

DOI: 10.15593/2224-9877/2018.1.10

УДК 621.78

**М.В. Новоселов, Н.Г. Шиллинг, А.А. Рудавин, М.М. Радкевич, А.И. Попов**

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

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛИРОВАНИЯ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ СТРУЙНОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ

Продемонстрирована возможность струйной электролитно-плазменной полировки поверхности нержавеющей стали. Показаны преимущества данного вида обработки по сравнению с обработкой изделий в электролитической ванне. Целью работы является выяснение условий, при которых происходит полирование поверхности нержавеющей стали в ходе ее обработки разными катодными модулями. Задачами работы являются оценка вольт-амперной характеристики, выбор электролита для полирования, выбор диапазона технологических режимов. В качестве объекта исследований выбраны образцы и изделия из нержавеющей стали 20X13, 08X18H9T, AISI 201. Полирование изделий и образцов из нержавеющей стали проводилось на опытной струйной электролитно-плазменной установке. В качестве катодных модулей использовались полый токоподвод и токоподвод, оснащенный магнетронной распылительной головкой. При исследовании влияния электролитной плазмы на поверхность изделия, выполняющего роль анода, был использован электролит на основе аммония сульфата и натрия сернокислого. В ходе проведения многочисленных экспериментов зафиксированы вольт-амперные характеристики электролитно-плазменного разряда с использованием разных видов токоподводов в диапазоне значений рабочего напряжения от 0 до 500 В. В процессе экспериментов фиксировался расход электролита на всех режимах. Использовались методы макросъемки и микросъемки процесса электролитно-плазменной обработки. Зафиксировано изменение параметров плазменного разряда с увеличением напряжения. Проведен морфологический анализ поверхности обрабатываемого анода после технологической операции полирования. Исследованы зависимости изменения шероховатости от величины прилагаемого напряжения. Проведен анализ изменения веса образцов, выполняющих роль анода, до и после электролитно-плазменной обработки. Показана возможность применения электролитно-плазменной струйной обработки как метода финишной обработки для получения поверхности с низким уровнем шероховатости.

**Ключевые слова:** нержавеющая сталь, финишная обработка, электролитно-плазменная обработка, полый катод, магнетронная распылительная головка, шероховатость поверхности, электролитический катод, электролит, вольт-амперная характеристика, весовой анализ.

**M.V. Novoselov, N.G. Shilling, A.A. Rudavin, M.M. Radkevich, A.I. Popov**

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

## ASSESSMENT OF A POSSIBILITY POLISHING OF STAINLESS STEELS JET ELECTROLYTIC AND PLASMA PROCESSING

The possibility of jet electrolytic and plasma polishing of a surface of stainless steels is shown. Advantages of this type of processing in comparison with processing of products in an electrolytic bathtub are shown. The purpose of work is clarification of conditions under which there is a polishing of a surface of stainless steel at its processing by different cathodic modules. Tasks of work are assessment of volts - the ampere characteristic, the choice of electrolyte for polishing, the choice of range of the technological modes. As an object of researches samples and products are chosen from stainless steels 20X13, 08X18H9T, AISI 201. Polishing of products and samples from stainless steel was carried out on skilled jet electrolytic and plasma installation. As cathodic modules were used hollow токоподвод and токоподвод equipped with a magnetron raspylitelny head. At a research of influence of electrolytic plasma on a surface of a product of the anode which is carrying out a role electrolyte on the basis of ammonium of sulfate and sodium sulfate has been used. In the course of carrying out numerous experiments are recorded volt - the ampere characteristics electrolytically - the plasma category with use of different types of tokopodvod in the range of working voltage from 0 to 500 volts. In the course of the experiments the electrolyte consumption on all modes was fixed. Methods of macroshooting and microfilming of process electrolytically - plasma processing were used. Change of parameters of the plasma category with increase in tension is recorded. The morphological analysis of a surface of the processed anode after technological operation of a pileniye is carried out. Dependences of change of roughness on size of the enclosed tension are investigated. It is carried out the analysis of change of weight of the samples making an anode role before electrolytic and plasma processing. The possibility of application of electrolytic and plasma jet processing as method of finishing processing for receiving a surface with the low level of roughness is shown.

**Keywords:** stainless steel, finishing processing, electrolytically - plasma processing, the hollow cathode, a magnetron raspylitelny head, roughness of a surface, the electrolytic cathode, electrolyte, the volt-ampere characteristic, the weight analysis.

## Введение

Одним из требований современной промышленности является получение изделий с высоким качеством поверхностного слоя. Шероховатость во многом определяет эксплуатационные характеристики изделия.

Для изменения шероховатости поверхности существует два конкурентных электролитно-плазменных метода: погружение изделия в ванну и обработка поверхности одной и более струей электролита.

В промышленности наибольшее распространение получил метод погружения изделия в ванну [1–8] за счет простоты процесса обработки, высокой производительности, универсальности обрабатываемых изделий.

Наряду с достоинствами данный метод имеет и недостатки. К ним можно отнести следующие: невозможность одномоментной обработки больших изделий, применение мощных источников питания, высокие температуры обработки, значительный расход электроэнергии на образование парогазовой оболочки вокруг изделия, использование больших открытых площадей и объемов электролита, что приводит к росту ПДК вредных веществ, отрицательно сказывающихся на здоровье персонала; неравномерность обработки по профилю изделия.

Метод струйной электролитно-плазменной обработки [3, 9, 10] имеет преимущества по сравнению с погружением в ванну. К ним можно отнести низкую энергоемкость процесса, низкие температуры [11] обработки, применение источников питания на несколько порядков меньшей мощности. К тому же метод струйной обработки является более экологически чистым и имеет более высокую точность обработки обрабатываемых поверхностей за счет возможности программирования перемещения области электролитной плазмы по поверхности изделия.

Целью настоящего исследования является выявление возможностей струйной электролитно-плазменной обработки с полым цилиндрическим катодом и магнетронной распылительной головкой, используемых в качестве катодных модулей при обработке больших поверхностей из нержавеющей сталей.

В работе поставлены следующие задачи: получение и использование стабильных режимов обработки и оптимального расхода электролита, получение качественной объемной полированной поверхности с минимальной шероховатостью, выявление особенностей работы токоподвода с полым цилиндрическим катодом и магнетронной распылительной головкой.

## Экспериментальная установка

Эксперименты по струйной электролитно-плазменной обработке образцов проводили на опытной экспериментальной установке (рис. 1).

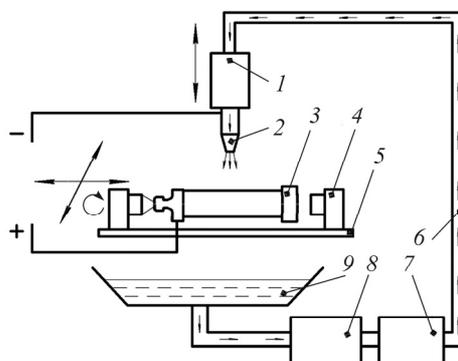


Рис. 1. Принципиальная схема опытной установки струйной электролитно-плазменной обработки: 1 – катодный модуль; 2 – полый токоподвод или магнетронная распылительная головка (не показана); 3 – изделие; 4 – опоры крепления; 5 – подвижная платформа; 6 – трубопровод подачи электролита; 7 – ванна температурной коррекции электролита; 8 – фильтр; 9 – приемная ванна

Опытная экспериментальная установка<sup>1</sup> содержит закрепленную в корпусе приемную ванну 9, соединенную трубопроводом с фильтром 8 и ванной температурной коррекции электролита 7, оснащенную температурным датчиком и нагревательным элементом. Над приемной ванной 9 находится подвижная платформа 5, на которой установлены две опоры крепления 4 с токарными центрами, в которых закреплено изделие или многоместное приспособление с образцами с образцами. Зажим крепления на приспособлении соединен с положительным электродом источника питания, собранным по схеме Ларионова, а отрицательный соединен с катодным модулем 1. Катодный модуль выполнен в виде полой цилиндрической трубки 2 или магнетронной распылительной головки (не показана)<sup>2</sup> и встроен в трубопровод подачи электролита 6, соединенный с ванной температурной коррекции электролита.

Подвижная платформа 5 имеет возможность перемещаться в двух координатах. Катодный модуль 1 имеет возможность перемещения в вертикальном направлении. Эксперимент проводился при атмосферном давлении.

Внешний вид установки показан на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид струйной электролитно-плазменной установки

### Результаты исследований

С целью выявления влияния струйной электролитно-плазменной обработки на качество поверхностного слоя нержавеющей стали нами были проведены исследования работы установки с использованием полого цилиндрического токоподвода. Опыт проводился при атмосферном давлении на 25 образцах стали 08X18H9T при значениях напряжения 20–500 В с шагом 20 В. Перед началом эксперимента образцы были пронумерованы, обезжирены и взвешены на весах ВМ-213 с точностью до 1 мг. Для отслеживания хода эксперимента была применена фото- и видеофиксация с помощью фотокамеры Canon 550D. Процесс работы установки показан на рис. 3.

В результате получена вольт-амперная характеристика процесса обработки (рис. 4).

Анализ показывает, что первый режим 20–160 В представляет собой анодное растворение с интенсивной потерей материала. Происходит перенос ионов металла с анода в раствор элект-

<sup>1</sup> Установка для электролитно-плазменной обработки турбинных лопаток: пат. 2623555 Рос. Федерация, МПК С25F7/00 / Попов А.И., Радкевич М.М., Кудрявцев В.Н., Захаров С.В., Кузьмичев И.С. № 2016120180; заявл. 24.05.2016; опублик. 27.06.2017. Бюл. № 18.

<sup>2</sup> Магнетронная распылительная головка: заявка 2017111428(020198) от 04.04.2017 / Попов А.И., Радкевич М.М., Медко В.С., Рудавин А.А., Шиллинг Н.Г.

тролита, которые удаляются за счет потока электролитной струи. При этом процесс характеризуется интенсивным газовыделением. Данный режим описывается законом Фарадея. Вольт-амперная характеристика имеет практически линейную зависимость тока от напряжения и говорит о постоянном сопротивлении системы. Процесс наблюдался при плотности тока до  $1 \text{ A/cm}^2$  и рабочем напряжении до 160 В.



Рис. 3. Процесс обработки изделия полым токоподводом

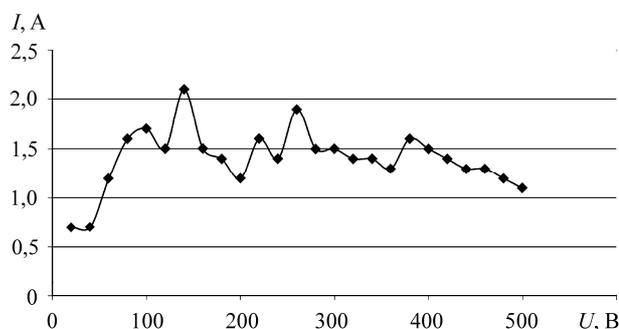


Рис. 4. Зависимость силы тока от напряжения между электродами

При переходном режиме вокруг катода периодически образуется пароплазменная оболочка, электрическое сопротивление постоянно меняется и происходит колебание тока.

Режим наблюдался при напряжении свыше 160–200 В. С повышением рабочего напряжения и температуры электролита сокращается время образования пароплазменной оболочки, формируется коммутационный режим [12], частота колебаний тока увеличивается и при высоких значениях напряжения устанавливается пленочное кипение, система переходит в режим электролитно-плазменного полирования.

В режиме электролитно-плазменного полирования (при значениях напряжения свыше 200 В) вокруг электрода на поверхности образца образуется устойчивая пароплазменная оболочка, происходит полирование поверхности с небольшим удельным съемом материала. Плотность тока уменьшается до  $0,5 \text{ A/cm}^2$  по сравнению с первым режимом. На выпуклых участках пароплазменной оболочки и на микровыступах на аноде напряженность электрического поля возрастает. На этих участках возникают импульсные искровые разряды, оставляя дефекты на поверхности образцов. На образце 220–260 В были получены самые низкие параметры шероховатости поверхности.

В режиме интенсивного кипения (при напряжении свыше 320 В) наблюдается значительное падение показаний тока (в 2–3 раза), что можно объяснить резким повышением сопротивления системы, вследствие расширения пароплазменной оболочки и ее отрыв от поверхности анода с интенсивным свечением электрических разрядов. Эффект полировки в данном режиме исчезает.

Нами был зафиксирован расход электролита при разных режимах обработки (рис. 5). Показано, что изменения колебаний объема электролита незначительны.

Полученные результаты показывают, что наилучшее качество поверхности наблюдается при прикладываемом напряжении между электродами в 220–300 В (рис. 6). При режимах в несколько десятков вольт происходит интенсивный съем материала, однако шероховатость образцов меняется незначительно. Наиболее стабильный режим работы системы находится в пределах 200–340 В и при значениях плотности тока  $0,4\text{--}0,6 \text{ A/cm}^2$ .

Полировка поверхности стали AISI 201 с использованием электролита на основе аммония сульфата и натрия сернокислого (до 30 г/л) происходит на стабильных режимах: 250 В/1,2 А/5 л/ч для полого цилиндрического токоподвода с использованием программы перемещения токопод-

вода с подачей 70 мм/мин и шагом 2 мм. Параметры исходной шероховатости пластины до обработки  $R_a$  находятся в пределах от 0,202 до 0,273 мкм.

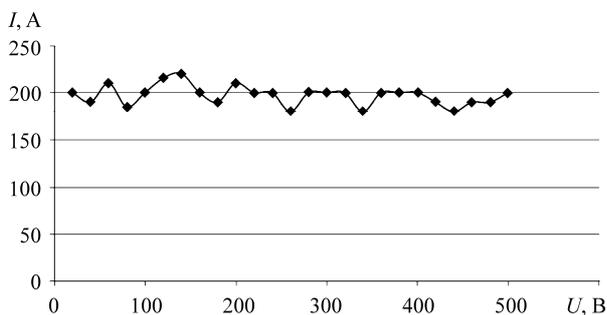


Рис. 5. Зависимость расхода электролита от напряжения

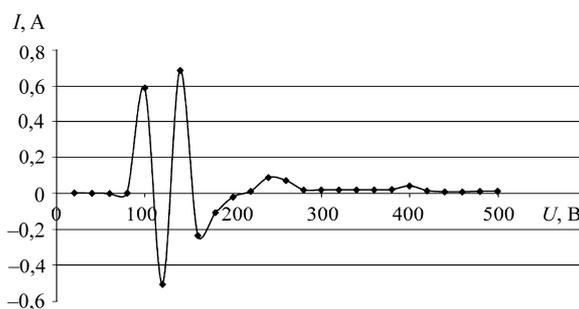


Рис. 6. Зависимость веса образца из нержавеющей стали от напряжения между электродами

За все время обработки не было зафиксировано ни одного пробоя и вырыва металла с поверхности образца.

В табл. 1 представлено итоговое количество проходов полым цилиндрическим токоподводом и параметры шероховатости, полученные в этой области обработки.

Таблица 1

Достигнутый параметр шероховатости при обработке поверхности с использованием полого цилиндрического токоподвода

Номер опыта	Токоподвод	Кол-во проходов	Шероховатость $R_a$
1	Полый	3	0,062
2	Полый	4	0,068
3	Полый	3	0,067
4	Полый	5	0,061

На основании проведенного эксперимента можно сделать следующий вывод. Использование полого токоподвода позволяет получить минимальную шероховатость  $R_a = 0,061$  мкм с зеркальным блеском. Поверхность обладает высокой отражающей способностью. Пример качества обработанной поверхности показан на рис. 7.

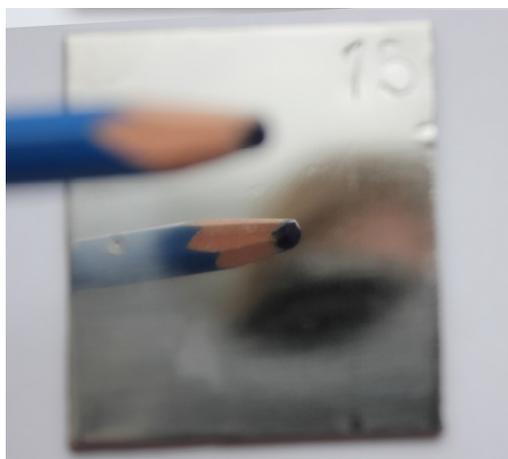
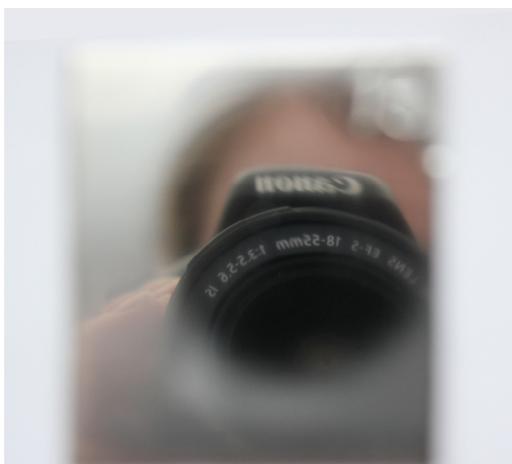


Рис. 7. Пример отражательной способности образца после струйной электролитно-плазменной обработки

Кроме обработки плоских образцов исследования были проведены на криволинейных изделиях с использованием магнетронной распылительной головки.

В качестве образца была взята турбинная лопатка из жаропрочной стали 20X13. Обработка производилась в три прохода с использованием магнетронной распылительной головки. Для проведения экспериментов были составлены программы, описывающие криволинейную поверхность 1/3 части турбинной лопатки. Использовался электролит (до 14–30 г/л) на основе соли  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Эксперимент проводился с использованием видео- и фотофиксации. Измерение шероховатости производилось по нескольким направлениям прибором измерения шероховатости TR-200. Полученные усредненные значения параметров шероховатости до и после обработки Ra и Rz занесены в табл. 2.

Таблица 2

Режимы обработки лопатки и полученные параметры шероховатости поверхности

Проход	Токоподвод	Напряжение, В	Ток, А	Расход, л/ч	Параметр шероховатости поверхности Ra/Rz	
					до обработки	после обработки
1	Магнетронная распылительная головка	250	1,1	5	0,264/1,496	0,718/ 5,304
2	Магнетронная распылительная головка	260	1,0	5	0,264/1,496	0,718/ 5,304
3	Магнетронная распылительная головка	250	1,1	5	0,264/1,496	0,718/ 5,304

В ходе эксперимента с использованием магнетронной распылительной головки не было замечено электрических пробоев в работе установки, однако поверхность в нескольких местах оказалась значительно больше полированной, чем в других. Это связано с тем, что на момент проведения опыта экспериментальная установка могла работать только в трех координатах, что не позволило использовать круговую интерполяцию и в полной мере описать криволинейную поверхность лопатки, вследствие чего некоторые места оказались удаленнее от электрода-инструмента, а значит, и менее обработаны.

Показано, что с помощью магнетронной распылительной головки можно снижать шероховатость на рабочих поверхностях турбинных лопаток в соответствии с требованиями конструкторской документации.

Нами была проведен морфологический анализ поверхности образцов из стали 20X13 после пиления, до и после обработки магнетронной распылительной головкой. Исследование проводилось на электронном микроскопе Supra 40VP. Данные представлены на рис. 8.

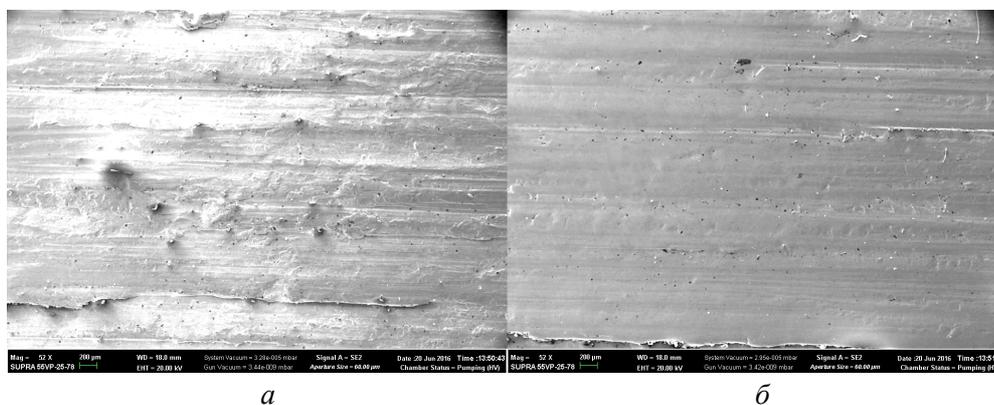


Рис. 8. Морфология поверхности образцов из стали 20X13: *a* – образец после пиления ленточной пилой; *б* – образец после обработки магнетронной распылительной головкой

Показано, что после обработки магнетронной распылительной головкой существенно меняется макро- и микрорельеф поверхности, что в целом позволяет предположить ее использование для выполнения не только операций полировки поверхности, но и для проведения размерной обработки.

### Заключение

Анализ проведенных экспериментов позволяет предположить, что использование струйной электролитно-плазменной обработки возможно как для обработки листовых материалов большой площади, так и для криволинейных поверхностей.

Струйная электролитно-плазменная обработка обладает существенными преимуществами по сравнению с обработкой изделий в ванне, прежде всего за счет повышения точности обработки и резкого уменьшения затрат по мощности применяемого оборудования и экологичности.

Использование катодного модуля с магнетронной распылительной головкой позволяет прогнозировать применение ее для размерной обработки на операциях удаления микрорельефа поверхности после предварительного шлифования или чистовой фрезерной обработки.

### Список литературы

1. Словецкий Д.И., Терентьев С.Д. Параметры электрического разряда в электролитах и физико-химические процессы в электролитной плазме // Химия высоких энергий. – 2003. – Т. 37, № 5. – С. 355–362.
2. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов / И.В. Суминов, П.Н. Белкин, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, Б.Л. Крит, А.М. Борисов. – М.: Техносфера, 2011. – 464 с.
3. Куликов И.С., Ващенко С.В., Каменев А.Я. Электролитно-плазменная обработка. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 232 с.
4. Григорьев А.И. О переносе энергии и формировании электрического тока в окрестности опущенного в электролит, сильно нагретого протекающим током электрода // Журнал технической физики. – 2004. – Т. 74, вып. 5. – С. 38–43.
5. Веселовский А.П., Ушомирская Л.А. Интенсификация технологических процессов изготовления деталей машин при использовании различных видов энергии // Металлообработка. – 2010. – № 2. – С. 46–49.
6. Плотников Н.В., Смыслов А.М., Таминдаров Д.Р. К вопросу о модели электролитно-плазменного полирования поверхности // Вестник Уф. гос. авиац. техн. ун-та. – 2013. – Т. 17, № 4(57). – С. 90–95.
7. Новиков В.И. Повышение эффективности изготовления сложно-профильных деталей из легированных сталей методом электролитно-плазменного полирования: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2010. – 177 с.
8. Веселовский А.П., Ушомирская Л.А. Интенсификация технологических процессов изготовления деталей машин при использовании различных видов энергии // Металлообработка. – 2010. – № 2. – С. 46–49.
9. Гайсин А.Ф., Сон Э.Е. Паровоздушные разряды между струйным электролитическим катодом и металлическим анодом при пониженных давлениях // Теплофизика высоких температур. – 2010. – Т. 48, вып. 3. – С. 470–472.
10. Гайсин Ал. Ф., Гайсин А.Ф., Гайсин Ф.М. Многоканальный разряд между твердым и электролитическим электродами в процессах модификации материалов при атмосферном давлении // Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий: науч.-техн. конф. с элементами шк.: сб. ст. / Казан. гос. технол. ун-т. – Казань, 2010. – С. 9–19.
11. Анализ тепловых явлений при струйной фокусированной электролитно-плазменной обработке / А.И. Попов, М.И. Тюхтяев, М.М. Радкевич, В.И. Новиков // Научно-технические ведомости СПбПУ. – 2016. – № 4. – С. 17–31.
12. Дураджи В.Н., Капуткин Д.Е. Обработка алюминия в электролитной плазме при анодном процессе // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 3, № 3. – С. 38–41.

## References

1. Slovetskii D.I., Terent'ev S.D. Parametry elektricheskogo razriada v elektrolitakh i fiziko-khimicheskie protsessy v elektrolitnoi plazme [Parameters of electric discharge in electrolytes and physical and chemical processes in electrolytic plasma]. *Khimiia vysokikh energii*, 2003, vol. 37, no. 5, pp. 355–362.
2. Suminov I.V., Belkin P.N., Epel'fel'd A.V., Liudin V.B., Krit B.L., Borisov Plazmenno-elektroliticheskoe modifitsirovanie poverkhnosti metallov i splavov [Plasma and electrolytic modifying of a surface of metals and alloys]. Moscow: Tekhnosfera, 2011, 464 p.
3. Kulikov I.S., Vashchenko S.V., Kamenev A.Ia. Elektrolitno-plazmennaya obrabotka [Electrolytic and plasma processing]. Minsk: Belarus navuka, 2010, 232 p.
4. Grigor'ev A.I. O perenose energii i formirovanii elektricheskogo toka v okrestnosti opu-shchennogo v elektrolit, sil'no nagretogo protekaiushchim tokom elektroda [About transfer of energy and formation of electric current in the neighborhood of the proceeding electrode current lowered in electrolyte, strongly heated]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2004, vol. 74, iss. 5, pp. 38–43.
5. Veselovskii A.P., Ushomirskaya L.A. Intensifikatsiia tekhnologicheskikh protsessov izgotovle-niia detalei mashin pri ispol'zovanii razlichnykh vidov energii [Intensification of technological processes of production of details of cars when using different types of energy]. *Metalloobrabotka*, 2010, no. 2, p. 46–49.
6. Plotnikov N.V., Smyslov A.M., Tamindarov D.R. K voprosu o modeli elektrolitno-plazmennogo poli-rovaniia poverkhnosti [To a question of model of electrolytic and plasma polishing of a surface]. *Vestnik Ufim-skogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 17, no. 4(57), pp. 90–95.
7. Novikov V.I. Povyshenie effektivnosti izgotovleniia slozhno-profil'nykh detalei iz legirovannykh stali metodom elektrolitno-plazmennogo polirovaniia [Increase in efficiency of production of figurine details from alloyed staly by method of electrolytic and plasma polishing]. Ph.D. thesis. Saint-Petersburg, 2010, 177 p.
8. Veselovskii A.P., Ushomirskaya L.A. Intensifikatsiia tekhnologicheskikh protsessov izgotovle-niia detalei mashin pri ispol'zovanii razlichnykh vidov energii [Intensification of technological processes of production of details of cars when using different types of energy]. *Metalloobrabotka*, 2010, no. 2, pp. 46–49.
9. Gaisin A.F., Son E.E. Parovozdushnye razriady mezhdu struinym elektroliticheskim katodom i metallicheskim anodom pri ponizhenykh davleniiakh [Steam-air categories between the jet electrolytic cathode and the metal anode with the lowered pressure]. *Teplofizika vysokikh temperature*, 2010, vol. 48, iss. 3, pp. 470–472.
10. Gaisin A.I. F., Gaisin A.F., Gaisin F.M. Mnogokanal'nyi razriad mezhdu tverdyim i elektro-liticheskim elektrodami v protsessakh modifikatsii materialov pri atmosfernom davlenii [The multichannel category between firm and electrolytic electrodes in processes of modification of materials with an atmospheric pressure]. *Nizko-temperaturnaia plazma v protsessakh naneseniia funktsional'nykh pokrytii: nauchno-tekhnicheskaya konferentsiia s elementami shkoly: sbornik statei*. Kazanskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet, 2010, pp. 9–19.
11. Popov A.I., Tiukhtiaev M.I., Radkevich M.M., Novikov V.I. Analiz teplovykh iavlenii pri struinoi fokusirovannoi elektrolitno-plazmennoi obrabotke [The analysis of the thermal phenomena at the jet focused electrolytic and plasma processing]. *Nauchno-tekhnicheskii vedomosti Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 4, pp. 17–31.
12. Duradzhi V.N., Kaputkin D.E. Obrabotka aliuminiia v elektrolitnoi plazme pri anodnom pro-tsesse [Processing of aluminum in electrolytic plasma at anode process]. *Mashinostroenie: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal*, 2015, vol. 3, no. 3, pp. 38–41.

Получено 22.02.2018

## Об авторах

**Новоселов Михаил Викторович** (Санкт-Петербург, Россия) – магистрант кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого; e-mail: profbaikl@yandex.ru.

**Шиллинг Никита Георгиевич** (Санкт-Петербург, Россия) – магистрант кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого; e-mail: profbaikl@yandex.ru.

**Рудавин Алексей Александрович** (Санкт-Петербург, Россия) – магистрант кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого; e-mail: profbaikl@yandex.ru

**Радкевич Михаил Михайлович** (Санкт-Петербург, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого; e-mail: profbaikl@yandex.ru.

**Попов Александр Иннокентьевич** (Санкт-Петербург, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого; e-mail: profbaikl@yandex.ru.

#### **About the authors**

**Mikhail V. Novoselov** (St. Petersburg, Russian Federation) – Master Student, Department of Technology of Constructional Materials and Materials Science, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University; e-mail: profbaikl@yandex.ru.

**Nikita G. Shilling** (St. Petersburg, Russian Federation) – Master Student, Department of Technology of Constructional Materials and Materials Science, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University; e-mail: profbaikl@yandex.ru

**Alexey A. Rudavin** (St. Petersburg, Russian Federation) – Master Student, Department of Technology of Constructional Materials and Materials Science, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University; e-mail: profbaikl@yandex.ru

**Mikhail M. Radkevich** (St. Petersburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Technology of Constructional Materials and Materials Science, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University; e-mail: profbaikl@yandex.ru.

**Alexander I. Popov** (St. Petersburg, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology of Constructional Materials and Materials Science, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University; e-mail: profbaikl@yandex.ru.