

DOI: 10.18721/JEST.25405
УДК 621.78

А.И. Попов, А.И. Попова, Д.А. Попова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СТРУЙНОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

В статье рассмотрены технологические аспекты использования струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки на примере детали типа фланец из стали 45Х. Показана технологическая возможность практического применения электролитно-плазменного разряда, сформированного между электролитическим катодом и металлическим анодом в условиях давления $1 \cdot 10^3 - 10,1 \cdot 10^4$ Па. На основе анализа получены зависимости достижения полированной поверхности изделий. Рассмотрены вопросы расчета коэффициента относительной обрабатываемости и цены на обработку в зависимости от коэффициентов сложности в зависимости от времени обработки, материала, формы и начального параметра Ra шероховатости поверхности, точности обработки. Показаны затраты на расходные материалы, потребляемую мощность при серийном производстве. Разработана конструкция установки для обработки изделия типа фланец. Проведен сравнительный анализ стоимости изготовления оборудования для струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки. Сформулированы правила защиты поверхности изделий и безопасной работы персонала при обслуживании установки струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки.

Ключевые слова: струйная, фокусированная, электролитно-плазменной обработка, коэффициент относительной обрабатываемости, потребляемая мощность, материалы

Ссылка при цитировании:

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. 54–70. DOI: 10.18721/JEST.25405

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

A.I. Popov, A.I. Popova, D.A. Popova

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF JET ELECTROLYTIC PLASMA PROCESSING

The article discusses technological aspects of using jet focused electrolytic plasma treatment on the example of a part such as a flange made of steel 45X. We have established that it was technologically possible to use electrolytic plasma discharge generated between the electrolytic cathode and the metal anode under pressure of $1 \cdot 10^3 - 10,1 \cdot 10^4$ Pa. Based on analysis, we have obtained the dependences for achieving polished surface of products. We have considered calculation of relative machinability coefficient and price for



processing depending on complexity coefficients depending on processing time, material, shape and initial parameter Ra of surface roughness, processing accuracy. We have found the costs of consumables, power consumption in repetitive production. We have developed the design of a device for treatment of flange-type products. We have carried out comparative analysis of the costs for manufacturing equipment for jet focused electrolytic plasma treatment. We have formulated rules for protection of product surface and safe operation of personnel during servicing of units of jet focused electrolytic-plasma treatment.

Keywords: jet, focused electrolytic plasma treatment, relative machinability factor, power consumption, materials

Citation:

A.I. Popov, A.I. Popova D.A. Popova, Technological aspects of jet electrolytic plasma processing, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 25 (04) (2019) 54–70. DOI: 10.18721/JEST.25405

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Внедрение новых технологических процессов в условиях производства в большинстве случаев вызывает значительное количество вопросов и затруднений. Это связано с несколькими основными факторами, такими как устоявшиеся традиции использования оборудования определенного типа, необходимость перестройки технологического процесса, изучение новых физически более сложных процессов, изменение штатной структуры, дополнительные материальные затраты, и в целом изменение условий труда работников. Преодоление указанных факторов осуществляется значительно быстрее и более комфортно, когда результат внедрения существенно перекрывает вложенные затраты. При этом условия труда сотрудников в части снижения трудоемкости, улучшения экологии и культуры производства выигрышно отличаются от предыдущих технологий.

Одним из таких технологических процессов, требующих замены ручного труда и экологически «не безупречной» технологии является технология ручного шлифования и полирования [1]. Качество работ при данной технологии зависят в значительной мере от человеческого фактора. При этом работники, выполняющие данную функцию в течении длительного периода (нескольких лет) подвержены заболеваниям легких (силикоз) и болезням рук (анемия и др.).

При этом, в большинстве случаев пока не найдено полноценной альтернативы ручному шлифованию и полированию геометрически сложных изделий, имеющих сплайновые поверхности. Среди альтернативных методов ручного шлифования и полирования можно отметить метод виброабразивной полировки [2], метод безабразивной ультразвуковой финишной обработки (БУФО) наружных слоев изделия [3], метод электро-эрозионной полировки [4], метод магнитно-абразивной обработки (МАО) [5, 6], метод гидроабразивной полировки [7], электрохимической полировки [8]. Анализ показывает, что самым простым методом является метод ручного полирования, однако метод характеризуется отсутствием стабильного результата, опасностью для исполнителя, необходимостью постоянного отслеживания и обновления полировального материала, а также высокой трудоемкостью. Метод виброабразивной полировки для изделий такой формы применим, но требует дополнительной ориентации изделия. Метод БУФО является конкурентоспособным для обработки тел с простой геометрической формой. Методы, основанные на магнитной, электроэрозионной и гидроабразивной обработке, характеризуются высокой стоимостью оборудования.

Один из методов способных заменить трудоемкие операции полирования и частично

шлифования и при этом составить конкуренцию альтернативным вариантам, является быстро распространяющийся на рынке России и Беларуси, Молдовы метод электролитно-плазменного полирования в электролитических ваннах [9–19]. К преимуществам данного процесса относятся высокая производительность процесса, большие по объему электролитические ванны с мощными 2000–5000 кВт источниками питания, значительные открытые площади электролитов. К недостаткам метода можно отнести, наличие испарений электролита с больших площадей, повышенный уровень шума в зоне обслуживания, а также ограничения по площади обрабатываемой поверхности, не высокая точность обработки тонких кромок и углов деталей.

Альтернативой электролитно-плазменной обработки в ванне является метод струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки [20, 21]. К недостаткам метода можно отнести среднюю производительность и относительную сложность системы управления. Однако данный метод обладает несомненными преимуществами по сравнению с обработкой в ванне. К ним можно отнести отсутствие теплового воздействия на обрабатываемое изделие [22]. Максимальная температура в зоне обработки фокусированной струи не превышает 168 °С. Это определяет отсутствие зон термического влияния и невозможность снизить твердость детали в процессе обработки. Процесс струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки является значительно менее энергозатратным. Потребляемая мощность фокусированного электролитно-плазменного разряда составляет 0,3–5 кВт. Процесс характеризуется низким уровнем воздействия на окружающую среду и персонал благодаря использованию водных электролитов низкой концентрации малыми выбросами паров в окружающую среду, низким уровнем шума от трансформатора и самой зоны разряда. Данный метод обработки позволяет обра-

батывать изделия любых площадей и разных конфигураций. В отечественной и зарубежной литературе представлены результаты проведенных фундаментальных и прикладных исследований [20–32] по струйной фокусированной обработке. Однако результаты применения технологии является малоизученными.

Поэтому целью нашей работы было выявить технологические аспекты применения технологии струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки на примере детали типа фланец.

К задачам работы относятся определение технологических областей применения метода, обрабатываемость различных материалов, сложности получения заданного параметра шероховатости для изделия типа фланец, расчет операционного времени обработки, расчет стоимости обработки, формирование структуры установки, оценка затрат на производство одного изделия.

Объект исследования и оборудование

В качестве технологического изделия нами была рассмотрена деталь типа фланец, монтируемая на коробке передач. В качестве поверхности для обработки была выбрана цилиндрическая поверхность $\varnothing 110$ мм и длиной 30 мм. Необходимость полирования поверхности фланца обусловлена требованиями к сопряжению данной поверхности с резиновым уплотнением, обеспечивающим отсутствие пропускание масла из коробки редуктора. Исходный параметр Ra 0,4 мкм шероховатости поверхности не обеспечивает выполнение данного требования. Поэтому обработку данной поверхности предложено проводить струйной фокусированной электролитно-плазменной обработкой на установке, разработанной авторами работы [27]. В качестве инструмента для обработки выбрано устройство с наборным токоподводом [28]. Принципиальная схема полирования детали типа фланец струйной – электролитно-плазменной обработкой продемонстрирована на рис. 1.

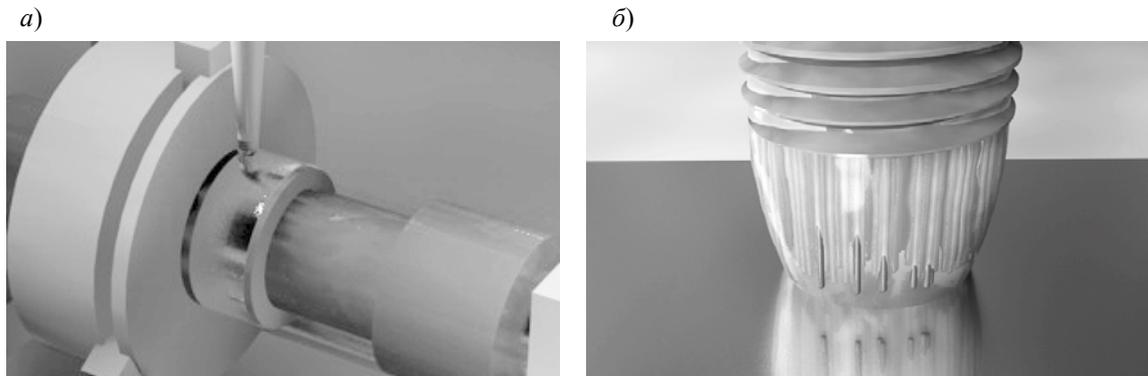


Рис. 1. Схема полирования детали типа фланец струйной – электролитно-плазменной обработкой: а) зона обработки фланца; б) обработка поверхности наборным токоподводом

Fig. 1. Polishing diagram of flange by jet – electrolytic-plasma treatment: а) zone of flange treatment; б) surface treatment with dial current lead

Анализ обрабатываемости при СФЭПО

Для оценки сложности выполняемых работ для изделий типа фланец нами выполнен анализ обрабатываемости изделий разных геометрических форм, материалов, разного начального и конечного уровня шероховатости струйной фокусированной обработкой. По результатам анализа предложено уравнение определяющие относительную обрабатываемость K изделий имеющих различную форму, разные материалы, и разный исходный и конечный параметр Ra шероховатости поверхности.

$$K = \frac{V_{\Sigma}}{V_{\vartheta}} = \frac{K_{\Phi} K_M K_{Ra} K_{So} K_{IT}}{V_{\vartheta}}, \quad (1)$$

где V_{Σ} – скорость получения полированной поверхности зависящая от группы факторов; V_{ϑ} – эталонная скорость получения полированной поверхности, принятая за 1; K_{Φ} – коэффициент сложности обработки формы; K_M – коэффициент сложности обработки заданного материала; K_{Ra} – коэффициент сложности получения заданного параметра Ra шероховатости при разном начальном уровне параметра Ra шероховатости поверхности; K_{So} – коэффициент сложности получения заданного параметра Ra шероховатости поверхности от подачи токоподвода; K_{IT} – коэффициент сложности получения заданного параметра точности размера изделия в соответствии с требованиями чертежа.

Анализ показывает, что K_{Φ} изменяется в широких пределах и зависит прежде всего от того где находится струйный электролитический катод, формирующий электролитно-плазменный разряд на поверхности изделия снаружи поверхности или внутри. Электролитический катод без труда производит полировку простых плоских и цилиндрических поверхностей (табл. 1). Однако для изделий, имеющих криволинейную сплайновую поверхность, изменяющуюся в трех координатах, сложность обработки увеличивается, прежде всего, за счет организации сложного движения, требующего дополнительной координаты.

Среди таких сложных изделий следует отметить криволинейную поверхность турбинных лопаток [13], моноколес [8], блисков. Определенную сложность также представляет обработка с меняющимся рельефом поверхности, такая как крупная сетка и изменяющийся поверхностный рельеф с чередованием мелкоразмерного и крупного профиля. Отдельную трудность, значительно увеличивающую сложность обработки поверхности является обработка внутренней поверхности, что требует организации электролитно-плазменного разряда внутри полости [32]. Данную задачу всегда приходится решать своим набором технологических приемов и технологической оснастки.

Таблица 1

Коэффициент K_f сложности обработки формы

Table 1

Complexity factor K_f from form processing

№	Геометрическая форма	K_f
1	Плоскость	1
2	Параллелепипед	1
3	Плоская мелкая сетка	1,2
4	Цилиндрическая форма	1,5
5	Наружная поверхность трубы	1,6
6	Резьбовая поверхность (мелкий профиль)	1,6
7	Цилиндр с одним фланцем	1,7
8	Цилиндр с двумя фланцами с обеих сторон	1,8/1,9
9	Коническая поверхность	2
10	Криволинейная поверхность тела вращения	2,5
11	Внутренняя коническая поверхность кольца при $d_{вн} \geq 3h$	2,6–2,8
12	Внутреннее неглубокое отверстие при $d > h$	3
13	Наружная поверхность сферы	3
14	Крупная сетка	3
15	Резьбовая поверхность (крупный профиль)	3
16	Сплайновая поверхность 3D	3
17	Изогнутая мелкая сетка	3
18	Внутренняя поверхность сферы	3,5
19	Объемное изделие сложной геометрической формы (лопатки турбины)	3,5
20	Тело вращения сложной геометрической формы	3,5
21	Изогнутая труба	4
22	Изогнутая крупная сетка	5
23	Объемное изделие сложной геометрической формы (скульптурная форма, моноколеса, блиски)	6–7
24	Внутренняя поверхность трубы	7
25	Внутренняя поверхность трубы прямоугольного сечения	8/9
26	Внутренняя резьбовая поверхность	10

Оценка коэффициента K_m сложности обработки заданного материала производилась на основе источников литературы и результатов

проведенных исследований в лаборатории «Струйной электролитно-плазменной обработки». Это позволила оценить коэффициент K_m сложности полировки обрабатываемых материалов при СФЭПО. Наилучшее снижение параметра R_a шероховатости поверхности при СФЭПО достигается при полировке нержавеющей сталей и сплава на кобальтовой основе. При этом наблюдается, как повышение отражающей способности образцов, так и уменьшение параметра R_a шероховатости поверхности. Средней способностью снижения параметра R_a шероховатости поверхности при СФЭПО обладают инструментальные стали, сплавы меди. При этом для инструментальных сталей ХВГ наблюдается уменьшение параметра R_a шероховатости поверхности, при матовой поверхности образцов. Еще более низкой полируемостью обладают вентильные металлы, алюминий, титан. Прежде всего это происходит за счет образования рыхлой оксидной пленки в процессе обработки и сложности ее удаления [29]. Для этого авторами работы [12] применяется двухступенчатое полирование в разных электролитах.

Таблица 2

Коэффициент K_m сложности полировки заданного материала

Table 2

Complexity factor K_m from specified material

№	Материал	K_m
1	Нержавеющая сталь AISI 304	1
2	Кобальтовый сплав	1,1
3	Нержавеющая сталь 09X18H9T	1,2
4	Теплостойкая сталь 20X13	1,3
5	Медь	1,4
6	Латунь	1,5
7	Сталь 45X	1,8
8	ХВГ	1,8
9	15ХМФШ	1,9
10	Алюминий	2
11	Титан	3

При оценке коэффициента K_{Ra} сложности получения заданного параметра шероховатости при разном начальном уровне шероховатости Ra учитывалось, что в зависимости от требуемого параметра Ra шероховатости поверхности при равной площади обработки, как правило увеличивается время воздействия для получения необходимого результата [33]. Наилучшие результаты показываются при снижении параметра шероховатости на 1–2 класса. В значительной степени это зависит от величины исходной шероховатости поверхности. С увеличением параметра Ra шероховатости поверхности увеличивается время необходимое для удаления вершин микронеровностей. Нами выполнены работы по удалению различных уровней шероховатости поверхности. Максимальное снятие поверхностного слоя, достигнутое СФЭПО показано в работе [30]. Это удаление микропрофиля поверхности после обработки ленточной пилой стали 20X13 до параметра Ra шероховатости поверхности равным 0,2 мкм, с использованием токоподвода в виде магнетронной распылительной головки [31]. Соответственно увеличение параметра Ra шероховатости поверхностного слоя до 12,5 и выше увеличивает время обработки, требует применения дополнительных токоподводов. Минимальный уровень параметра Ra шероховатости поверхности достигнутый нами при СФЭПО составил 0,034 мкм [32].

При обработке изделий в электролитической ванне характерно снижение на 2–3 класса шероховатости [13]. Однако струйная обработка обладает более широкими технологическими возможностями. При оценке K_{So} учитывается, что для струйной фокусированной обработки можно говорить о снижении на 5–6 классов шероховатости и выше [31]. При выполнении отдельных решений возможна обработка изделий из металлургического проката и поверхностей, сформированных чистовым точением [23], чистовым фрезерованием, предварительным шлифованием, поверхностей, полученных 3D – печатью до параметра Ra шероховатости 1,4 мкм и ниже [24]. Данные по величине K_{So} приведены в табл. 4.

Таблица 3

Коэффициент K_{Ra} сложности получения заданного параметра шероховатости при разном начальном уровне шероховатости Ra

Table 3

Complexity factor K_{Ra} obtaining the specified roughness parameter at different initial roughness level Ra

№	Параметр Ra шероховатости поверхности, мкм		K_{Ra}
	исходный	полученный	
1	0,4	0,2	1
2	0,8	0,4	1,8
3	0,8	0,2	2
4	0,4	0,1	3
5	0,8	0,1	4
6	0,8	0,04	5

Таблица 4

Коэффициент K_{So} сложности получения заданного параметра шероховатости от подачи токоподвода

Table 4

Complexity factor K_{So} of obtaining the specified roughness parameter Ra from feed rate of current lead

№	Исходный параметр Ra шероховатости поверхности, мкм	Подача катодного модуля на оборот So , мм/об	Требуемый параметр Ra шероховатости поверхности	K_{So}
1	0,8	6	0,4	1,3
2	0,8	4	0,2	2
3	0,4	5	0,2	1
4	0,4–0,8	4	0,1	3
5	0,8	3	0,08	4
6	0,4–0,8	2	0,06	5
7	0,4–0,8	1	0,03/0,04	6

Исходя из функционального назначения СФЭПО обработка поверхности происходит в ограниченной зоне [21]. Геометрически форма зоны обработки при длительном более 3–5 мин полировании имеет форму части сферы, плавно сопрягаемую с основной поверхностью. При

Таблица 5

Расчет операционного времени СФЭПО от скорости подачи токоподвода

Table 5

Calculation of operating time of jet electrical-plasma treatment from feed rate of current lead

π	D , мм	l , мм	Коэффицици-ент	Подача, мм/об	Длина пути токопод-вода, м	Линейная скорость перемеще-ния, м/мин	Время обра-ботки, мин	Линейная скорость перемеще-ния, м/мин	Время обра-ботки, мин	Линейная скорость перемеще-ния, м/мин	Время обра-ботки, мин
3,14	110	30	1000	1	10,36	0,05	207,24	0,1	103,62	0,2	51,81
3,14	110	30	1000	2	5,18	0,05	103,62	0,1	51,81	0,2	25,91
3,14	110	30	1000	3	3,45	0,05	69,08	0,1	34,54	0,2	17,27
3,14	110	30	1000	4	2,59	0,05	51,81	0,1	25,91	0,2	12,95
3,14	110	30	1000	5	2,07	0,05	41,45	0,1	20,72	0,2	10,36
3,14	110	30	1000	6	1,73	0,05	34,54	0,1	17,27	0,2	8,64

ускоренном перемещении токоподвода происходит безразмерная обработка изделия. Однако при длительном вращении изделия без движения продольной подачи на изделии может образоваться канавка, а для фиксированных тонкостенных материалов может образовываться отверстие. Поэтому малая подача и большое число проходов приводит к существенному снижению параметра Ra шероховатости, снижает погрешности поверхности и приближает поверхность к номинальному профилю. Данные по величине подачи и времени обработки изделия типа фланец приведены в табл. 5.

Важным параметром для изделия является технологическое поле допуска. Для учета данного параметра при СФЭПО предлагается использовать коэффициент K_{IT} сложности получения заданного параметра от точности размера (табл. 6). Величина данного коэффициента увеличивается с уменьшением поля допуска и характеризует необходимость точного управления скоростью съема в зависимости от скорости перемещения токоподвода. уменьшение поля допуска исключает остановку токоподвода во время полирования и требует снижения скорости съема материала, прежде всего за счет уменьшения концентрации электролита.

Это в конечном счете приводит к увеличению времени отработки технологии и увеличению времени обработки изделия.

Таблица 6

Коэффициент K_{IT} сложности получения заданного параметра точности размера

Table 6

Complexity factor K_{IT} of obtaining the specified parameter of dimension accuracy

Поле допуска размера, мкм	1000	100	50	5
Величина K_{IT}	1	1,1	1,2	1,3

Для полирования стали 45X подобраны электролиты с растворами солей низкой концентрации. При выборе электролитов руководствовались прежде всего классом опасности солей и остановились на солях 3–4 класса опасности. Данные вещества оказывают при длительном воздействии раздражающее действие. Данные растворы электролитов при разбавлении проточной водой допускается утилизировать в канализацию. В табл. 7 приведено расчетное количество деталей которое можно обработать при использовании 1 кг применяемой соли, а также приведены затраты по выбранному электролиту на одну деталь.

Таблица 7

Соли, применяемые при СФЭПО для стали 45Х

Table 7

Salts used in jet electrolytic-plasma treatment for steel 45X

Электролит	Концентрация	Класс опасности ГОСТ 12.1.007–76	Розничная цена за 0,5 кг, руб. (без НДС)	Розничная цена за 1 кг, руб. (без НДС)	Объем электролита, л	Сколько деталей можно обработать	Затраты на 1 шт. (деталь), руб.	Затраты на 1000 шт. (деталей), руб.
NH ₄ CL	4%	3	2 062,5	4125	25,00	125,00	16,50	16500,00
Na ₂ SO ₄	3%	4	150	300	33,33	166,67	0,90	900,00
K ₂ SO ₄	3%	3	175	350	33,33	166,67	1,05	1050,00
Na ₂ SO ₄ +K ₂ SO ₄	3%	3	162,5	325	33,33	166,67	0,98	975,00
(NH ₄) ₂ SO ₄	4%	4	121	242	25,00	125,00	0,97	968,00
NaCL	4%	4	50	100	25,00	125,00	0,40	400,00
Na ₂ CO ₃	12 %	4	167	334	8,33	41,67	4,01	4008,00

Суммарная мощность установки для СФЭПО

Нами была определена суммарная мощность установки СФЭПО для полирования стали 45Х в условиях промышленного производства. При работе установки потребляемая мощность затрачивается на себя формирование электролитно-плазменного разряда, поддержание стабильности работы и параметров разряда за счет системы подогрева электролита, подачу электролита в зону обработки, перемешивания электролита для создания равных условий по времени обработки, мощность затрачиваемая на организацию перемещения токоподвода, освещение рабочей зоны установки, очистку электролита при перед его утилизацией, работу приточно-вытяжной вентиляции, работу вакуумного насоса при удалении газообразных примесей из рабочей зоны. Диапазон суммарной мощности всех устройств при организации процесса электролитно-плазменного полирования для одной детали типа фланец составил 1,7–6,3 кВт. Параметры систем, обеспечивающих процесс электролитно-плазменного полирования показан в табл. 8.

При анализе затрат на расходные материалы для СФЭПО стали 45Х были учтены максимально возможные потребности при произ-

водстве работ по полированию цилиндрической поверхности фланца. Данные затраты приведены в табл. 9 и складываются из электроэнергии, дистиллированной воды, горячей и холодной воды, водоотвода, масла моторного, аргона и жидкого мыла.

Показано, что суммарные затраты на материалы не превышают 50 рублей на один фланец, что может говорить о высокой эффективности процесса.

Расчет стоимости СФЭПО

В соответствии с затратами на материалы, с учетом стоимости аренды помещения, заработной платы исполнителей и сравнительного анализа применяемых сегодня технологий по сварке, лазерному и плазменному раскрою, гравированию, 3D печати нами была оценена стоимость C погонного метра СФЭПО. Диапазон стоимости составил от 20–100 руб., в зависимости от объема партии деталей.

Исходя из этого нами предложена формула для расчета цены $Ц$ обработки для детали типа фланец с учетом разработанных коэффициентов сложности, для деталей с разным исходным и получаемым параметром R_a шероховатости поверхности на условиях аутсорсинга для предприятия производящего детали типа фланец.

Таблица 8

Суммарная мощность установки СФЭПО для стали 45Х

Table 9

Total plant power for jet electrical-plasma treatment for steel 45X

Элемент системы	Функция	Рабочие режимы min-мах	Мощность min	Мощность мах	Мощность на 1 изделие min, Вт	Мощность на 1 изделие мах, Вт
Блок питания установки	Формирование ЭПР	300В-3А 500В-10А	900	5000	300,0	1666,7
Система нагрева электролита	Создание стабильного ЭПР	200 Вт 3000 Вт	200	3000	66,7	1000,0
Система перемещения токоподвода	Обработка поверхности в заданном месте	400–600 Вт	400	600	133,3	200,0
Система освещения	Освещение рабочего пространства	100–200 Вт	100	200	33,3	66,7
Система подачи электролита	Подъем электролита на уровень 1700 мм	400–600 Вт	400	600	133,3	200,0
Система перемешивания электролита	Подготовка электролита	400–600 Вт	400	600	133,3	200,0
Система очистки электролита	Очистка стоков для канализации	400–600 Вт	400	600	133,3	200,0
Система подачи воздуха в рабочую камеру	Удаление вредных примесей из рабочей зоны	150 Вт	150	150	50,0	50,0
Система отвода воздуха из помещения и рабочей камеры вытяжной вентиляцией	Удаление вредных примесей из рабочей зоны	2200 Вт	2200	4000	733,3	1333,3
Система подачи воздуха в рабочую зону приточной вентиляцией	Введение в помещение воздуха с улицы	2200 Вт	2200	4000	733,33	1333,3
Система удаления газов из рабочей камеры вакуумным насосом	Удаление вредных примесей из рабочей зоны	2000 Вт	180	740	60,00	246,6
Итого:			5230	18890	1743,33	6296,6

Таблица 9

Затраты на расходные материалы для СФЭПО стали 45Х

Table 9

Cost of jet electrical-plasma treatment consumables for steel 45X

Предполагаемые затраты	Стоимость, руб. (с НДС)	Ед. изм.	Объем, шт	Расход на одно изделие	Стоимость на одно изделие, руб.
Электроэнергия	4,56	кВт/ч		1,7 – 6,3	7,75–28,73
Дистиллированная вода	4500	л	1000	0,20	0,90
Горячая вода	110,09	м ³	1	0,01	0,55
Холодная вода	37,12	м ³	1	0,00	0,07
Водоотвод	43,5	м ³	1	0,01	0,30
Масло моторное	4785	л	50	0,03	2,87
Аргон	5900	л	40	0,05	7,38
Мыло жидкое	5900	л	50	0,01	1,18
Итого:					21,01–41,99

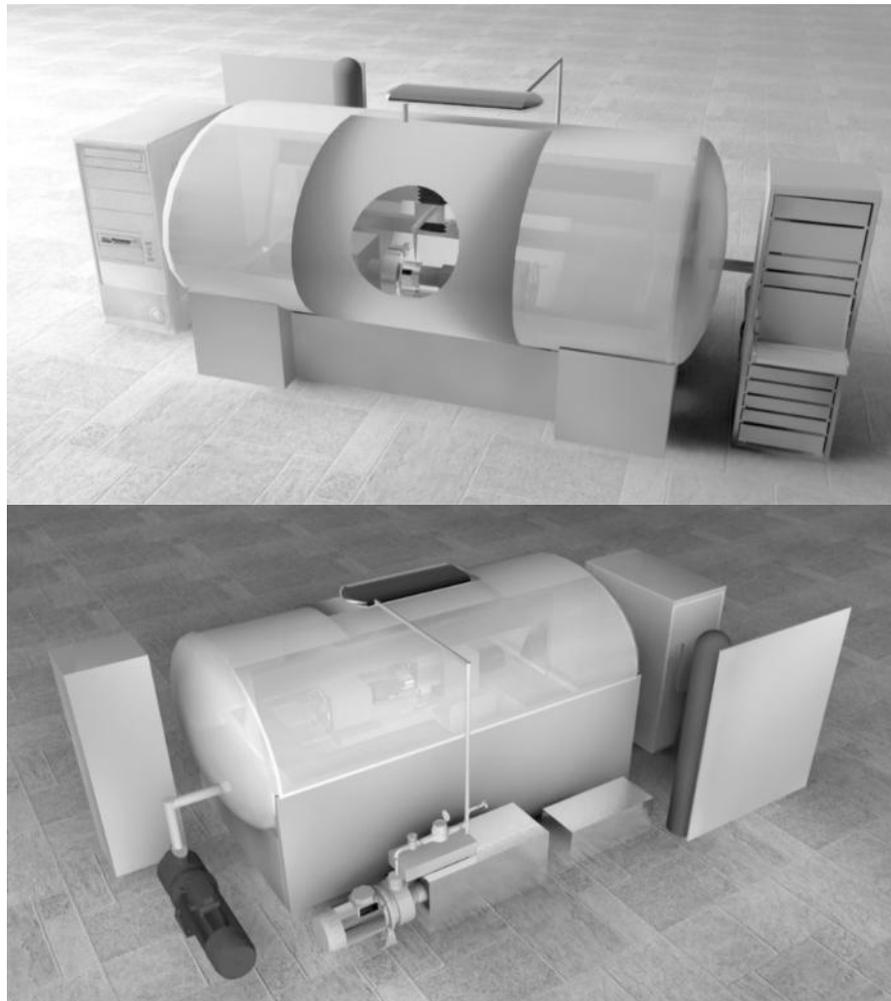


Рис. 2. Проект установки для полирования фланцев
 Fig. 2. Flange polishing installation design

Расчет длины рабочего хода токоподвода проводили по следующей формуле:

$$L = \pi \cdot d \cdot l / 1000 \cdot S_0, \quad (2)$$

где d – диаметр полируемой поверхности, мм; l – длина полируемой поверхности, мм; S_0 – подача токоподвода, мм/об.

Расчет цены работ по полировке одной детали производился по формуле:

$$\begin{aligned} Ц &= C \cdot L \cdot K = C \cdot l \cdot \frac{V_{\Sigma}}{V_{\text{э}}} = \\ &= C \cdot L \cdot \frac{K_{\text{ф}} \cdot K_{\text{м}} \cdot K_{\text{Ra}} \cdot K_{S_0} \cdot K_{\text{IT}}}{}, \end{aligned} \quad (3)$$

где C – стоимость погонного метра, руб.; L – длина пути токоподвода для получения поли-

рованной поверхности, м; K – коэффициент относительной обрабатываемости.

Высокий показатель цены СФЭПО для первой партии деталей, как правило обусловлен тем, что на мелкую партию учитываются затраты, по разработке и изготовлению технологических приспособлений, подготовке программного обеспечения, выборе необходимого электролита, разработке схемы обработки и конструкции токоподвода, отработке технологических режимов, оценке параметров шероховатости и морфологии поверхности. Для выпуска деталей, имеющих разный объем партии, стоимость обработки уменьшается с учетом годовой загрузки оборудования.

Анализ рыночных предложений по 4-х координатным станкам

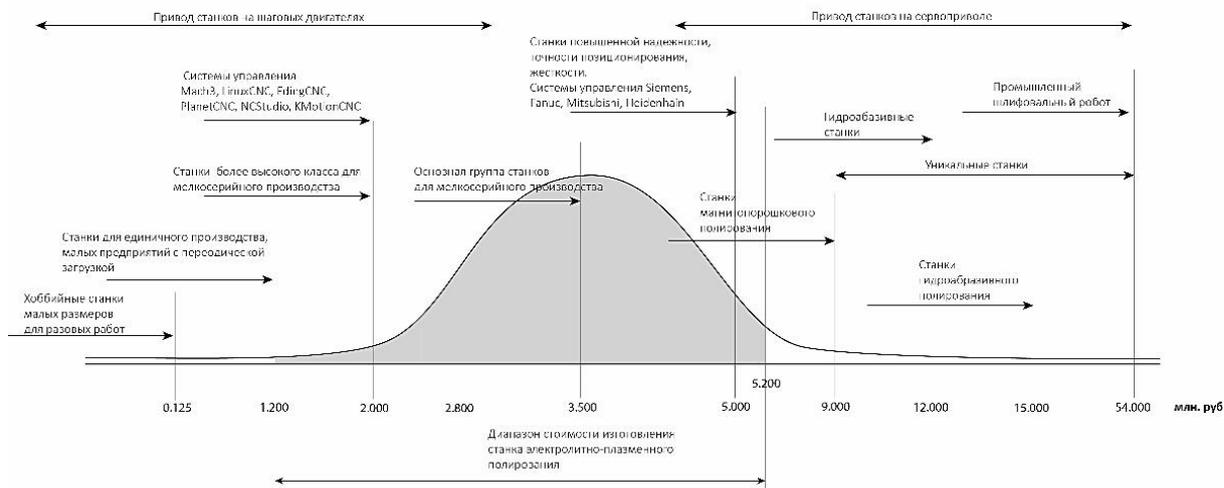


Рис. 3. Анализ стоимости изготовления оборудования
 Fig. 3. Equipment manufacturing cost analysis

Проект установки для полирования фланцев

Исходя из требований к СФЭПО для детали типа фланец на базе работы [27] нами был разработан проект установки, в конструкции которой по возможности учитывались бы все современные достижения в области струйной электролитной плазменной обработки. Установка имеет изолированный защитный корпус от поражения электрическим током.

Для защиты персонала от паров электролитно-плазменного разряда при длительной эксплуатации устройства предусмотрено создание предварительного вакуума до $1 \cdot 10^3$ Па. Разряжение обеспечивается вакуумным насосом. Установка оснащена блоком питания и блоком управления. Установка также оснащена ванной подготовки электролита и емкостью для нагрева электролита расположенной сверху над изолированным защитным корпусом. Внутри защитного корпуса расположена система автоматизированного перемещения токоподвода и вращения заготовки детали типа фланец. Проект установки в виде трехмерной модели представлен на рис. 2.

Анализ стоимости изготовления оборудования

При проектировании установки, нами был проведен анализ стоимости оборудования в широком ценовом диапазоне (рис. 3). За кри-

терий было выбрано оборудование позволяющие осуществлять согласованное автоматизированное движение не менее, чем в четырех координатах. Три координаты необходимы для подвода токоподвода к изделию и четвертая координата необходима для вращения детали типа фланец вокруг своей оси.

Анализ показал, что ценовой диапазон оборудования до 0,125 млн руб. относится к станкам хоббийной группы. Станки стоимостью до 1,2 млн руб., как правило приобретаются предприятиями с периодической загрузкой данного оборудования. Станки до 2,0 млн руб. выпускаются на различных контроллерах с известными программами управления такими как Mach3, Linux CNC, Planet CNC, Eding CNC, NCStudio, KMotion CNC. Оборудование с использованием данных программ занимает нишу станков среднего класса и как правило использующихся в мелкосерийном производстве при выпуске изделий с не жесткими допусками. Основную нишу станков для мелкосерийного производства занимают станки в ценовом диапазоне 3,5 млн руб. Как правило это станки с азиатского (Китай, Корея и др) или отечественного рынка. Данные станки имеют жесткую сварную станину и оснащены электроникой как правило фирмы производителя. Станки более высокой степени



жесткости, надежности, возможно с литой станиной и системой управления ведущих мировых производителей Fanuc, Mitsubishi, Siemens, Heidenhain, оснащенные системой точного позиционирования приближаются к отметке 5 млн руб. Узкоспециализированные станки для полирования магнитопорошковым методом, гидроабразивной струей, электроэрозией, промышленные шлифовальные станки имеют высокую стоимость более 54 млн руб.

Для метода СФЭПО нами определен диапазон стоимости изготовления станка для использования в промышленном производстве в размере от 1,4–5,2 млн руб.

Нижний ценовой порог определен, тем что по сути в большинстве случаев зона полирования не требует четко обозначенных границ и может быть размытой. В отдельных случаях обработки достаточно нанесения защитной маски, или защиты границы края скотчем, лентой, и др. Поэтому для технологического применения метода СФЭПО на наш взгляд достаточно точности позиционирования токоподвода до 0,1 мм. Для ответственных и дорогостоящих деталей или обработки внутренних мелкогабаритных контуров точность позиционирования может быть уменьшена, за счет увеличения металлоемкости, жесткости конструкции станка и формирования обратной связи при позиционировании токоподвода, что в целом приводит к увеличению стоимости оборудования.

Безопасность работ при СФЭПО

Для устойчивой работы установки предусмотрено размещение ее на территории цеха, с выделением для установки отдельного закрытого помещения. Пол данного помещения должен быть выложен кафелем. Для данного помещения должна быть предусмотрена система приточной и вытяжной вентиляции. В случае работы установки без создания предварительного вакуума необходим подвод патрубков локального отсоса воздуха из зоны обработки. Кроме этого необходимо подключение к водопроводу и наличие выводов фановых труб. В

процессе работы установки как для любого технологического оборудования имеются следующие риски, поражение электрическим током, получение раздражения кожи, при сильных концентрациях электролита возможно получение ожогов дыхательных путей, получение травм при попадании частей тела или одежды во вращающиеся и двигающиеся узлы установки. Возможность поражения электрическим током возникает при замыкании межэлектродного промежутка между токоподводом и изделием незащищенной частью тела. Для предотвращения этого в установке предусмотрена закрытая изолированная конструкция, визуализация индикатора напряжения, ступенчатая система отключения напряжения при смене детали, автоматическая блокировка напряжения, наличие ручного контактора, замыкающего цепь напрямую, позиционирование катодного модуля при смене детали в координате «0», исключающей замыкание цепи. Возможность получения раздражения кожи, при сильных концентрациях возможно получение ожогов дыхательных путей. Для предотвращения этого предусмотрено наличие приточно-вытяжной вентиляции в помещении. Формирование предварительного разряджения, а в случае его отсутствия подвод отсасывающих патрубков в зоне обработки. Применение слабо концентрированных солевых растворов от 3–20 г/л водопроводной воды. Используемые соли относятся к 3, 4-му классу опасности. Использование нетоксичных электролитов слабой концентрации солей позволяет утилизировать отработанные растворы через городскую канализацию. Использование средств индивидуальной защиты. Возможность получения травм при попадании частей тела или одежды во вращающиеся части установки, а также двигающиеся узлы. Для предотвращения этого установка оснащена закрытым корпусом, на передней панели которого расположена кнопка аварийного отключения, вторая аварийная кнопка установлена на блоке управления установкой. Риски взрыва и возгорания отсутствуют вследствие малого объ-

ема электрического разряда до 2–5 см² и низкой концентрации выделяемых кислорода и водорода. При попытке поднесения открытого огня к плазменному разряду раздается негромкий хлопок.

Защита изделий при СФЭПО

В зависимости от концентрации и типа электролит может воздействовать на поверхность, даже без приложения потенциала, т.к. с повышением класса опасности увеличивается и коррозионная способность электролита. Однако это более характерно для сильных электролитов, содержащих в своем составе значительную долю кислот, таких как плавиковая, соляная, серная, фосфорная являющихся сильными окислителями. При использовании электролитов 3,4-го класса воздействие на поверхность детали при попадании на нее электролита при СФЭПО сильно снижается. При кратковременном воздействии данные виды электролитов оказывают слабое влияние на окисление поверхности изделия. Однако, чтобы свести к минимальному воздействию капель электролита на поверхность детали предусматривают защиту поверхностей детали не подлежащих обработки. Это достигается экранированием пленкой, нанесением тефлонового покрытия, дезактивацией поверхности детали промывкой в горячей воде (щелочным мыльным раствором) с последующей сушкой, а также опускание детали после промывки в горячее машинное масло.

Обсуждение полученных результатов

Не смотря на длительный период изучения процесса электролитно-лазменного разряда более 200 лет [30]. Практическое его применение

для нагрева заготовок началось не так давно, около 90 лет назад [30]. Полирование деталей в электролитических ваннах, по нашей оценке, насчитывает около 35 лет [31]. Процесс струйной электролитно-плазменной обработки насчитывает еще меньший период времени [20]. Однако на молодой возраст технологии СФЭПО позволяет прогнозировать широкое применение данной технологии как в крупной и средней промышленности, так и для использования в мелких кустарных мастерских и в условиях гаражного творчества. Экономическая оценка показывает минимальные затраты на материалы, потребляемую мощность при высокой эффективности процесса. Это по сути открывает возможность практически массового использования технологии, наряду с технологией 3D – печати металла и их совместного использования. К числу экономических проблем к широкому внедрению технологии СФЭПО можно отнести относительно высокую стоимость оборудования. Однако это характерно для всех вновь вводимых продуктов на рынок на начальном этапе. Для широкого внедрения данного технологического процесса на наш взгляд необходимо выполнение следующих условий, снижение габаритных размеров установки прежде всего за счет уменьшения габаритов источника питания, переход на модульные конструкции блоков установки, позволяющих осуществлять быструю переналадку под деталь заданного типа, снижение области полирования до 56–60 В, применение электролитов 3,4 класса опасности, со смещением акцента на физические принципы удаления атомов поверхностного слоя изделия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Буткарев А.И. Полировка. М.: Универсал, 2001. С. 52. URL: <http://depositfilts.com/>.
- [2] Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии, Ростов н/Д: Изд-во ДГТУ, 2008.
- [3] Абрамов В.О., Абрамов О.В., Артемьев В.В., Градов О.М., Коломеец Н.П., Приходько В.М., Эльдарханов А.С. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении. М.: Янус-К, 2006. 688 с.
- [4] Отто М.Ш., Винник В.А., Хобот Л.Р., Лебедев В.Е., Губаревич В.Н. А. с. № 1226749 СССР Способ электроэрозионного полирования. В 23 Н 1/00. 1983. Бюл. № 24.

- [5] **Baron Y.M., Kobchikov V.S.** The influence of magnetic abrasive finishing on performance specification of hard alloys // Technical Paper – Society of Manufacturing Engineers ISAAT 2007. Сер. «ISAAT 2007» Dearborn, MI, 2007.
- [6] **Baron Y.M.** Magnetic Abrasive Deburring Technology for Blanks // International Journal of Engineering Research in Africa. 2016. Vol. 25. P. 1–10.
- [7] **Проволоцкий А.Е., Мохеб Мохаммад, Негруб С.Л.** Способ шлифования и полирования поверхностей деталей свободными абразивами // Прогресивні технології і системи машинобудування. 2009. № 2 (38). С. 204–208.
- [8] **Мозгов С.А., Панов Д.В., Саушкин Б.П.** Улучшение качества поверхностей лопаток моноколёс турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 4 (42). С. 206–212.
- [9] **Словецкий Д.И., Терентьев С.Д., Плеханов В.Г.** Механизм плазменно-электролитного нагрева металлов // ТВТ. 1986. Т. 24, № 2. С. 353.
- [10] Электролитно-плазменная обработка материалов / под ред. И.С. Куликова. Минск: Беларуская навука, НАН Беларусі, Объединенный ин-т энергетических исследований, Сосны, 2010. 232 с.
- [11] **Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М.** Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. В 2-х т.
- [12] **Смыслов А.М., Смыслова М.К., Мингажев А.Д., Селиванов К.С.** Многоэтапная электролитно-плазменная обработка изделий из титана и титановых сплавов // Вестник УГАТУ. 2018. Вып. 13, №. 1 (34). С. 141–145.
- [13] **Новиков В.И., Попов А.И., Тюхтяев М.И., Зейдан М.Н.** Возможности электролитно-плазменного полирования при обработке деталей с различным начальным уровнем шероховатости поверхности // Металлообработка. 2011. № 1 (61). С. 13.
- [14] **Коротких М.Т., Захаров С.В., Волков А.А., Марцинкевич И.А.** Влияние компонентов раствора электролита на нижнюю границу начала процесса электролитно-плазменного полирования // Электрофизические методы обработки в современной промышленности: матер. II Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. 2019. С. 122–128.
- [15] **Кузьмичев И.С., Ушомирская Л.А., Шмельков А.В., Сысоев И.А.** Финишная технология обработки сквозных прямоосных, глубоких, цилиндрических отверстий в металлических изделиях принудительным электролитно-плазменным полированием // Металлообработка. 2017. № 3 (99). С. 21–27.
- [16] **Захаров С.В., Кузьмичев И.С., Ушомирская Л.А.** Разработка установки ЭПП-100 для экструзионного электролитно-плазменного полирования сложнопрофильных внутренних поверхностей // Неделя науки СПбПУ: матер. науч. форума с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта / отв. ред. М.С. Кокорин, 2015. С. 146–148.
- [17] **Алексеев Ю.Г., Королев А.Ю., Паршутто А.Э., Нисс В.С.** Электролитно-плазменная обработка при нестационарных режимах в условиях высокоградиентного электрического поля // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 5. С. 391.
- [18] **Захаров С.В., Коротких М.Т.** Электролитно-плазменное полирование сложнопрофильных изделий из сплава Д16 // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2017. № 3. С. 83–87.
- [19] **Ушомирская Л.А., Новиков В.И.** Полирование легированных сталей в нетоксичных электролитах при высоком напряжении // Металлообработка: науч.- производ. журн. 2008. № 1(58). С. 23–25.
- [20] **Гайсин Ф.М., Сон Э.Е.** Электрические разряды в парогазовой среде с нетрадиционными электродами // Энциклопедия низкотемпературной плазмы / под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2000. С. 241.
- [21] **Popov A.I., Novikov V.I., 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. 483–495.
- [22] **Попов А.И., Тюхтяев М.И., Радкевич М.М., Новиков В.И.** Анализ тепловых явлений при струйной фокусированной электролитно-плазменной обработке // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2016. № 4 (254). С. 141.
- [23] **Ablyaz T.R., Muratov K.R., Radkevich M.M., Ushomirskaya L.A., Zarubin D.A.** Electrolytic plasma surface polishing of complex components produced by selective laser melting // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38, no. 6, P. 491–492.

[24] **Ablyaz T.R., Muratov K.R., Ushomirskaya L.A., Zarubin D.A., Sidhul S.S.** Electrolytic plasma polishing for improved surface finish of machined components // *Engineering Solid Mechanics*. 2019. Vol. 57, no. 4. P. 263–281.

[25] **Witzke M., Rumbach P., Go D.B., Sankaran R.M.** Evidence for the electrolysis of water by atmospheric-pressure plasmas formed at the surface of aqueous solutions // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2012. Vol. 45. P. 5.

[26] **Галимзянов И.И., Гайсин Ал.Ф., Фахрутдинова И.Т., Шакирова Э.Ф., Ахатов М.Ф., Каюмов Р.Р.** Некоторые особенности развития электрического разряда между струйным анодом и жидким катодом // *ТВТ*. 2018. Т. 56, № 2. С. 306.

[27] **Попов А.И., Радкевич М.М., Кудрявцев В.Н., Захаров С.В., Кузьмичев И.С.** Установка для электролитно-плазменной обработки турбинных лопаток. Патент на изобретение РФ № 2623555. Кл. МПК: С25F7/00. 27.06.2017.

[28] **Попов А.И., Радкевич М.М., Медко В.С., Новоселов М.В.** Устройство для электролитно-плазменной обработки металлических изделий. Патент на изобретение РФ № 2681239. Кл. МПК: С25F7/00. 13.06.2018.

[29] **Popov A.I., Travina E.A.** Electrolytically plasma processing of titanium VT1-0 // *Электрофизические методы обработки в современной промышленности: матер. II Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов, 18–20 декабря 2018 г. Пермь*. 2018. 87 с.

[30] **Новоселов М.В., Шиллинг Н.Г., Рудагин А.А., Радкевич М.М., Попов А.И.** Оценка возможности полирования нержавеющей стали струйной электролитно-плазменной обработкой // *Вестник ПНИПУ*. 2018. № 1. С. 95.

[31] **Попов А.И., Радкевич М.М., Медко В.С., Шиллинг Н.Г., Рудагин А.А.** Магнетронная распылительная головка. Патент на изобретение РФ № 2656318. Кл. МПК: С23С14/35. 04.06.2018.

[32] **Попов А.И.; Радкевич М.М.; Новоселов М.В.** Особенности электролитно-плазменного полирования стенов // *Технология металлов*. 2019. № 5. С. 18.

[33] **Danilov I., Hackert-Oschätzchen M., Zinecker M., Meichsner G., Edelmann J., Schubert A.** Process Understanding of Plasma Electrolytic Polishing through Multiphysics Simulation and Inline Metrology // *Micromachines*. 2019. 10(3). P. 214.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ПОПОВ Александр Иннокентьевич — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: profbaikl@yandex.ru

ПОПОВА Алла Ивановна — кандидат экономических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: aipopoffa@yandex.ru

ПОПОВА Диана Александровна — инженер-конструктор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: a.diana.popova@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 26.09.2019

REFERENCES

[1] **Butkarev A.I.** Polirovka. M.: AB Universal, 2001, p. 52. URL: <http://depositfilts.com/>

[2] **A.P. Babichev, I.A. Babichev,** *Osnovy vibratsionnoy tekhnologii*. Rostov n/D: Izd-vo DGTU, 2008.

[3] **V.O. Abramov, O.V. Abramov, V.V. Artemyev, O.M. Gradov, N.P. Kolomeyets, V.M. Prikhodko, A.S. Eldarkhanov,** *Moshchnyy ultrazvuk v metallurgii i mashinostroyenii*. M.: Yanus-K, 2006.

[4] **M.Sh. Otto, V.A. Vinnik, L.P. Khobot, V.Ye. Lebedev, V.N. Gubarevich,** A. s. № 1226749

SSSR Sposob elektroerozionnogo polirovaniya. V 23 N 1/00. 1983. Byul. № 24.

[5] **Y.M. Baron, V.S. Kobchikov,** The influence of magnetic abrasive finishing on performance specification of hard alloys, Technical Paper — Society of Manufacturing Engineers ISAAT 2007. Ser. «ISAAT 2007» Dearborn, MI, 2007.

[6] **Y.M. Baron,** Magnetic Abrasive Deburring Technology for Blanks, International Journal of Engineering Research in Africa, 25 (2016) 1–10.

- [7] **A.Ye. Provolotskiy, Mokheb Mokhammad, S.L. Negrub**, Sposob shlifovaniya i polirovaniya poverkhnostey detaley svobodnymi abrazivami, *Progressivni tekhnologii i sistemi mashinobuduvannya*, 2 (38) (2009) 204–208.
- [8] **S.A. Mozgov, D.V. Panov, B.P. Saushkin**, Uluchsheniye kachestva poverkhnostey lopatok monokoles turbomasosnykh agregatov zhidkostnykh raketnykh dvigateley, *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 4 (42) (2013) 206–212.
- [9] **D.I. Slovetskiy, S.D. Terentyev, V.G. Plekhanov**, Mekhanizm plazmenno-elektrolitnogo nagreva metallov, *TVT*, 24 (2) (1986) 353.
- [10] *Elektrolitno-plazmennaya obrabotka materialov*. Pod red. I.S. Kulikova. Minsk: Belaruskaya navuka, NAN Belarusi, Obyedinenny in-t energeticheskikh issledovaniy, Sosny, 2010.
- [11] **I.V. Suminov, P.N. Belkin, A.V. Epelfeld, V.B. Lyudin, B.L. Krit, A.M. Borisov**, Plazmenno-elektroliticheskoye modifitsirovaniye poverkhnosti metallov i splavov. V 2-kh t.
- [12] **A.M. Smyslov, M.K. Smyslova, A.D. Mingazhev, K.S. Selivanov**, Mnogoetapnaya elektrolitno-plazmennaya obrabotka izdeliy iz titana i titanovykh splavov, *Vestnik UGATU*, 13 (1-34) (2018) 141–145.
- [13] **V.I. Novikov, A.I. Popov, M.I. Tyukhtyayev, M.N. Zeydan**, Vozmozhnosti elektrolitno-plazmennogo polirovaniya pri obrabotke detaley s razlichnym nachalnym urovnem sherokhovatosti poverkhnosti, *Metalloobrabotka*, 1 (61) (2011) 13.
- [14] **M.T. Korotkikh, S.V. Zakharov, A.A. Volkov, I.A. Martsinkevich**, Vliyaniye komponentov rastvora elektrolita na nizhnyuyu granitsu nachala protsessa elektrolitno-plazmennogo polirovaniya, *Elektrofizicheskiye metody obrabotki v sovremennoy promyshlennosti: mater. II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodykh uchennykh, aspirantov i studentov*, (2019) 122–128.
- [15] **I.S. Kuzmichev, L.A. Ushomirskaya, A.V. Shmelkov, I.A. Sysoyev**, Finishnaya tekhnologiya obrabotki skvoznykh pryamoosnykh, glubokikh, tsilindricheskikh otverstiy v metallicheskih izdeliyakh prinuditelnyy elektrolitno-plazmennym polirovaniyem, *Metalloobrabotka*, 3 (99) (2017) 21–27.
- [16] **S.V. Zakharov, I.S. Kuzmichev, L.A. Ushomirskaya**, Razrabotka ustanovki EEP-100 dlya ekstruzionnogo elektrolitno-plazmennogo polirovaniya slozhnoprofilnykh vnutrennikh poverkhnostey, *Nedelya nauki SPbPU: mater. nauch. foruma s mezhdunar. uchastiyem. Institut metallurgii, mashinostroyeniya i transporta. Otv. red. M.S. Kokorin*, (2015) 146–148.
- [17] **Yu.G. Alekseyev, A.Yu. Korolev, A.E. Parshuto, V.S. Niss**, Elektrolitno-plazmennaya obrabotka pri nestatsionarnykh rezhimakh v usloviyakh vysokogradyentnogo elektricheskogo polya, *Nauka i tekhnika*, 16 (5) (2017) 391.
- [18] **S.V. Zakharov, M.T. Korotkikh**, Elektrolitno – plazmennoye polirovaniye slozhnoprofilnykh izdeliy iz splava D16, *Vestnik Kontserna VKO «Almaz-Antey»*, 3 (2017) 83–87.
- [19] **L.A. Ushomirskaya, V.I. Novikov**, Polirovaniye legirovannykh staley v netoksichnykh elektrolitakh pri vysokom napryazhenii, *Metalloobrabotka: nauch.- proizvod. zhurn*, 1 (58) (2008) 23–25.
- [20] **F.M. Gaysin, E.Ye. Son**, Elektricheskoye razryady v parogazovoy srede s netraditsionnyimi elektrodami, *Entsiklopediya nizkotemperaturnoy plazmy*. Pod red. V.Ye. Fortova. M.: Nauka, (2000) 241.
- [21] **A.I. Popov, V.I. Novikov, M.M. Radkevich**, Characteristics of the Development of Electric Discharge between the Jet Electrolyte Cathode and the Metal Anode at Atmospheric Pressure, *High temperature*, 57 (4) (2019) 483–495.
- [22] **A.I. Popov, M.I. Tyukhtyayev, M.M. Radkevich, V.I. Novikov**, Analiz teplovykh yavleniy pri struynoy fokusirovannoy elektrolitno-plazmennoy obrabotke, *St. Petersburg polytechnic university journal*, 4 (254) (2016) 141.
- [23] **T.R. Ablyaz, K.R. Muratov, M.M. Radkevich, L.A. Ushomirskaya, D.A. Zarubin**, Electrolytic plasma surface polishing of complex components produced by selective laser melting, *Russian Engineering Research*, 38 (6) (2018) 491–492.
- [24] **T.R. Ablyaz, K.R. Muratov, L.A. Ushomirskaya, D.A. Zarubin, S.S. Sidhul**, Electrolytic plasma polishing for improved surface finish of machintd components, *Engineering Solid Mechanics*, 57 (4) (2019) 263–281
- [25] **M., Witzke P. Rumbach, D.B. Go, R.M. Sankaran**, Evidence for the electrolysis of water by atmospheric-pressure plasmas formed at the surface of aqueous solutions, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 45 (2012) 5.
- [26] **I.I. Galimzyanov, A.F. Gaysin, I.T. Fakhrutdinova, E.F. Shakirova, M.F. Akhatov, R.R. Kayumov**, Nekotoryye osobennosti razvitiya elektricheskogo razryada mezhdru struynym anodom i zhidkim katodom, *TVT*, 56 (2) (2018) 306.
- [27] **A.I. Popov, M.M. Radkevich, V.N. Kudryavtsev, S.V. Zakharov, I.S. Kuzmichev**, Ustanovka dlya elektrolitno-plazmennoy obrabotki turbinnykh lopatok. Patent na izobreteniy RF № 2623555. Kl. MPK: C25F7/00. 27.06.2017.

[28] **A.I. Popov, M.M. Radkevich, V.S. Medko, M.V. Novoselov**, Ustroystvo dlya elektrolitno-plazmennoy obrabotki metallicheskiy izdeliy. Patent na izobreteniyе RF № 2681239. Kl. MPK: C25F7/00. 13.06.2018.

[29] **A.I. Popov, E.A. Travina**, Electrolytically plasma processing of titanium VT1-0, Elektrofizicheskiye metody obrabotki v sovremennoy promyshlennosti: mater. II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh, aspirantov i studentov, 18–20 dekabrya 2018 g. Perm. 2018.

[30] **M.V. Novoselov, N.G. Shilling, A.A. Rudavin, M.M. Radkevich, A.I. Popov**, Otsenka vozmozhnosti polirovaniya nerzhaveyushchikh staley struynoy

elektrolitno – plazmennoy obrabotkoy, Vestnik PNIPU, 1 (2018) 95.

[31] **A.I. Popov, M.M. Radkevich, V.S. Medko, N.G. Shilling, A.A. Rudavin**, Magnetronnaya raspylitelnaya golovka. Patent na izobreteniyе RF № 2656318. Kl. MPK: C23C14/35. 04.06.2018.

[32] **A.I. Popov, M.M. Radkevich, M.V. Novoselov**, Osobennosti elektrolitno-plazmennogo polirovaniya stentov, Tekhnologiya metallov, 5 (2019) 18.

[33] **I. Danilov, M. Hackert-Oschätzchen, M. Zinecker, G. Meichsner, J. Edelmann, A. Schubert**, Process Understanding of Plasma Electrolytic Polishing through Multiphysics Simulation and Inline Metrology, Micromachines, 10 (3) (2019) 214.

THE AUTHOR

POPOV Aleksandr I. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: profbaikl@yandex.ru

POPOVA Alla I. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: aipopoffa@yandex.ru

POPOVA Diana A. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: a.diana.popova@gmail.com

Received: 26.09.2019