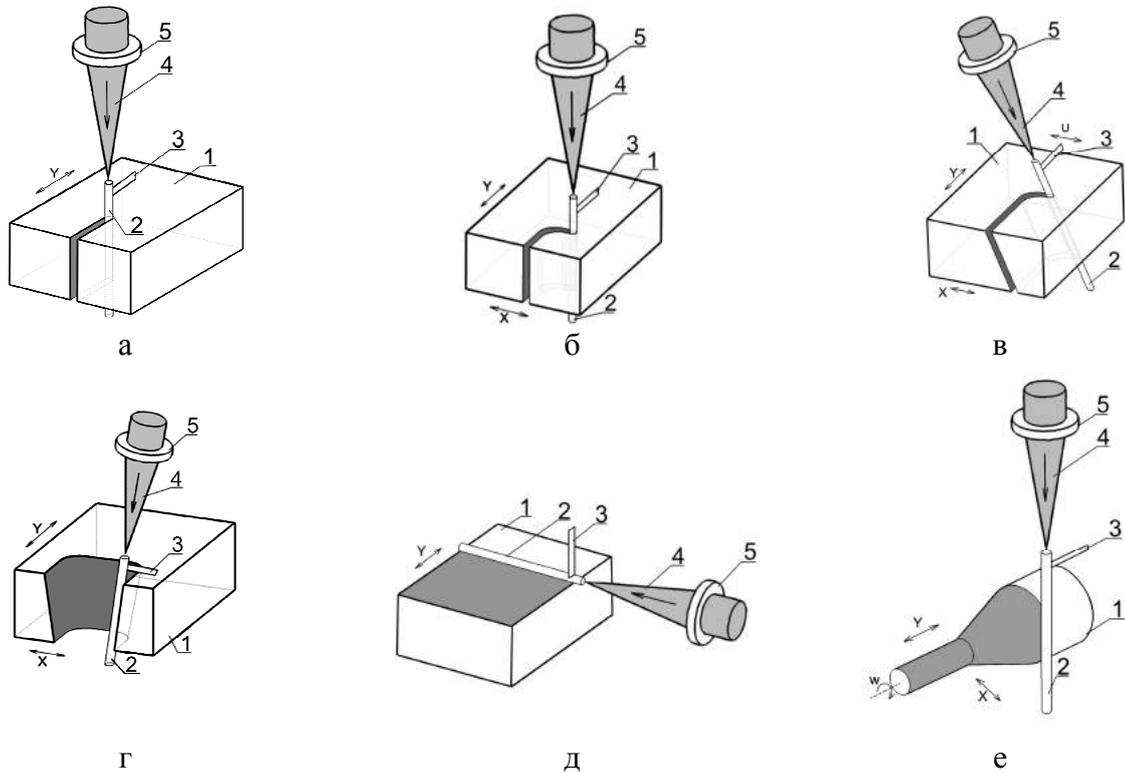


Рис. 9. Схемы обработки с использованием проводящих лазерных каналов:
 1 – заготовка; 2 – проводящий лазерный канал; а, б, в, г – схемы вырезания; д – схема модифицирования поверхности; е – схема точения

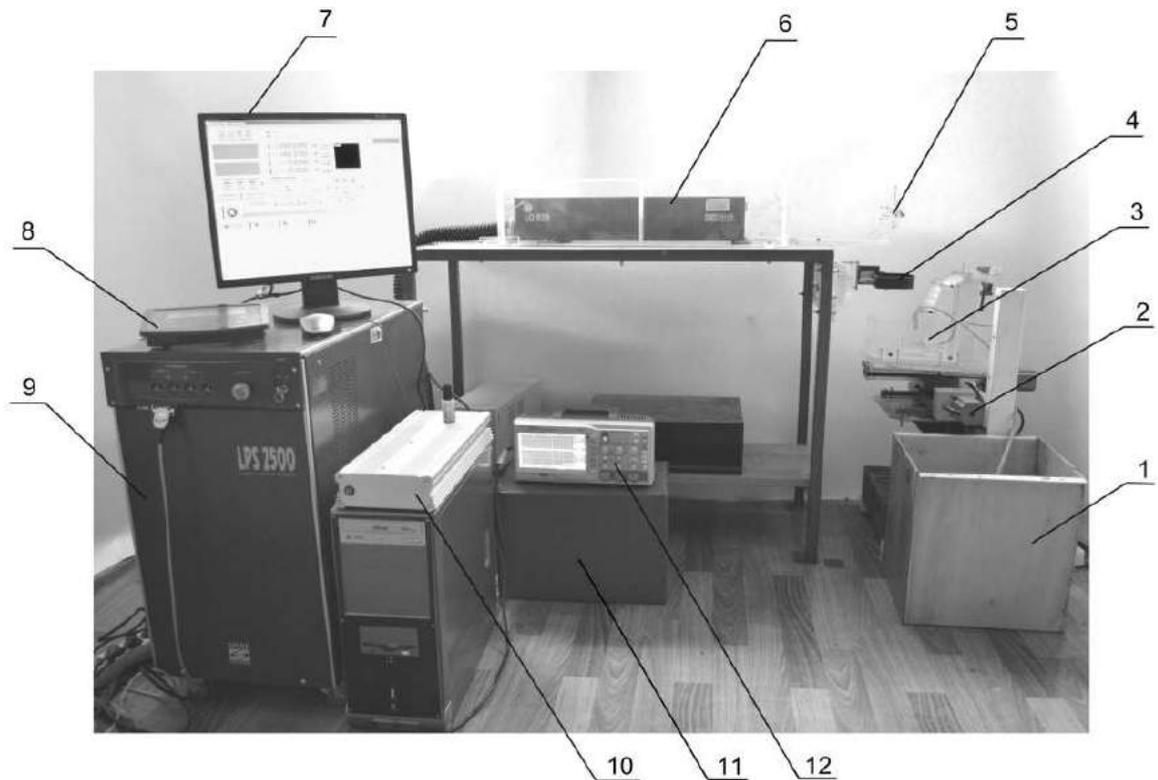


Рис. 10. Экспериментальная установка ЭУ-1 для исследования процесса ЭЗО с использованием проводящих лазерных каналов: 1 – система подачи рабочей жидкости; 2 – система позиционирования; 3 –рабочая ячейка; 4 – фокусирующая линза; 5 – призма; 6 – излучатель; 7 – управляющий компьютер; 8 – пульт управления лазера; 9 – блок питания лазера; 10 – контроллер двухкоординатного стола; 11 – генератор электрических импульсов; 12 – осциллограф

Рабочая жидкость поступает в рабочую ячейку из резервуара системы подачи рабочей жидкости 1. Электрические импульсы формируются генератором электрических импульсов 11. Регистрация электрических импульсов в цепи рабочей ячейки осуществляется осциллографом 12, электропитание и управление лазерным излучателем – с помощью источника питания лазера 9 и пульта управления 8.

В работе в качестве источника излучения применялся импульсный Nd:YAG лазер LQ929, генерирующий лазерные импульсы длительностью 10 нс и энергией 1,5 Дж. Длина волны излучения 1,064 мкм. В качестве генератора импульсов использовался RC-генератор. Амплитуда электрических импульсов от 200 до 380 В. Все экспериментальные исследования были проведены на разработанной экспериментальной установке.

В **четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований свойств ПЛК как инструментов в электроэрозионной обработке и единичных актов электроэрозии с использованием ПЛК.

Геометрические свойства ПЛК исследовались при помощи полученных фотографий светящихся областей плазмы каналов (рис. 11). Для этой цели напротив рабочей ячейки был размещен фотоаппарат. Установлена взаимосвязь между формой и размерами проводящих лазерных каналов и типом и параметрами фокусирующих линз, средой, в которой происходит оптический пробой.

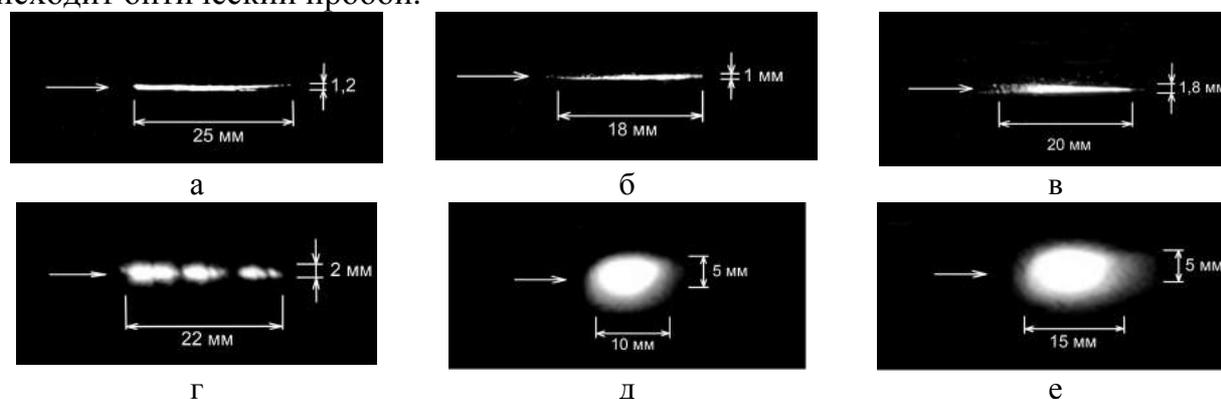


Рис. 11. Проводящие лазерные каналы линза: а, г – аксикон; б, д - сферическая линза с фокусным расстоянием 30 мм; в, е - сферическая линза с фокусным расстоянием 80 мм; среда: вода (а, б, в); масло (г, д, е)

Процесс формирования ПЛК в воде и в воздухе имеет существенные отличия. Вода имеет большую плотность, что препятствует расширению плазменных каналов, поэтому ПЛК, сформированные в воде, имеют большую длину, неразрывную структуру и меньший диаметр относительно каналов, полученных в воздухе.

При использовании короткофокусных линз плазменное образование имеет точечные размеры с большой концентрацией энергии. При увеличении фокусного расстояния протяженность ПЛК увеличивается, а концентрация энергии уменьшается. В связи с этим недостаток энергии лазерного излучения приводит к образованию канала с дробной структурой. Применение аксикона дает возможность получать ПЛК с большим отношением длины к диаметру. Однако при низкой энергии лазерного излучения применение сферической оптики предпочтительнее в связи с тем, что пробой происходит в ограниченной области и затем распространяется в пространстве, в результате чего канал имеет непрерывную структуру. При аксиконной фокусировке область пробоя растягивается и при недостаточной энергии канал имеет разрывы, которые приводят к нарушению электропроводности.

Установлен характер формирования электрических разрядов между ПЛК и твердотельным электродом (рис. 12). Полученные фотографии подтверждают предположение о возможности электрического пробоя между твердотельным электродом и нетвердотельным плазменным каналом, полученным в результате оптического пробоя. Формирование

плазменного канала сопровождается образованием ударной волны. Силы, действующие при этом, разрушают ПЛК. Такое явление представлено на (рис.12, б).

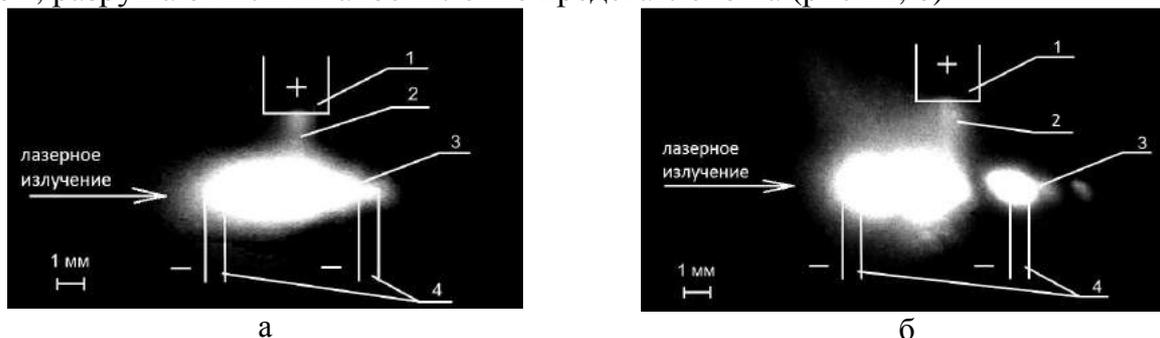


Рис. 12. Электрический разряд между заготовкой и ПЛК

1 – образец; 2 –электрический разряд; 3 – ПЛК; 4 – токоподвод

После формирования электрического разряда между образцом и ПЛК, последний теряет свою целостность и не может быть использован в качестве электрода-инструмента. Таким образом, частота следования электрических разрядов не может превышать частоту образования ПЛК.

Были проведены экспериментальные исследования формы и размеров лунок, полученных в результате электроэрозионной обработки с использованием ПЛК (таб. 1).

Таб. 1. Результаты измерений единичных лунок, полученных в результате электроэрозионной обработки с использованием ПЛК

| Материал | Оптический микроскоп | Лазерный сканирующий микроскоп | Профилограмма |
|-----------|----------------------|--------------------------------|---------------|
| АК-4 | | | |
| 12X18H10T | | | |
| ВТ-14 | | | |

Форма лунок может быть представлена окружностью с разной степенью приближения. Наименьшую степень отклонения от окружности имеют лунки, полученные на поверхности алюминия. Установлено, что наименьшее отклонение от окружности и более точный контур наблюдаются при использовании в качестве рабочей жидкости индустриального масла И20 по сравнению с деионизированной водой. Это связано с лучшей эвакуацией продуктов эрозии маслом. При использовании обратной полярности подключения электродов наблюдается полярный эффект, выраженный меньшим объемом удален-

ного материала и большим искажением формы полученных лунок относительно результатов, установленных при использовании прямой полярности.

На рис. 13 представлены зависимости среднего диаметра и средней глубины единичных лунок от энергии электрических импульсов при обработке в индустриальном масле И20. Максимальные размеры единичных лунок зафиксированы для заготовок из АК-4. При увеличении амплитуды напряжения от 200 до 280 В их глубина увеличивается более чем в два раза. При дальнейшем возрастании напряжения от 280 до 380 В глубина лунок увеличивается незначительно. Размеры единичных лунок, полученных на поверхности заготовок из ВТ-14, несколько больше лунок, полученных на заготовках из 12Х18Н10Т, что связано с лучшей эвакуацией расплавленного материала титанового сплава ВТ-14.

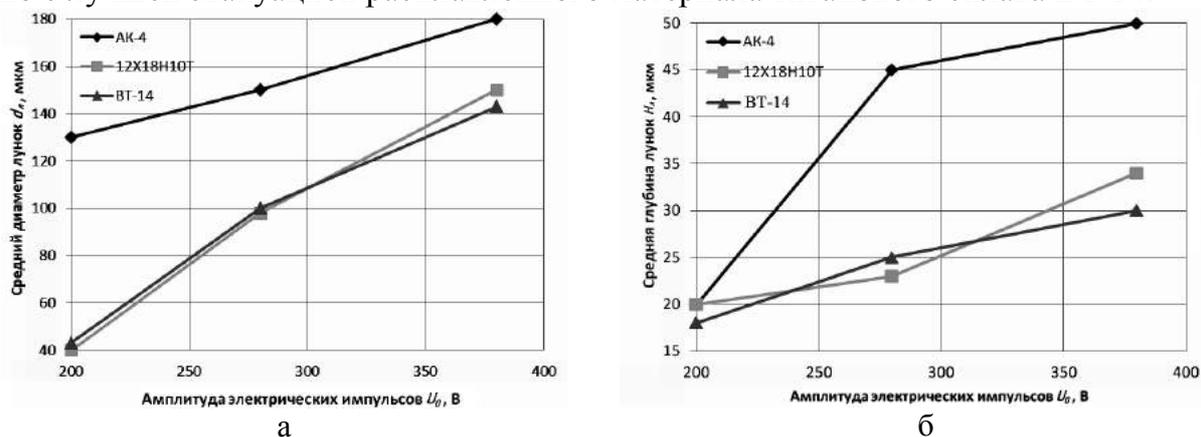


Рис. 13. Зависимости средних диаметров лунок от величины напряжения и материала заготовки.
Рабочая жидкость – масло

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований формообразования с использованием проводящих лазерных каналов. Было проведено исследование качества обработанных поверхностей, точности и производительности. Качество обработанных поверхностей оценивалось по шероховатости поверхности (R_a), микротвердости (HV) и глубине измененного слоя.

На рис. 14 представлены зависимости шероховатости поверхностей после электроэрозионной обработки с использованием ПЛК от материала заготовки, рабочей жидкости и амплитуды электрических импульсов. С повышением энергии импульсов шероховатость обработанных поверхностей для всех исследованных материалов и рабочих жидкостей повышается. Шероховатость поверхностей, обработанных в воде, незначительно выше шероховатости поверхностей, обработанных в масле.

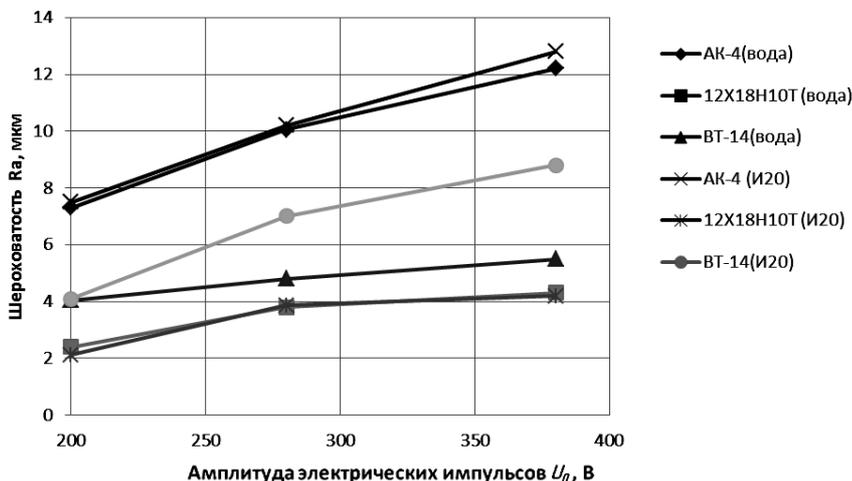


Рис. 14. Зависимости величины шероховатости обработанных поверхностей от амплитуды электрических импульсов, материала образцов, рабочей жидкости

Максимальная величина шероховатости зафиксирована при обработке алюминиевого сплава АК-4 и составила $R_a=13,8$ мкм. Минимальная шероховатость наблюдалась при обработке стали в масле И20 – $R_a=2,12$ мкм.

Получены зависимости микротвердости поверхностей от амплитуды электрических импульсов и материала заготовки (рис.15). Упрочнению подверглись заготовки из всех рассматриваемых материалов. Микротвердость образцов прямо пропорционально зависит от амплитуды электрических импульсов. Микротвердость поверхности образца из 12Х18Н10Т выросла 2,7 раза. Для образцов из титанового и алюминиевого сплавов рост микротвердости при увеличении энергии импульсов не столь значительный. Для АК-4 изменение микротвердости составило от 100 МПа у исходного образца, до 130 Мпа при обработке с использованием импульсов напряжением 380 В. Поверхность титанового сплава упрочнилась в 1,2 раза. Можно предположить, что упрочнение поверхности образцов происходит в результате механического воздействия ударных волн при формировании ПЛК и электрического разряда, а так же процесса быстрого нагрева и охлаждения материала образца, находящегося в непосредственной близости от электроэрозионной лунки.

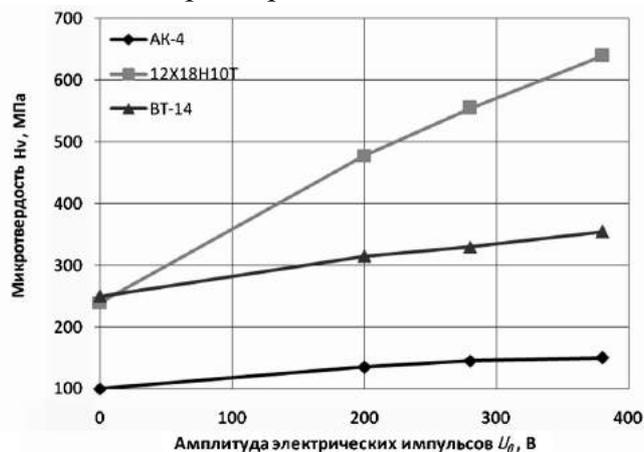
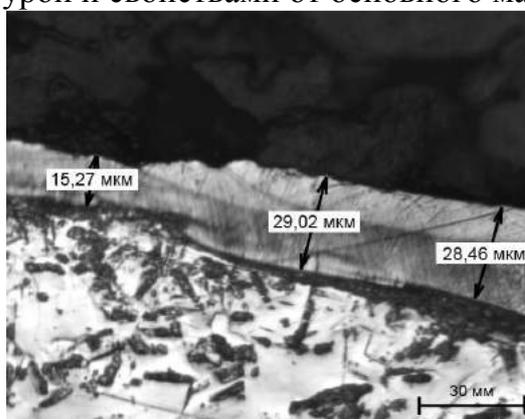


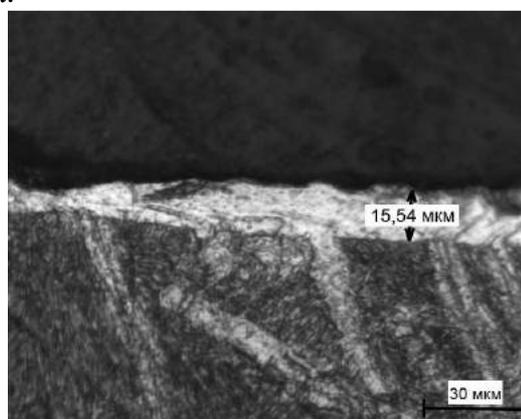
Рис. 15. Зависимости микротвердости поверхностей после электроэрозионной обработки с использованием ПЛК от амплитуды электрических импульсов и материала заготовки

16). Из полученных результатов видно, что после электроэрозионной обработки с использованием ПЛК на поверхности образцов формируется измененный слой, отличающийся структурой и свойствами от основного материала.

Для установления глубины измененного слоя, формирующегося после электроэрозионной обработки с использованием ПЛК, были подготовлены микрошлифы из обработанных этим методом заготовок (рис.



а



б

Рис. 16. Микрошлифы из заготовок после электроэрозионной обработки с использованием проводящих лазерных каналов. Материал: а - 12Х18Н10Т, б - ВТ-14

Величина измененного слоя для образца из 12Х18Н10Т составила от 15...30 мкм. Для образца из ВТ-14 измененный слой не превышал 16 мкм. Величина микротвердости слабо меняется в продольном направлении сечения образцов.

Проводились исследования максимальной погрешности формообразования в зависимости от амплитуды электрических импульсов, рабочей жидкости, и материала заготовки. В диапазоне амплитуд электрических импульсов от 200 до 380 В максимальная погрешность обработки достигает 0,3...0,5 мм для АК-4, 0,2...0,32 мм для 12Х18Н10Т и 0,17...0,25 мм для ВТ-14. Столь высокая погрешность обработки объясняется причинами, характерными для традиционной ЭЭО (размеры инструмента и режимы обработки), и при-

чинами, связанными со специфическими свойствами ПЛК. В экспериментальных исследованиях диаметр ПЛК составлял 2...2,1 мм. Предположительно использование ПЛК с диаметром порядка нескольких десятков микрометров и меньших амплитуд электрических импульсов позволит значительно снизить погрешность обработки. К специфическим свойствам ПЛК, оказывающим влияние на погрешность обработки, относится наличие слоя с высокой степенью ионизации вокруг ПЛК, который снижает порог электрического пробоя рабочей среды, в связи с чем боковой МЭЗ, а соответственно и погрешность обработки увеличивается.

Производительность рассматривалась как объем удаленного материала в единицу времени. Зависимости производительности обработки от материала заготовки соответствуют положению об электроэрозионной обрабатываемости материалов. Наибольшая производительность зафиксирована для материала АК-4, обработанного в масле – $18,2 \times 10^{-2} \text{ мм}^3/\text{мин}$, наименьшая – $1,2 \times 10^{-2} \text{ мм}^3/\text{мин}$ для материала ВТ-14 (рабочая среда – вода). Процесс в целом имеет низкую производительность, что объясняется малой частотой лазерных и электрических импульсов – 10 Гц.

Можно предположить, что при использовании лазерных излучателей с большей частотой и энергией импульсов показатели ЭЭО с использованием ПЛК будут соответствовать показателям традиционной ЭЭО.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в исследовании процесса электроэрозионной обработки с использованием проводящих лазерных каналов. В результате выполнения работы были сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что применение нетвердотельных электродов-инструментов позволит повысить технологические параметры электроэрозионной обработки. Проводящие лазерные каналы, полученные в результате оптического пробоя, могут быть использованы в качестве нетвердотельных электродов-инструментов благодаря их высокой электропроводности и геометрической определенности. Ввиду отсутствия теоретических и экспериментальных исследований процесса электроэрозионной обработки с использованием проводящих лазерных каналов изучение названного процесса является актуальной задачей.

2. Теоретические исследования позволили выявить зависимости энергии, выделяющейся на заготовке, от параметров проводящих лазерных каналов и электрических импульсов. Доказано, что для рассмотренных условий обработки время задержки между началом формирования проводящего лазерного канала и электрическим импульсом должно находиться в диапазоне от 0 до 5 мкс.

3. По результатам моделирования теплопередачи в объеме заготовки установлены глубина слоя материала заготовки, подвергшаяся тепловому воздействию, и зависимости размеров единичных лунок от амплитуды электрических импульсов и материала заготовки. Наибольшая глубина слоя, подвергшегося тепловому воздействию (100...130 мкм), и размеры единичных лунок зафиксированы для алюминиевого сплава АК-4 ($d_{\text{л}}=155...160 \text{ мкм}$, $H_{\text{л}}=70...80 \text{ мкм}$).

4. Разработаны схемы электроэрозионной обработки с использованием проводящих лазерных каналов. Предложенные схемы включают в себя схемы вырезки, точения, модифицирования поверхности. Схемы обеспечивают осуществление обработки с помощью проводящих лазерных каналов, используемых в качестве электродов-инструментов.

5. Спроектирована и создана экспериментальная установка ЭУ-1 для проведения ЭЭО с использованием проводящих лазерных каналов, позволяющая осуществлять обработку по схеме двухкоординатной вырезки.

6. Проведены экспериментальные исследования свойств проводящих лазерных каналов как электродов-инструментов. Исследования показали высокую электропроводность проводящих лазерных каналов, позволяющую использовать их в качестве электродов-инструментов. Их геометрические свойства зависят от типа и параметров фокусирующих систем и среды, в которой происходит оптический пробой.

7. Исследования единичных актов электроэрозии позволили установить характер протекания электрических разрядов между заготовкой и проводящим лазерным каналом. Установлено, что в период существования проводящего лазерного канала целесообразно формировать один электрический импульс. Установлены экспериментальные зависимости между размерами единичных лунок от амплитуды электрических импульсов, материала заготовки и рабочей жидкости. Максимальные размеры лунок получены на заготовках из алюминиевого сплава АК-4 ($d_n = 170 \dots 180$ мкм, $H_n = 48 \dots 50$ мкм).

8. Проведено экспериментальное исследование электроэрозионного формообразования с применением проводящих лазерных каналов. Установлены зависимости шероховатости, микротвердости обработанных поверхностей, максимальной погрешности и производительности обработки от амплитуды электрических импульсов, рабочей жидкости и материала заготовки. Максимальная производительность ($18,2 \times 10^{-2}$ мм³/мин) и погрешность обработки зафиксирована при обработке в индустриальном масле И20 с использованием электрических импульсов амплитудой 370...380 В. Минимальная шероховатость ($Ra = 2 \dots 3$ мкм) обработанных поверхностей получена при использовании электрических импульсов с амплитудой 180...200 В.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Козырь Д.В., Любимов В.В., Грачев О.Е. Исследование процесса электрофизикохимической обработки с применением плазменного катода-инструмента // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. – Вып. 8. – С. 327 – 335.

2. Козырь Д.В. Исследование параметров единичных лунок, полученных в результате электроэрозионной обработки с использованием плазменного электрода-инструмента // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. – Вып. 9. – Ч. 2 – С. 350 – 358.

3. Козырь Д.В. Применение плазменного канала оптического пробоя в качестве катода в электроэрозионной обработке // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. – Вып.11. – С. 141 – 146.

4. Козырь Д.В. Комбинированная электрофизическая обработка с использованием проводящих плазменных каналов // VI Молодёжная научно-практическая конференция Тульского государственного университета. Молодежные инновации: сборник докладов. Часть I. Секция: Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – С. 144-147.

5. Козырь Д.В. Анализ способов фокусировки лазерного излучения с целью формирования плазменных электродов // VII Молодёжная научно-практическая конференция Тульского государственного университета. Молодежные инновации: Сборник докладов. Часть I. Секция: Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – С. 141-144.

6. Козырь Д.В. Проводящие лазерные каналы в электрофизических методах обработки // VIII Молодёжная научно-практическая конференция Тульского государственного университета. Молодежные инновации: сборник докладов. Часть I. Секция: Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. – С. 131-133.

7. Д.В. Козырь. Оценка геометрических параметров поверхности после электрохимической обработки // Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы. Саратов, 2012. – С. 16-23.

8. Козырь Д.В., Любимов В.В., Грачев О.Е. Исследование процесса электрофизикохимической обработки с применением импульсного плазменного катода. // Высокие критические электро- и нанотехнологии: труды всероссийской научно-технической конференции. Тула, 26 октября 2011 г. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – С. 27-37.

9. Козырь Д.В., Степанов П.В. Применение проводящих плазменных каналов наносекундного лазерного излучения в электрофизических методах обработки // Высокие критические электро- и нанотехнологии: труды научно-технической конференции. Тула, 7 июня 2012 г. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – С. 48-53.

10. Козырь Д.В., Степанов П.В. Анализ процесса получения искусственных рельефов электрохимическим методом с применением нетвердотельного электрода-инструмента // Высокие критические электро- и нанотехнологии: труды научно-технической конференции. Тула, 7 июня 2012 г. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – С. 34-41.

11. Козырь Д.В., Любимов В.В., Карабенков В.В. Исследование электроэрозионного формообразования с применением проводящих плазменных каналов // Высокие критические электро- и нанотехнологии: труды I Региональной научно-технической конференции. Тула, 29 октября 2013 г. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. – С. 162– 167.

12. Козырь Д.В. Разработка технологических методов изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов с использованием проводящих плазменных каналов наносекундного лазерного излучения // Современная электротехнология в промышленности России (молодежные инновации): сборник трудов научно-технической конференции. Тула, 7 октября 2011 г. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – С. 33-40.

13. Козырь Д.В., Степанов П.В. Анализ процесса получения искусственных рельефов электрохимическим методом с применением нетвердотельного электрода-инструмента // Современная электротехнология в промышленности России (молодежные инновации): сборник трудов научно-технической конференции. Тула, 18 октября 2012 г. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – С. 16-21.