

УДК 621.9.048 doi: 10.18698/0536-1044-2019-11-46-54

Новые наукоемкие технологии в электро-физико-химических методах обработки деталей ракетно-космической техники

С.В. Кушнаренко¹, А.О. Фомичев², Ю.П. Астахов², К.А. Богданов²,
А.А. Перепечкин², И.И. Белов²

¹ АО «НПО Энергомаш» им. академика В.П. Глушко»

² ФГУП «НПО Техномаш»

New Science-Intensive Technologies for Electrophysical and Chemical Treatment of Aerospace Parts

S.V. Kushnarenko¹, A.O. Fomichev², Y.P. Astakhov², K.A. Bogdanov²,
A.A. Perepechkin², I.I. Belov²

¹ AO NPO Energomash named after Academician V. Glushko

² Federal State Unitary Enterprise NPO Technomash

Рассмотрены эффективные гибридные технологии, сочетающие в себе преимущества электрофизических и электрохимических методов и позволяющие обрабатывать детали различной номенклатуры. Предопределены новые технологические методы (электрофизические и химические) обработки токопроводящих материалов. Введение комбинированных методов обработки, совмещающих ультразвук, электрохимию и электроэрозию, дает возможность интенсифицировать рабочий процесс, решать принципиальные технологические задачи (востребованные предприятиями отрасли) и улучшать качество обрабатываемой поверхности. Проведен анализ метода электроэрозионной прошивки с наложением ультразвукового поля. Выявлены недостатки комбинированного метода обработки с наложением ультразвуковых колебаний на деталь. Даны рекомендации по определению эффективности применения каждого метода с учетом степени сложности объектов обработки, используемых материалов и типа производства. Разработан гибридный электроэрозионно-электрохимический станок с ЧПУ.

Ключевые слова: гибридные технологии, комбинированные методы, звуко-капиллярный эффект, электрод-инструмент, рабочая жидкость, электроэрозионная обработка

The paper examines effective hybrid technologies that combine electrophysical and electrochemical methods and enable treatment of parts with different nomenclature. New treatment methods, electrophysical and chemical, are pre-defined for processing conductive materials. By introducing combined treatment methods that bring together ultrasound, electrochemistry and electrical discharge it is possible to boost the treatment process, solve fundamental process tasks that are demanded by industry, and improve the quality of the treated surface. An analysis of the electrical discharge drilling method with an ultrasonic field activation is carried out. The disadvantages of the combined treatment method with the application of ultrasonic oscillations to workpiece are identified.

Recommendations are given on determining and justifying the effective application of each method by taking into account the degree of complexity of the treated objects, the materials used and the type of appropriate production. A hybrid electrochemical-electrical discharge CNC machine is developed.

Keywords: hybrid technologies, combined methods, acoustocapillary effect, tool electrode, working fluid, electrical discharge machining

В основе каждого метода обработки твердых тел лежит определенный физический или химический процесс, воздействующий на материал. Объединение нескольких стандартных процессов обработки обеспечивает получение деталей с заданными свойствами. Внедрение комбинированных методов обработки позволило не только повысить эффективность существующих технологий, но и решить ряд новых технологических задач [1].

Гибридный метод обработки изделий машиностроения — это процесс не менее двух одновременно действующих различных типов технологических операций энергетического характера, взаимно влияющих друг на друга, усиливающих действие каждого из них, проводящих преобразование свойств каждого метода, которое обеспечивает качественно новую технологию.

Цель работы — разработка и внедрение технологий комбинированной обработки, базирующихся на достижениях в области теоретического описания соответствующих физико-химических процессов, построения математических моделей и вытекающих из их анализа инженерных методик расчета, выбора параметров режима и оценки технологических характеристик.

Переход от лабораторного эксперимента к опытно-промышленной апробации комбинированного метода и применению технологий на его основе в серийном производстве сдерживается преимущественно отсутствием или недостаточным техническим уровнем оборудования [2].

Можно выделить два основных пути развития технологического оборудования для комбинированных методов обработки. Первый связан с модернизацией существующих станков и источников питания для реализации отдельных единичных процессов обработки, на основе которых создан комбинированный метод, а второй — с разработкой специального оборудования и его элементов. Опыт показывает, что модернизация позволяет быстрее и с меньшими затратами внедрить комбинированные технологии, но при этом не всегда удается в полной мере реализовать их достоинства и преимущества [2].

Тенденции развития комбинированных методов. Комплексное объединение (комбинирование) различных источников энергии и видов обработки деталей в единый технологический процесс дает возможность в значительной мере нивелировать недостатки монотехнологий и получить новые эффекты, недостижимые при использовании технологий по отдельности. Эффективность комбинированных технологий достигается также снижением потерь времени выполнения рабочих процессов путем исключения или сокращения большого числа промежуточных и вспомогательных операций [3].

Технико-экономическая экспертиза (рис. 1), проведенная доктором технических наук, профессором В.М. Макаровым (МГТУ «Станкин»), показала, что гибридные станочные системы и автоматическое оборудование с неперепрограммируемыми системами управления экономически целесообразно использовать при минимальной номенклатурности производимых деталей (область А).

Однако гибкость и универсальность таких сложных мехатронных систем практически не будет задействована, что технически и произ-

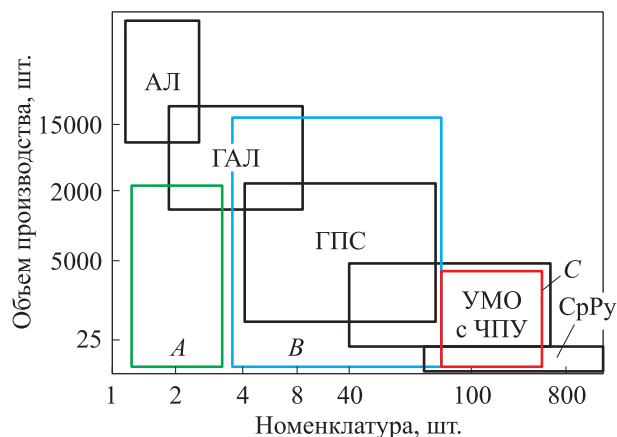


Рис. 1. Оценка областей применения гибридного оборудования в машиностроении:

АЛ — автоматические линии; ГАЛ — гибкие автоматизированные линии; ГПС — гибкие производственные системы; УМО с ЧПУ — универсальное многоцелевое оборудование с ЧПУ; СрРУ — станки с ручным управлением; А, В и С — область допустимой, максимальной и минимальной эффективности соответственно

водственно неоправданно. Высокая цена гибридных станков делает их низкорентабельными в области эффективного применения традиционных станков с ЧПУ (в области С). Вместе с тем их большая гибкость позволяет расширить зону (область В) эффективного применения по комплексу технико-экономических показателей.

При технико-экономическом анализе следует учесть, что гибридная система заменяет несколько традиционных машиномест и интегрирует производственные процессы не только территориально, но и циклически [3].

Применение ультразвукового поля в операции электроэрозионной прошивки. Чередование импульсов технологического тока и ультразвуковых колебаний (УЗК) не обеспечивает существенного улучшения эвакуации продуктов эрозии. Актуальной задачей является повышение производительности и качества электроэрозионной обработки (ЭЭО) путем улучшения эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки и упорядочения момента возникновения пробоя рабочей жидкости (РЖ) импульсами рабочего напряжения на электродах [4–7].

Согласно способам ЭЭО, на электроды накладывают УЗК и подают импульсы рабочего напряжения. При этом момент подачи импульса рабочего напряжения согласован устройством синхронизации с периодом УЗК и приходится на фазу максимального удаления электродов за период УЗК, а на стадии сближения электродов происходит очистка поверхности детали и удаление продуктов эрозии из зоны обработки благодаря кавитационным явлениям и звукокапиллярному эффекту [8–11].

Описанные теоретические выкладки подтверждены экспериментальными исследованиями, при которых прошивку отверстий проводят латунными, графитовыми и вольфрамовыми электродами-инструментами (ЭИ) диаметром $d = 0,7; 0,5$ и $1,0$ мм соответственно. Детали, подвергавшиеся обработке, представляли собой пластины и форсунки толщиной 1 мм из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

Схема и внешний вид установки для обработки детали с наложением УЗК на ЭИ приведены на рис. 2, а и б соответственно.

Прошивку каждого нового отверстия проводили с варьированием следующих режимов системы слежения и управления генератором через программное обеспечение в компьютере (при необходимости изменения входных данных ЭЭО):

T	— задание длительности импульса генератора $T_{\text{имп}}$, мкс;
КЗ _{имп}	— задание количества последовательных импульсов короткого замыкания (КЗ), при которых генератор переходит в режим пропуска импульса;
КЗ _{пр}	— регулировка пропуска импульсов по КЗ;
Ток КЗ	— регулятор тока импульса $I_{\text{КЗ}}$, А;
Ток ХХ	— регулятор тока холостого хода (ХХ) $I_{\text{ХХ}}$, А;
f	— частота импульсов, кГц;
W	— включение/выключение режима повышения мощности импульса тока на 50 %;
F	— подача ЭИ при обработке отверстия, мм/мин;
КЗ	— значение, ниже которого все импульсы будут считаться импульсами КЗ;
Вр. отк	— максимальное время отката ЭИ $t_{\text{отк}}$, мс;
% ХХ	— задание доли импульсов ХХ $\tau_{\text{имп}}$, которую поддерживает система слежения;
Ускор	— регулировка коэффициента ускорения $k_{\text{уск}}$, с которым система слежения будет набирать/сбрасывать скорость при слежении;
Изн	— износ ЭИ после обработки отверстия, мм;
t	— время обработки отверстия, мин.

В таблице приведены значения износа ЭИ h и времени обработки отверстий $t_{\text{обр}}$, сделанных в пластинах и форсунках толщиной 1 мм латунным ЭИ ($d = 0,7$ мм), графитовым ЭИ ($d = 0,5$ мм) и вольфрамовым ЭИ ($d = 1,0$ мм) с помощью традиционной ЭЭО и ЭЭО с наложением УЗК на ЭИ и подачей РЖ поливом в зону прошивки. В пластинах прошили 216 отверстий латунным ЭИ, 318 — графитовым ЭИ и 283 — вольфрамовым ЭИ ($d = 1,0$ мм), а в форсунках — 205 отверстий латунным ЭИ. В таблице введены следующие обозначения: $I_{\text{КЗ}}$ — ток КЗ; $I_{\text{ХХ}}$ — ток ХХ; «+» — включен режим повышения мощности импульса тока на 50 %. Амплитуда колебаний УЗГ при ЭЭО с наложением УЗК на ЭИ достигала $5 \dots 8$ мкм.

Анализ полученных данных позволяет заключить следующее:

- с помощью сравнительного анализа результатов обработки отверстий найдена эффективная технология ЭЭО с ультразвуком, при которой непосредственное наложение УЗК на ЭИ и подача РЖ поливом в зону прошивки способствуют наилучшему удалению из нее продуктов

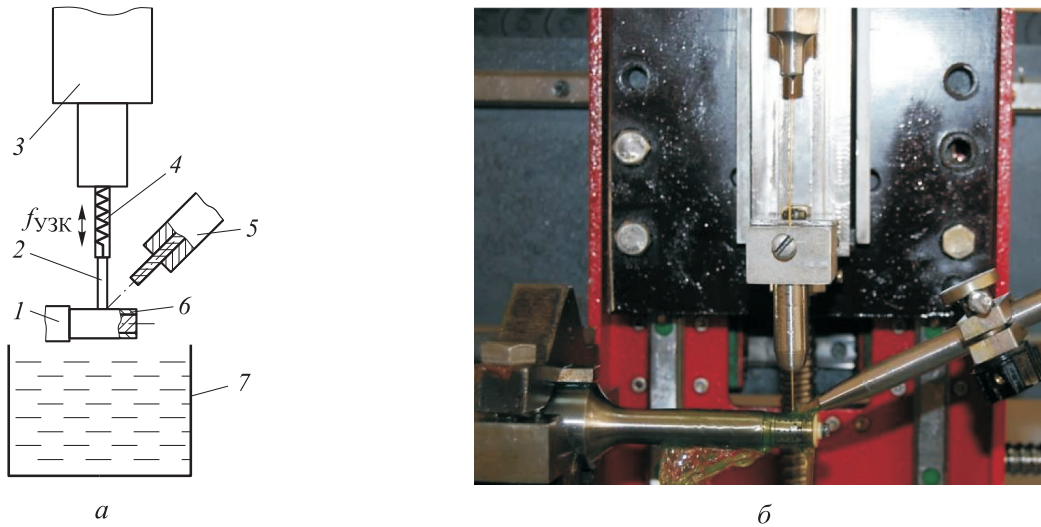


Рис. 2. Схема (а) и внешний вид (б) установки для обработки детали с наложением УЗК на ЭИ:
 1 — узел крепления обрабатываемой детали (пластины); 2 — ЭИ; 3 — привод подачи рабочего хода ЭИ;
 4 — ультразвуковой излучатель; 5 — узел крепления направляющей втулки; 6 — пластина; 7 — ванна с РЖ;
 $f_{УЗК}$ — частота УЗК

эрозии и повышению производительности процесса ЭЭО при сохранении точности позиционирования прошиваемых отверстий;

- для определения влияния на скорость прошивки ее частот, диэлектрика, конструп-

ции и материала инструмента, а также для изучения обрабатываемости материалов необходимо провести дальнейшие исследования и разработки в направлении унификации технологии ЭЭО.

Значения износа ЭИ и времени обработки отверстий, сделанных различными ЭИ в пластинах и форсунках с помощью традиционной ЭЭО и ЭЭО с наложением УЗК на ЭИ

$T_{имп}, мкс$	$KZ_{имп}$	$KZ_{пр}$	$I_{кз}, А$	$I_{хх}, А$	$f, кГц$	W	$F, мм/мин$	$KЗ$	$t_{отк}, мс$	$\tau_{имп}, \%$	$k_{уск}$	$h, мм$	$t, мин$
При прошивке отверстий в пластинах латунным ЭИ													
2,8	3	8	224	188	5	+	10,0	43	5,0	35	1,0	$\frac{1,2}{2,0}$	$\frac{2,10}{0,83}$
2,6	3	8	160	152	5	+	7,0	50	11,0	35	1,0	$\frac{0,8}{1,0}$	$\frac{2,16}{1,75}$
2,2	3	8	68	72	5	+	6,0	37	18,5	40	1,0	$\frac{0,9}{1,2}$	$\frac{2,50}{0,92}$
При прошивке отверстий в пластинах графитовым ЭИ													
2,8	3	28	140	112	5	+	10,0	47	1,0	15	1,6	$\frac{0,9}{1,5}$	$\frac{0,58}{0,33}$
2,6	3	28	140	112	5	+	10,0	60	1,0	15	1,6	$\frac{0,6}{1,3}$	$\frac{0,55}{0,41}$
2,4	3	28	120	100	5	+	8,0	50	1,0	15	1,6	$\frac{2,2}{1,7}$	$\frac{0,92}{0,73}$
При прошивке отверстий в пластинах вольфрамовым ЭИ													
2,8	7	20	36	60	5	+	7,0	20	1,0	42	1,6	$\frac{0,2}{0,2}$	$\frac{0,88}{0,50}$
2,6	7	28	52	40	5	+	7,0	20	1,0	45	1,6	$\frac{0,3}{0,3}$	$\frac{1,41}{0,93}$
2,6	7	28	48	84	5	+	6,5	20	1,0	40	1,6	$\frac{0,3}{0,6}$	$\frac{1,33}{0,51}$
При прошивке отверстий в форсунках латунным ЭИ													
2,8	3	8	200	120	5	+	10,0	43	1,0	35	1,6	$\frac{1,7}{1,4}$	$\frac{2,34}{1,51}$
2,8	7	4	180	152	5	+	9,0	43	1,0	35	1,6	$\frac{2,4}{2,7}$	$\frac{2,41}{1,73}$
2,8	3	8	180	152	5	+	10,0	43	1,0	35	1,6	$\frac{2,1}{2,5}$	$\frac{3,28}{1,41}$

Примечание. В числителе дроби указаны значения для традиционной ЭЭО, в знаменателе — для ЭЭО с наложением УЗК на ЭИ.

Разработка гибридного электроэрозионно-электрохимического оборудования. Возможность осуществления в жидкой токопроводящей среде как электрохимического, так и электроэрозионного механизма разрушения материала породила идею пространственно-временного совмещения этих процессов в рамках единого комбинированного метода обработки.

Физическая картина прохождения электрического тока через растворы электролитов предполагает, что при достаточно интенсивном вводе энергии вблизи поверхности металлического электрода образуется многофазная система металл — плазма — газ — электролит, энергоносителями которой являются не только ионы, но и электроны. При этом к причинам разрушения металлического электрода относятся анодное растворение, электрические разряды и сопутствующие им явления [2].

Рассмотрим типичную вольтамперную характеристику (ВАХ) межэлектродного промежутка, заполненного электропроводной жидкостью (рис. 3). Предположим, что характер ВАХ преимущественно определяется процессами, протекающими на используемом электроде — аноде.

При повышении напряжения на электродах до некоторого критического значения U_1 наблюдается практически линейное увеличение тока. Выделенная область I соответствует классическому электролизу, описываемому в первом приближении законами Ома и Фарадея. Нагрузкой электрической цепи в этой области является сопротивление межэлектродного электролитного промежутка.

Заметим, что электролиз сопровождается нагревом анодной поверхности связанным с причинами, рассмотренными ранее. Начиная с

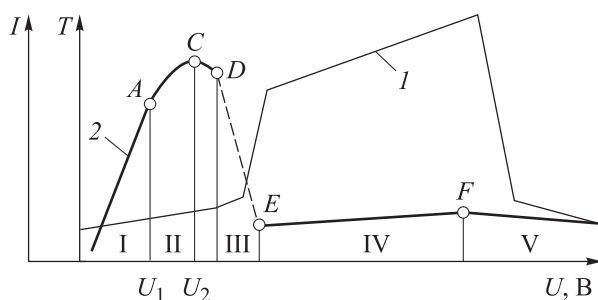


Рис. 3. Зависимости тока I (1) и температуры анодной поверхности T (2) от напряжения U на электродах ячейки

точки A ВАХ становится нелинейной в тем большей степени, чем выше приложенное напряжение. Наблюдаемое отклонение ВАХ от линейности в области II обусловлено интенсивным электродным газовыделением, приводящим к формированию приэлектродного газожидкостного слоя, нелинейное сопротивление которого начинает определять характер нагрузки электрической цепи [2].

По мере повышения напряжения плотность упаковки газовых пузырьков в приэлектродном газожидкостном слое возрастает, и суммарная площадь поперечного сечения электролитных мостиков между ними уменьшается. В результате джоулева тепловыделения электролита в мостиках достигает температуры кипения, образуется система жидкость — газ — пар.

На ВАХ в точке C наблюдается максимум, которому соответствуют значения тока и напряжения, называемые критическими. Дальнейшее повышение напряжения сопровождается уменьшением тока в цепи вследствие формирования сплошного газопарового слоя.

В области III сплошность и устойчивость слоя возрастают, а его электропроводные свойства снижаются. При достижении напряжения U_2 начинаются пульсации тока, причиной которых, по-видимому, является периодическое образование и разрушение сплошной газопаровой пленки. Напряженность электрического поля в такой пленке достигает критического значения, и происходит ее пробой в результате искрового разряда. Однако газопаровая оболочка быстро восстанавливается ($\sim 10^{-4}$ с) и запирает ток. Учитывая вероятностную природу разряда, положение точки D на участке III достаточно условно [2].

В точке E начинается участок IV ВАХ, характеризующийся тем, что в связи с переходом от пузырькового режима кипения к пленочному образуется стационарная парогазовая оболочка, в которой реализуется тлеющий разряд. Температура поверхности электрода резко повышается до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ и более. По мере увеличения напряжения температура растет, достигая примерно $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2].

Дальнейшее возрастание напряжения на электродах приводит к установлению V режима анодного процесса, где развиваются электрогидродинамические явления в электролите, а электрические разряды в газопар-

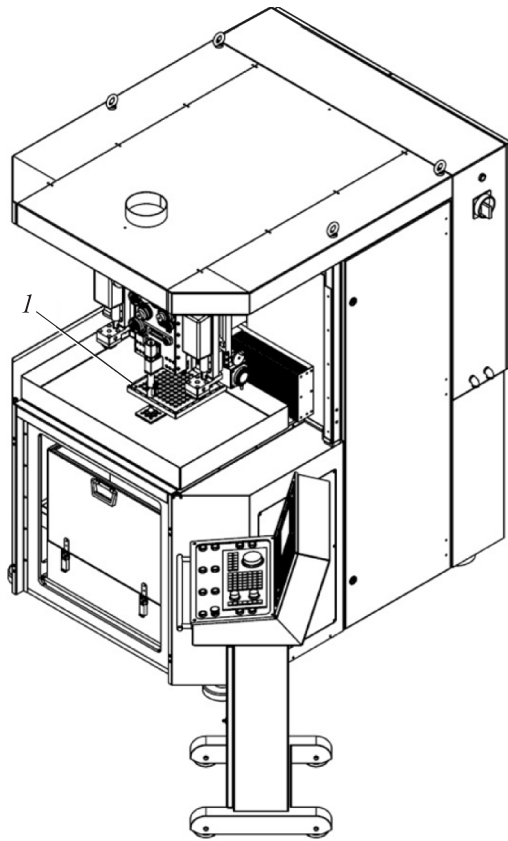


Рис. 4. Внешний вид станка ЭП310ПВ
(1 — заготовка)

ровой фазе носят иной характер. В этой области ВАХ наблюдается скачкообразное снижение температуры анода до 100...200 °С. Начиная с точки F электрическое сопротивление межэлектродного промежутка растет, а ток падает [2].

В настоящее время специалисты ФГУП «НПО «Техномаш» спроектировали станок для комбинированной электроэрозионно-электрохимической обработки деталей из труднообрабатываемых сталей и сплавов, на котором будет проведена апробация этого метода.

Заданными деталями, для которых разработано обрабатывающее оборудование, являются пружинные кольца (ОСТ 92-8969-78) для космических аппаратов диаметром 5...210 мм и толщиной от 0,5 до 2,0 мм из труднообрабатываемых сталей, таких как 65Г, 36НХТЮ (ГОСТ 14117-85), ЭП79С-ВИ (ВУКС-2-ВИ (ТУ 14-1-1756-76)), 40Х13-Мв (ГОСТ 5582-75). Требуемая точность обработки по Н7 (до +0,05 мм) [12].

В процессе анализа проведен обзор станков-аналогов — электроэрозионных (проволочно-вырезных АРТА 123, АРТА 123ПРО, АРТА 153,

АРТА 153 ПРО, АРТА 453 ПРО и копировально-прошивного АРТА 1040) и электрохимических (ЭХО-У10, ЭХО-У13, ЭХО У-15).

Для изготовления стопорных колец диаметром 5...210 мм и их чистовой электрохимической обработки с целью снятия некачественного усталостного слоя используют гибридный электроэрозионно-электрохимический станок с ЧПУ ЭП310ПВ (рис. 4) [12].

Пакет листовых заготовок сваривают по углам, устанавливают в приспособление и закрепляют винтами. Приспособление перемещается по осям X и Y посредством электрических приводов с шариковинтовой передачей [12]. На вертикальном суппорте,двигающемся вдоль оси Z с помощью этого привода [12], размещены механизмы натяжения проволоки электрода, зажима и отрезки.

Справа и слева от вертикального суппорта расположены два актуатора с электродами для электрохимической обработки. Перед ее началом регулируют и фиксируют горизонтальное положение актуатора, который перемещает электрод по осям W_1 и W_2 , параллельным оси Z [12].

Обработка осуществляется в ванне с подачей либо электролита, либо диэлектрика (в зависимости от текущей операции), также имеется возможность комбинированной электроэрозионно-электрохимической обработки. Слив жидкости из ванны происходит в бак для электролита или диэлектрика, где она фильтруется и подается по гидросистеме обратно в зону обработки [12].

Выводы

1. Гибридные технологии сочетают в себе преимущества электрофизических и электрохимических методов. Используемые комбинации разнообразны. Например, совмещение анодно-механической обработки с ультразвуковой в некоторых случаях повышает производительность в 20 раз. Существующие электроэрозионно-ультразвуковые станки позволяют использовать оба метода как отдельно, так и вместе.

2. Воздействие УЗК приводит к сокращению машинного времени обработки, повышению стабильности процесса прошивки отверстий и сужению поля рассеяния значений времени обработки по отношению к традиционной ЭЭО.

3. Применение комбинированной электроэрозионно-электрохимической обработки позволит исключить образование поверхностного усталостного слоя и повысить качество создаваемой поверхности.

4. Необходимо проведение дальнейших исследований и разработок в направлении унификации технологии электро-физико-химической обработки.

Литература

- [1] Груздев А.А., Саушкин Б.П. Комбинированные методы и технологии обработки деталей машин. *Ритм*, 2014, № 4, с. 32–40.
- [2] Моргунов Ю.А., Панов Д.В., Саушкин Б.П., Саушкин С.Б. *Наукоемкие технологии машиностроительного производства. Физико-химические методы и технологии*. Москва, Форум, 2013. 928 с.
- [3] Макаров В.М., Лукина С.В. Уникальная синергия гибридных станков. *Ритм*, 2016, № 8, с. 18–25.
- [4] Казанцев В.Ф. *Физика ультразвука*. Москва, МИРАЭ, 2010. 180 с.
- [5] Shervani-Tabar M.T., Seyed-Sadjadi M.H., Shabgard M.R. Numerical study on the splitting of a vapor bubble in the ultrasonic assisted EDM process with the curved tool and work piece. *Ultrasonics*, 2013, vol. 53, iss. 1, pp. 203–210, doi: 10.1016/j.ultras.2012.06.001
- [6] Мицкевич М.К. *Исследование влияния низкочастотных вибраций и ультразвука на процесс электроэрозионной обработки*. Дис. ... канд. техн. наук, Минск, 1969. 215 с.
- [7] Кавтарадзе О.Н., Гай Е.Ю. Электроискровая обработка материалов с наложением ультразвуковых колебаний. *Обзоры по электронной технике. Сер. 7: Технология, организация производства и оборудование*, 1982, вып. 3, с. 2–20.
- [8] Кавтарадзе О.Н. Оборудование, оснастка и электроды-инструменты для электроискровой обработки с наложением ультразвуковых колебаний. *Электронная обработка материалов*, 1984, № 4, с. 70–73.
- [9] Soloff R.S. *System and method for ultrasonic assisted EDM machining*. Patent US no. 8212171, 2007.
- [10] Жулин О.Н., Стержнев П.В. *Способ электроэрозионной обработки*. Пат. 2104833 РФ, 1998, бюл. № 38, 2 с.
- [11] Вероман В.Ю., Лозбенев А.И., Розанов В.А., Шавырин В.А. *Способ электроэрозионной обработки*. А.с. 666021 СССР, 1979, бюл. № 10, 2 с.
- [12] Кушнаренко С.В., Фомичев А.О. Комбинированный метод электроэрозионно-электрохимической обработки тонкостенных деталей из труднообрабатываемых сталей и сплавов. Создание полуавтомата на основе данного метода. *Новые материалы и технологии для ракетно-космической техники. Сб. матер. молодеж. конф., Звездный городок*, 2017, Королев, Изд-во ООО «12 апреля», с. 33–41.

References

- [1] Gruzdev A.A., Saushkin B.P. Combined methods and technologies for processing machine parts. *Ritm*, 2014, no. 4, pp. 32–40 (in Russ.).
- [2] Morgunov Yu.A., Panov D.V., Saushkin B.P., Saushkin S.B. *Naukoyemkiye tekhnologii mashinostroitelnogo proizvodstva. Fiziko-khimicheskiye metody i tekhnologii* [High technology engineering production. Physico-chemical methods and technologies]. Moscow, Forum publ., 2013. 928 p.
- [3] Makarov V.M., Lukina S.V. Unique Synergy of Hybrid Machines. *Ritm*, 2016, no. 8, pp. 18–25 (in Russ.).
- [4] Kazantsev V.F. *Fizika ul'trazvuka* [Ultrasound physics]. Moscow, MIRAE publ., 2010. 180 p.

- [5] Shervani-Tabar M.T., Seyed-Sadjadi M.H., Shabgard M.R. Numerical study on the splitting of a vapor bubble in the ultrasonic assisted EDM process with the curved tool and work piece. *Ultrasonics*, 2013, vol. 53, iss. 1, pp. 203–210, doi: 10.1016/j.ultras.2012.06.001
- [6] Mitskevich M.K. *Issledovaniye vliyaniya nizkochastotnykh vibratsiy i ul'trazvuka na protsess elektroerozionnoy obrabotki*. Kand. Diss. [Study of the influence of low-frequency vibrations and ultrasound on the process of EDM processing. Cand. Diss.]. Minsk, 1969. 215 p.
- [7] Kavtaradze O.N., Gay E.Yu. Electrosparking of materials with the imposition of ultrasonic vibrations. *Obzory po elektronnoy tekhnike. Ser. 7: Tekhnologiya, organizatsiya proizvodstva i oborudovaniye*, 1982, iss. 3, pp. 2–20 (in Russ.).
- [8] Kavtaradze O.N. Equipment, equipment and electrodes-tools for electric-spark processing with the imposition of ultrasonic vibrations. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 1984, no. 4, pp. 70–73.
- [9] Soloff R.S. *System and method for ultrasonic assisted EDM machining*. Patent US no. 8212171, 2007.
- [10] Zhulin O.N., Sterzhnev P.V. *Sposob elektroerozionnoy obrabotki* [The method of electroerosive processing]. Patent RF no. 2104833, 1998.
- [11] Veroman V.Yu., Lozbenev A.I., Rozanov V.A., Shavyrin V.A. *Sposob elektroerozionnoy obrabotki* [The method of electroerosive processing]. Avtorskoye svidetel'stvo USSR no. 666021, 1979.
- [12] Kushnarenko S.V., Fomichev A.O. The combined method of electroerosion-electrochemical processing of thin-walled parts from hard-to-machine steels and alloys. Creating a semi-automatic based on this method. *Novyye materialy i tekhnologii dlya raketno-kosmicheskoy tekhniki. Sbornik materialov molodezhnoy konferentsii* [New materials and technologies for rocket and space technology. Collection of materials of the youth conference]. Korolev, 2017, pp. 33–41.

Статья поступила в редакцию 17.05.2019

Информация об авторах

КУШНАРЕНКО Сергей Владимирович — инженер-технолог первой категории. АО НПО «Энергомаш» им. академика В.П. Глушко (141400, Химки, Российская Федерация, ул. Бурденко, д. 1, e-mail: kushnarenko@list.ru).

ФОМИЧЕВ Алексей Олегович — аспирант кафедры «Технология машиностроения». Московский Политехнический университет; инженер-технолог третьей категории отделения передовых производственных технологий. ФГУП «НПО Техномаш» (127018, Москва, Российская Федерация, 3-й проезд Марьиной Рощи, д. 40, e-mail: darkdragon6666@mail.ru).

АСТАХОВ Юрий Павлович — кандидат технических наук, доцент, заслуженный машиностроитель РФ, главный советник отделения передовых производственных технологий. ФГУП «НПО Техномаш» (127018, Москва, Российская Федерация, 3-й проезд Марьиной Рощи, д. 40, e-mail: Y.Astahov@tmnp.ru).

БОГДАНОВ Кирилл Андреевич — инженер-технолог третьей категории отделения передовых производственных технологий. ФГУП «НПО Техномаш» (127018, Москва, Российская Федерация, 3-й проезд Марьиной Рощи, д. 40, e-mail: kab1002@bk.ru).

ПЕРЕПЕЧКИН Анатолий Андреевич — начальник лаборатории зачистных и ультразвуковых технологий отделения передовых производственных технологий. ФГУП «НПО Техномаш» (127018, Москва, Российская Федерация, 3-й проезд Марьиной Рощи, д. 40, e-mail: A.Perepechkin@tmnp.ru).

БЕЛОВ Иван Иванович — ведущий инженер-технолог отделения передовых производственных технологий. ФГУП «НПО Техномаш» (127018, Москва, Российская Федерация, 3-й проезд Марьиной Рощи, д. 40, e-mail: A.Perepechkin@tmnp.ru).

Information about the authors

KUSHNARENKO Sergei Vladimirovich — Manufacturing Process Engineer of the 1st Category. AO NPO Energomash named after Academician V. Glushko (141400, Khimki, Russian Federation, Burdenko St., Bldg. 1, e-mail: kushnarenko@list.ru).

FOMICHEV Aleksei Olegovich — Postgraduate, Department of Technology of Mechanical Engineering. Moscow Polytechnic University; Manufacturing Process Engineer of the 3rd Category, Department of Advanced Manufacturing Technologies. Federal State Unitary Enterprise NPO Technomash (127018, Moscow, Russian Federation, 3rd Proezd Maryinoi Roshchi, Bldg. 40, e-mail: darkdragon6666@mail.ru).

ASTAKHOV Yuri Pavlovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Honoured Machine Builder of the Russian Federation, Chief Consultant, Department of Advanced Manufacturing Technologies. Federal State Unitary Enterprise NPO Technomash (127018, Moscow, Russian Federation, 3rd Proezd Maryinoi Roshchi, Bldg. 40, e-mail: Y.Astahov@tmnp.ru).

BOGDANOV Kirill Andreevich — Manufacturing Process Engineer of the 3rd Category, Department of Advanced Manufacturing Technologies. Federal State Unitary Enterprise NPO Technomash (127018, Moscow, Russian Federation, 3rd Proezd Maryinoi Roshchi, Bldg. 40, e-mail: kab1002@bk.ru).

PEREPECHKIN Anatolyi Andreevich — Head of Laboratory, Finishing and Ultrasonic Technology, Department of Advanced Manufacturing Technologies. Federal State Unitary Enterprise NPO Technomash (127018, Moscow, Russian Federation, 3rd Proezd Maryinoi Roshchi, Bldg. 40, e-mail: A.Perepechkin@tmnp.ru).

BELOV Ivan Ivanovich — Lead Manufacturing Process Engineer, Department of Advanced Manufacturing Technologies. Federal State Unitary Enterprise NPO Technomash (127018, Moscow, Russian Federation, 3rd Proezd Maryinoi Roshchi, Bldg. 40, e-mail: A.Perepechkin@tmnp.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кушнаренок С.В., Фомичев А.О., Астахов Ю.П., Богданов К.А., Перепечкин А.А., Белов И.И. Новые наукоемкие технологии в электро-физико-химических методах обработки деталей ракетно-космической техники. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 11, с. 46–54, doi: 10.18698/0536-1044-2019-11-46-54

Please cite this article in English as:

Kushnarenko S.V., Fomichev A.O., Astakhov Y.P., Bogdanov K.A., Perepechkin A.A., Belov I.I. New Science-Intensive Technologies for Electrophysical and Chemical Treatment of Aerospace Parts. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 11, pp. 46–54, doi: 10.18698/0536-1044-2019-11-46-54