

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПОЛИРОВАНИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ****Б.А. Шibaев, В.С. Белова, А.В. Балмасов**

Борис Александрович Шibaев, Валерия Сергеевна Белова, Анатолий Викторович Балмасов*

Кафедра технологии электрохимических производств, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000.

E-mail: shibaev_boris@mail.ru, valeria_bel@mail.ru, balmasov@isuct.ru*

Анодное поведение конструкционных легированных сталей марок Ст25Х3МЗНБЦА и Ст30ХН2МФА в электролитах электрохимического полирования на основе фосфорной и серной кислот с различными добавками исследовано путем снятия потенциодинамических поляризационных кривых на установке с вращающимся дисковым электродом при разных скоростях вращения. Установлено, что транспассивное растворение сталей начинается при потенциале более положительном, чем потенциал выделения кислорода, поэтому оба процесса идут параллельно. Введение в состав электролита органической добавки – триэтанолamina приводит к снижению токов в области транспассивного растворения в 2 раза по сравнению с раствором, в состав которого входит хромовый ангидрид. Исследовано влияние условий обработки на сглаживание микрорельефа поверхности в процессе электрохимического полирования. Установлено, что интенсификация гидродинамического режима способствует некоторому снижению высоты микронеровностей, однако относительное сглаживание микрорельефа остается незначительным. Проведение процесса анодного растворения исследованных сталей при комнатной температуре не обеспечивает достижение эффекта полирования. Это связано с высокой склонностью исследуемых сталей к пассивации вследствие присутствия в их составе легирующих добавок хрома, никеля, молибдена, ванадия. Увеличение температуры раствора до 65-70 °С способствует растворению пассивирующих слоев, что обеспечивает минимальную величину шероховатости $Ra = 0,16$ мкм при использовании электролита, содержащего хромовый ангидрид, и $0,08$ мкм в случае раствора с триэтанолaminом. Таким образом, введение в состав электролита органической добавки обеспечивает повышение эффективности сглаживания микрорельефа поверхности и снижение затрат энергии на проведение процесса, т.к. эффект полирования достигается при меньшей плотности тока и температуре. Кроме того, замена хромового ангидрида на триэтанолamin делает технологию обработки поверхности сталей более экологически безопасной.

Ключевые слова: легированные стали, электрохимическое полирование, электролит, хромовый ангидрид, триэтанолamin, шероховатость

INFLUENCE OF ELECTROLYSIS CONDITIONS ON PARAMETERS OF PROCESS OF ELECTROCHEMICAL POLISHING OF ALLOY STEELS

B.A. Shibaev, V.S. Belova, A.V. Balmasov

Boris A. Shibaev, Valeriya S. Belova, Anatoly V. Balmasov*

Department of Electrochemical Productions, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetev ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: shibaev_boris@mail.ru, valeria_bel@mail.ru, balmasov@isuct.ru*

The anodic behavior of structural alloyed steels St25X3M3HBCA and St30XH2MΦA in electrolytes of electrochemical polishing based on phosphoric and sulfuric acids with various additives was studied by the potentiodynamic polarization curves on a rotating disc electrode apparatus at different rotational speeds. It was established that the transpassive dissolution of steels begins at a potential more positive than the separation of oxygen, and therefore both processes proceed in parallel. The introduction of an organic additive - triethanolamine into the electrolyte composition results in a 2-fold increase in the area of transpassive dissolution compared to a solution containing chrome anhydride. The influence of processing conditions on the smoothing of the surface microrelief during electrochemical polishing is investigated. It has been established that the intensification of the hydrodynamic regime contributes to a limited growth of microroughness, but the relative smoothing of the microrelief remains insignificant. The process of anodic dissolution of the investigated steels at a moderate temperature does not ensure the achievement of the polishing effect. This is due to the high propensity to study chronology, nickel, molybdenum, vanadium. Increasing the temperature of the solution to 65-70 °C promotes the dissolution of passivation layers, $R_a = 0.16 \mu\text{m}$ when using an electrolyte containing chromic anhydride and $0.08 \mu\text{m}$ in the case of a solution with triethanolamine. Thus, the addition of an organic additive to the electrolyte provides an improvement in the smoothing efficiency of the surface microrelief and a reduction in the energy input to the process, since the polishing effect is achieved with a lower current density and temperature. In addition, the replacement of chromium anhydride with triethanolamine makes the technology of surface treatment of steels more environmentally safe.

Key words: alloy steels, electrochemical polishing, electrolyte, chrome anhydride, triethanolamine, roughness

Для цитирования:

Шибяев Б.А., Белова В.С., Балмасов А.В. Влияние условий обработки на показатели процесса электрохимического полирования легированных сталей. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2018. Т. 61. Вып. 4-5. С. 64–71

For citation:

Shibaev B.A., Belova V.S., Balmasov A.V. Influence of electrolysis conditions on parameters of process of electrochemical polishing of alloy steels. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 61. N 4-5. P. 64–71

ВВЕДЕНИЕ

Повышение качества поверхности металлов при электрохимической и химической обработке имеет важное практическое значение. Состояние поверхности напрямую влияет на эксплуатационные свойства деталей, узлов и изделия в целом. В настоящее время в связи с возросшими требованиями к изделиям все большее распространение получают конструкционные материалы с повышенными механическими свойствами. С одной стороны, это обеспечивает повышение ресурса работы деталей, а с другой – приводит к затруднению их обработки традиционными механическими ме-

тодами (механическое шлифование и полирование). В связи с этим возникает необходимость использования способов обработки, показатели которых не зависят от механических свойств материала заготовки. Одним из таких способов является электрохимическая обработка, основанная на процессах анодного растворения металла. Ее применение позволяет обрабатывать даже материалы, обладающие очень высокой твердостью [1-4]. Когда речь идет о таком методе электрохимической обработки, как электрохимическое полирование, чаще всего обращают внимание на снижение шероховатости поверхности, повышение ее отражательной способности, увеличение коррозионной стойкости.

При электрохимическом полировании углеродистых низколегированных и нержавеющей сталей, а также жаростойких сплавов хорошие результаты обеспечивает применение электролитов на основе серной и фосфорной кислот с различными добавками [5-13].

В случае обработки внутренней поверхности труб и длинномерных каналов процесс электрополирования осуществляют в проточном электролите. Однако влияние гидродинамических условий на электрохимическое поведение сталей в смесях концентрированных кислот изучено недостаточно. Целью настоящих исследований являлось изучение влияния условий электролиза на показатели электрохимического полирования конструкционных легированных сталей и определение условий, обеспечивающих получение высокого качества обработанной поверхности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследования анодного поведения сталей проводили на установке с вращающимся дисковым электродом с использованием потенциостата Р-30J. Применение вращающегося дискового электрода (ВДЭ) позволяет проводить процесс в контролируемых гидродинамических условиях и моделировать условия электрополирования в проточном электролите. Достоинством ВДЭ является одинаковая толщина диффузионного слоя на всей поверхности и хорошая воспроизводимость гидродинамических условий. В качестве рабочих электродов использовали стержни из сталей Ст25Х3М3НБЦА и Ст30ХН2МФА диаметром 3 и 8 мм, запрессованные во фторопластовую оболочку. Рабочей поверхностью электрода являлся торец стального стержня. Перед проведением эксперимента рабочую поверхность зачищали наждачной бумагой различной зернистости, затем обезжировали этиловым спиртом.

Для характеристики анодного поведения исследуемых материалов проводили снятие анодных поляризационных кривых в потенциодинамическом режиме. Скорость развертки потенциала составляла 20 мВ/с. Электродом сравнения служил насыщенный хлорид-серебряный электрод. Учитывая большие величины анодных плотностей тока, с

целью уменьшения омической ошибки при измерении потенциала анода под током использовали капилляр Луггина, который подводили к исследуемому электроду на расстояние, равное его внешнему диаметру (0,2 мм).

Для характеристики качества обработанной поверхности измеряли ее шероховатость профилометром «Калибр», модель 170622. В качестве характеристик шероховатости использовали величины Ra (среднего арифметического отклонения профиля) и относительного сглаживания неровностей профиля ΔRa , (%), которое определяли как отношение разности значений исходной шероховатости поверхности (Ra_H) и шероховатости после электрохимической обработки (Ra_K) к исходному значению:

$$\Delta Ra = \frac{Ra_H - Ra_K}{Ra_H} \cdot 100$$

Исходная шероховатость поверхности находилась в пределах 0,20 – 0,40 мкм.

Выход по току определяли гравиметрическим методом. Теоретическую массу растворенного металла рассчитывали по закону Фарадея с учетом процентного содержания легирующих компонентов. Убыль массы электрода за время обработки определяли с точностью до 0,1 мг с помощью аналитических весов ВЛР-200.

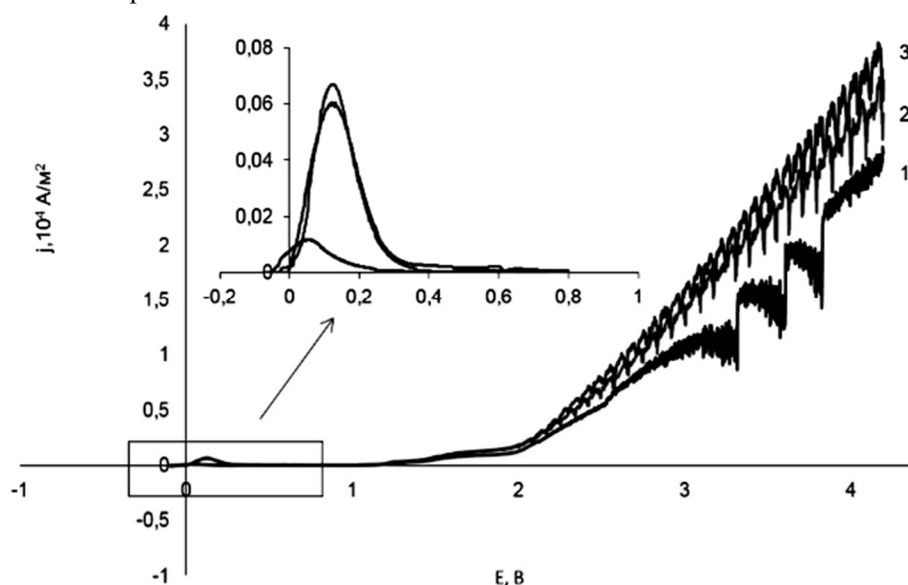


Рис. 1. Поляризационные кривые анодного растворения стали Ст25Х3М3НБЦА при различных скоростях вращения ВДЭ 1-900 об/мин., 2-1600 об/мин., 3-2500 об/мин. в фосфорносернохромовокислом электролите. Температура 70 °С

Fig. 1. Polarization curves of the anodic dissolution of steel Ст25Х3М3НБЦА at different rotation speeds of RDE (rotating disk electrode). 1-900 rpm 2-1600 rpm, 3-2500 rpm in phosphoric-sulfuric-chromic electrolyte. Temperature is 70 °С

Для сравнения использовали электролиты двух составов: широко применяемый на практике

электролит на основе фосфорной, серной и хромовой кислот, содержащий (% масс.): H_3PO_4 – 65%, H_2SO_4 – 15%, CrO_3 – 5%, H_2O – 15% [6] и сернофосфорнокислый электролит с добавкой триэтаноламина (ТЭА) состава (% масс.): H_3PO_4 – 65%, H_2SO_4 – 15%, H_2O – 10%, ТЭА – 10%.

Фосфорносернохромовокислый электролит, обеспечивающий во многих случаях высокое качество обработанной поверхности, имеет ряд недостатков, в частности, высокую экологическую опасность. Введение в полирующий раствор добавок органических растворителей, имеющих высокую вязкость, таких как многоатомные спирты и аминспирты, позволяет уменьшить величину рабочей плотности тока при электрохимическом полировании большого числа металлов [10-20].

На первом этапе исследования были получены анодные поляризационные кривые на электродах из легированных сталей (рис. 1, 2).

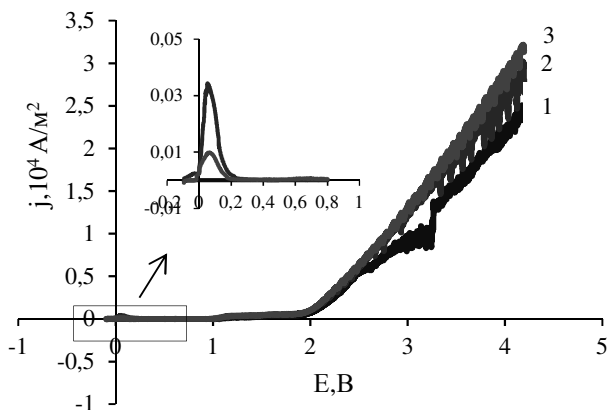


Рис. 2. Поляризационные кривые анодного растворения для стали Ст30ХН2МФА при различных скоростях вращения ВДЭ 1-900 об/мин., 2-1600 об/мин., 3-2500 об/мин. в фосфорносернохромовокислом электролите. Температура 70 °С

Fig. 2. Polarization curves for anodic dissolution for steel St30XH2MFA at different rotational speeds of RDE. 1-900 rpm, 2-1600 rpm, 3-2500 rpm in phosphoric-sulfuric-chromic electrolyte. Temperature is 70 °С.

В электролите с хромовым ангидридом при незначительном отклонении от бестокового потенциала имеет место слабовыраженная область активного растворения металла, после которого наблюдается область пассивации металла. Транспассивное растворение металла начинается при потенциалах положительнее 1,5 В. В области высоких потенциалов увеличение скорости вращения дискового электрода способствует повышению скорости растворения металла, что свидетельствует об определенном торможении стадии

массопереноса анодного процесса. При этом на поляризационных кривых отсутствуют площадки предельного тока. Это связано с тем, что транспассивное растворение стали начинается при потенциале более положительном, чем потенциал выделения кислорода, поэтому оба процесса идут параллельно, а скорость реакции выделения кислорода не зависит от гидродинамических условий.

На поляризационных кривых, полученных в фосфорносернохромовокислом электролите с добавкой ТЭА (рис. 3, 4), ток в области активного растворения заметно выше, чем в присутствии хромовой кислоты.

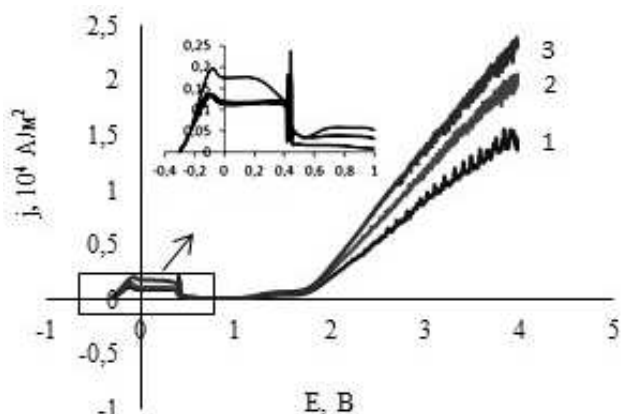


Рис. 3. Поляризационные кривые анодного растворения стали Ст25Х3МЗНБЦА при различных скоростях вращения ВДЭ 1-900 об/мин., 2-1600 об/мин., 3-2500 об/мин. в фосфорносернохромовокислом электролите с добавкой триэтаноламина. Температура 70 °С

Fig.3. Polarization curves of the anodic dissolution of steel Ст25Х3МЗНБЦА at different rotational speeds of RDE. 1-900 rpm, 2-1600 rpm, 3-2500 rpm electrolyte phosphoric-sulfuric with addition of triethanolamine. Temperature is 70 °С

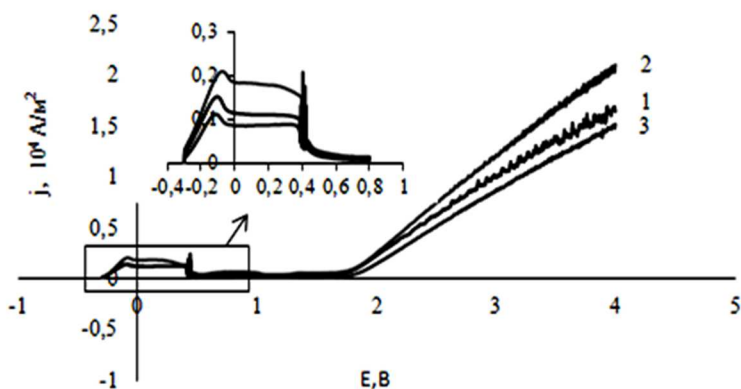


Рис. 4. Поляризационные кривые анодного растворения стали Ст30ХН2МФА при различных скоростях вращения ВДЭ: 1-900 об/мин., 2-1600 об/мин., 3-2500 об/мин. в фосфорносернохромовокислом электролите с добавлением триэтаноламина. Температура 70 °С

Fig. 4. Polarization curves of anodic dissolution of steel Ст30ХН2МФА at different rotational speeds of RDE. 1-900 rpm, 2-1600 rpm, 3-2500 rpm in phosphoric-sulfuric electrolyte with the addition of triethanolamine. Temperature is 70 °С

При повышенной температуре переходу в область пассивации предшествует участок, на котором наблюдается осцилляция токов. Тенденции, имеющие место в области высоких анодных потенциалов, аналогичны тем, которые наблюдаются в фосфорносернохромовокислем электролите – это увеличение анодных токов с ростом температуры раствора и скорости вращения дискового электрода. Однако максимальные значения токов в области транспассивации, полученные в растворах, содержащих ТЭА, в исследованном интервале потенциалов примерно в 2 раза ниже, чем в растворах с хромовым ангидридом. При полировании внутренней поверхности каналов это имеет важное значение, т.к. обеспечивает снижение токовой нагрузки на внутренний катод, сечение которого ограничено, особенно при обработке изделий небольшого диаметра.

Проведение процесса анодного растворения исследованных сталей при комнатной температуре не обеспечивает достижения эффекта полирования. Это связано с высокой склонностью исследуемых сталей к пассивации вследствие присутствия в их составе легирующих добавок хрома, никеля, молибдена, ванадия. Значительный рост тока наблюдается только при потенциалах выше 2 В, что заметно положительнее равновесного потенциала выделения кислорода, поэтому выход по току анодного растворения металла при комнатной температуре не превышает 8%.

Опыт показывает, что в результате повышения температуры до 65-70 °С достигается наилучший внешний вид образцов из приведенных сталей. Повышенные температуры облегчают процесс химического растворения оксидного слоя, что способствует увеличению выхода по току реакции анодного растворения металла. При этом следует учитывать, что формирование оксидных слоев на поверхности металла при анодной поляризации или воздействии окислителей является одним из важных условий сглаживания микрорельефа [6, 8, 14, 15].

Увеличение скорости вращения также облегчает растворение пассивирующего слоя, приводя к росту анодного тока. Величины токов на образцах из Ст25Х3МЗНБЦА и Ст30ХН2МФА довольно близки, однако при визуальном контроле качество поверхности стали Ст25Х3МЗНБЦА было несколько выше. Несколько худший результат для стали Ст30ХН2МФА обусловлен, по-видимому, наличием в ней марганца, а также большим содержанием углерода и кремния. Облегчение процесса растворения оксидного слоя при увеличении скорости вращения дискового электрода способствует

росту выхода по току, который наблюдается как при комнатной, так и при повышенной температуре.

Значения анодного выхода по току, определенные в гальваностатических условиях, при использовании растворов с добавкой ТЭА несколько ниже, чем в фосфорносернохромовокислем электролите, но также имеют тенденцию к увеличению с ростом скорости вращения электрода и температуры раствора (табл. 1, 2).

Таблица 1

Значения выхода по току анодного растворения стали Ст25Х3МЗНБЦА в фосфорносернокислем электролите с добавкой триэтанолamina при различных скоростях вращения дискового электрода и температурах
Table.1. Values of current efficiency of anodic dissolution of steel Ст25Х3МЗНБЦА in phosphoric-sulfuric electrolyte with the addition of triethanolamine at various speeds of rotation of the disk electrode and temperatures

Скорость вращения, об/мин	Выход по току, % при разных температурах	
	25°С	70°С
900	6,1	25,2
1600	7,2	27,3
2500	8,0	29,3

Таблица 2

Значения выхода по току анодного растворения стали Ст30ХН2МФА в фосфорносернокислем электролите с добавкой триэтанолamina при различных скоростях вращения дискового электрода и температурах
Table.2. Values of current efficiency of anodic dissolution of steel Ст30ХН2МФА in phosphoric-sulfuric electrolyte with the addition of triethanolamine at various speeds of rotation of the disk electrode and temperatures

Скорость вращения, об/мин	Выход по току, % при разных температурах	
	25°С	70°С
900	7,1	23,3
1600	7,7	25,4
2500	6,7	26,5

Внешний вид поверхности образцов после электрополирования в растворах с органической добавкой лучше, чем при использовании хромсодержащего раствора. В фосфорносернохромовокислем электролите для получения блестящей поверхности необходимо применение более высокой плотности тока – порядка $3 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$. Кроме того, этот раствор имеет высокую экологическую опасность.

Для количественной оценки шероховатости поверхности образцы из исследованных сталей подвергали анодной обработке в гальваностатическом режиме при плотности тока $1 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$, при этом контролировали величину среднего арифметического отклонения профиля Ra до и после электрополирования. Полученные результаты приведены в табл. 3-4.

Таблица 3

Значения среднего арифметического отклонения профиля и коэффициента сглаживания поверхности после анодного растворения стали Ст25Х3М3НБЦА (числитель) и Ст30ХН2МФА (знаменатель) в фосфорносернохромовокислом электролите при различных скоростях вращения дискового электрода и температурах

Table.3 The values of the arithmetical mean deviation of the profile and the smoothing rate of the surface after anodic dissolution of steel Ст25Х3М3НБЦА (numerator) and Ст30ХН2МФА (denominator) in phosphoric-sulfuric-chromic electrolyte at various rotation speeds of the disk electrode and temperatures

Материал электрода	Показатели полирования	Скорость вращения, об/мин					
		900		1600		2500	
		Температура, °С					
		25	70	25	70	25	70
Ст25Х3М3НБЦА Ст30ХН2МФА	<i>Ra</i> , мкм	<u>0,28</u> 0,32	<u>0,18</u> 0,20	<u>0,30</u> 0,28	<u>0,18</u> 0,16	<u>0,22</u> 0,29	<u>0,16</u> 0,18
	ΔRa , %	<u>11</u> 11	<u>44</u> 37	<u>13</u> 11	<u>56</u> 40	<u>14</u> 12	<u>64</u> 44

Таблица 4

Значения среднего арифметического отклонения профиля и коэффициента сглаживания поверхности после анодного растворения стали Ст25Х3М3НБЦА (числитель) и Ст30ХН2МФА (знаменатель) в электролите с добавкой ТЭА при различных скоростях вращения дискового электрода и температурах

Table 4. The values of the arithmetical mean deviation of the profile and the smoothing rate of the surface after anodic dissolution of steel Ст25Х3М3НБЦА (numerator) and Ст30ХН2МФА (denominator) in an electrolyte with the addition of triethanolamine at various speeds of rotation of the disk electrode and temperatures

Материал электрода	Показатели полирования	Скорость вращения, об/мин					
		900		1600		2500	
		Температура, °С					
		25	70	25	70	25	70
Ст25Х3М3НБЦА Ст30ХН2МФА	<i>Ra</i> , мкм	<u>0,28</u> 0,28	<u>0,16</u> 0,12	<u>0,24</u> 0,24	<u>0,08</u> 0,10	<u>0,29</u> 0,26	<u>0,12</u> 0,12
	ΔRa , %	<u>13</u> 10	<u>68</u> 54	<u>11</u> 11	<u>74</u> 66	<u>13</u> 12	<u>78</u> 69

Как следует из представленных данных, применение растворов без подогрева не обеспечивает достижения полирующего эффекта в обоих исследованных электролитах, что хорошо согласуется с литературными данными [6,7]. Интенсификация гидродинамического режима способствует некоторому уменьшению шероховатости, однако относительное сглаживание микрорельефа остается незначительным при скорости вращения дискового электрода меньше 900 об/мин. Для достижения высокого качества поверхности рекомендуется проводить процесс при 1600 об/мин, но гораздо более сильное влияние на качество обработанной поверхности оказывает температура раствора. Ее увеличение до 70 °С обеспечивает для сталей Ст25Х3М3НБЦА и Ст30ХН2МФА мини-

мальную величину $Ra = 0,16$ мкм при использовании хромсодержащего электролита и 0,08 мкм в случае раствора с триэтаноламином. При этом относительное сглаживание микропрофиля при использовании раствора с органической добавкой достигает 69 % для стали Ст30ХН2МФА и 78% для стали Ст25Х3М3НБЦА.

Таким образом, применение фосфорносернохромовокислого электролита с добавкой ТЭА взамен фосфорносернохромовокислого представляется перспективным, т.к. позволяет в 2 раза уменьшить шероховатость обработанной поверхности и снизить рабочую плотность тока. Наилучшее качество обработанной поверхности образцов из исследованных сталей достигаются в растворе с добавкой триэтаноламина при температуре 65-70 °С и плотности тока $1,5-2 \cdot 10^4$ А/м².

ЛИТЕРАТУРА

REFERENCES

1. Смоленцев В.П., Золотарев В.В., Коптев И.Т. Получение требуемой микроповерхности при электрохимической размерной и комбинированной обработке. Вестн. Воронеж. гос. технич. ун-та. 2016. Т. 12. № 2. С. 102-107.
2. Надарана Ц.Г., Бабкина Л.А., Шестаков И.Я. Электрохимическое полирование металлов в водных раство-
1. Smolentsev V.P., Zolotarev V.V., Koptev I.T. Obtaining the required microsurface at electrochemical dimensional and combined treatment. *Vestn. Voronezh Gos. Tekh. Univer.* 2016. V. 12. N 2. P. 102-107 (in Russian).
2. Nadaraya Ts.G., Babkina L.A., Shestakov I.Ya. Electrochemical polishing of metals in aqueous solutions of neutral salts with electrode vibration. Krasnoyarsk: Siberian State

- рах нейтральных солей с вибрацией электрода. Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М.Ф. Решетнева. 2014. 120 с.
3. **Балмасов А.В.** Анодная обработка вольфрамкобальтового сплава в водно-органических растворах. *Металлообработка*. 2010. № 2 (56). С. 61-64.
 4. **Балмасов А.В., Козлова Н.Б., Лилин С.А., Румянцев Е.М.** Анодное поведение вольфрамкобальтового сплава VK8 в водно-органических растворах нитрата натрия. *Защита металлов*. 2000. Т. 36. № 3. С. 262-265.
 5. **Иванова Н.П., Синькевич Ю.В., Шелег В.К., Янковский И.Н.** Механизм анодного растворения коррозионно-стойких и конструкционных углеродистых сталей в условиях электроимпульсного полирования. *Белорус. национал. технич. ун-т. Наука и техника*. 2013. №1. С. 24-30.
 6. **Гриликес С.Я.** Электрохимическое и химическое полирование: Теория и практика. Влияние на свойство металлов. Л.: Машиностроение. 1987. 232 с.
 7. **Штанько В.М., Карязин П.П.** Электрохимическое полирование металлов. М.: Металлургия. 1979. 160 с.
 8. **Chen S.C., Tu G.C., Huang C.A.** The electrochemical polishing behavior of porous austenitic stainless steel (AISI 316L) in phosphoric-sulfuric mixed acids. *Surface & Coatings Technology*. 2005. V. 200. P. 2065–2071. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.06.008.
 9. **Yang G., Wang B., Tawfiq K., Wei H., Zhou S., Chen G.** Electropolishing of surfaces: theory and applications. *Surf. Eng.* 2017. V. 33. N 2. P. 149-166. DOI: 10.1080/02670844.2016.1198452.
 10. **Núñez P.J., García-Plaza E., Hernando M., Trujillo R.** Characterization of Surface Finish of Electropolished Stainless Steel AISI 316L with Varying Electrolyte Concentrations. *Procedia Engineering*. 2013. V. 63. P. 771-778. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.255.
 11. **Амирханова Н.А., Хамзина А.Р.** Электрохимическое полирование жаропрочных никель-хромовых сплавов ХН45МВТЮБР и ХН50ВМТЮБ. *Металлообработка*. 2006. № 5-6 (35-36). С. 29-33.
 12. **Амирханова Н.А., Галлиев В.Э., Хамзина А.Р.** Повышение стойкости газовой коррозии при электрохимическом полировании сплавов ХН45МВТЮБР и ХН50ВМТЮБ. *Металлообработка*. 2008. № 1 (43). С. 17-21.
 13. **Амирханова Н.А., Хамзина А.Р.** Повышение коррозионной стойкости сплава ЭП648 к высокотемпературной газовой коррозии. *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. 2014. № 36. С. 38-48.
 14. **Донцов М.Г., Невский О.И., Балмасов А.В., Кузьмичева Е.В.** Электрохимическое и химическое полирование титановых сплавов. *Металлообработка*. 2012. Т. 68. № 2. С. 18-22.
 15. **Донцов М.Г., Балмасов А.В., Семенова Н.В.** Химическое и электрохимическое полирование меди – сходства и различия. II. Влияние поверхностных слоев. *Иzv. вузов. Химия и хим. технология*. 2008. Т. 51. Вып. 12. С. 54-58.
 16. **Ставышенко А.С.** Основные показатели качества поверхности деталей из нержавеющей сталей после полирования электрохимическим способом. *Сб. науч. тр. НГТУ*. 2009. № 1(55). С. 51-56.
 17. **Лилин С.А., Балмасов А.В., Шмуклер М.В., Румянцев Е.М.** Анодное поведение гафния в водно-спиртовых растворах хлорида натрия. *Защита металлов*. 2000. Т. 36. № 3. С. 258-261.
 - Aerospace University. Acad. M.F. Reshetnev. 2014. 120 p. (in Russian).
 3. **Balmasov A.V.** Anodic treatment of tungsten-cobalt alloy in water-organic solutions. *Metalloobrabotka*. 2010. V. 56. N 2. P. 61-64 (in Russian).
 4. **Balmasov A.V., Kozlova N.B., Lilin S.A., Rumyantsev E.M.** The anodic behavior of the tungsten-cobalt alloy VK8 in aqueous-organic solutions of sodium nitrate. *Zashchita metallov*. 2000. V. 36. N 3. P. 262-265 (in Russian).
 5. **Ivanova N.P., Sinkevich Y.V., Sheleg V.K., Yankovsky I.N.** Mechanism of anodic dissolution of corrosion-resistant and structural carbon steels under conditions of electropulse polishing. *Belorus. national. tekhnich. un-t. Nauka i tekhnika*. 2013. N 1. P. 24-30 (in Russian).
 6. **Grilikhes S.Ya.** Electrochemical and Chemical Polishing: Theory and Practice. Influence on the property of metals. L.: Mashinostroyeniye. 1987. 232 p. (in Russian).
 7. **Shtan'ko V.M., Karyazin P.P.** Electrochemical polishing of metals. M.: Metallurgiya. 1979. 160p. (in Russian).
 8. **Chen S.C., Tu G.C., Huang C.A.** The electrochemical polishing behavior of porous austenitic stainless steel (AISI 316L) in phosphoric-sulfuric mixed acids. *Surface & Coatings Technology*. 2005. V. 200. P. 2065–2071. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.06.008.
 9. **Yang G., Wang B., Tawfiq K., Wei H., Zhou S., Chen G.** Electropolishing of surfaces: theory and applications. *Surf. Eng.* 2017. V. 33. N 2. P. 149-166. DOI: 10.1080/02670844.2016.1198452.
 10. **Núñez P.J., García-Plaza E., Hernando M., Trujillo R.** Characterization of Surface Finish of Electropolished Stainless Steel AISI 316L with Varying Electrolyte Concentrations. *Procedia Engineering*. 2013. V. 63. P. 771-778. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.255.
 11. **Amirkhanova N.A., Khamzina A.R.** Electrochemical polishing of heat-resistant nickel-chromium alloys ХН45МВТЮБР and ХН50ВМТЮБ. *Metalloobrabotka*. 2006. N 5-6 (35-36). P. 29-33 (in Russian).
 12. **Amirkhanova N.A., Galliev V.E., Khamzina A.R.** Increase in the resistance of gas corrosion during electrochemical polishing of alloys ХН45МВТЮБР and ХН50ВМТЮБ. *Metalloobrabotka*. 2008. N 1(43). P.17-21 (in Russian).
 13. **Amirkhanova N.A., Khamzina A.R.** Increase in Corrosion Resistance of Ep648 Alloy to High-Temperature Gas Corrosion. *Vestn. PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika*. 2014. N 36. P. 38-48 (in Russian).
 14. **Dontsov M.G., Nevsky O.I., Balmasov A.V., Kuzmicheva E.V.** Electrochemical and chemical polishing of titanium alloys. *Metalloobrabotka*. 2012. V. 68. N 2. P. 18-22 (in Russian).
 15. **Dontsov M.G., Balmasov A.V., Semenova N.V.** Chemical and electrochemical polishing of copper - similarities and differences. II. Influence of surface layers. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol*. 2008. V. 51. N 12. P. 54-58 (in Russian).
 16. **Stavyshenko A.S.** The main indicators of the surface quality of parts made of stainless steels after electrochemical polishing. *Sb. nauch. tr. NGTU*. 2009. N 1(55). P. 51-56 (in Russian).
 17. **Lilin S.A., Balmasov A.V., Shmukler M.V., Rumyantsev E.M.** Anodic behavior of hafnium in water-alcohol solutions of sodium chloride. *Zashchita metallov*. 2000. V. 36. N 3. P. 258-261 (in Russian).

18. **Лобода А.А., Мозгов С.А., Саушкин Б.П.** Электрохимическая доводка аэродинамических профилей лопаточных колес. *Изв. МГТУ «МАМИ»*. 2013. Т. 2. № 2(16). С. 251-257.
19. **Балмасов А.В., Лилин С.А., Королева Е.В.** Электрохимическое полирование серебра в водно-органических растворах роданида калия. *Защита металлов*. 2005. Т. 41. № 4. С. 386-389.
20. **Балмасов А.В., Чашина Е.Н.** Анодное поведение меди в водно-аминспиртовых растворах тиоцианата калия. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2009. Т. 52. Вып. 3. С. 42-45.
18. **Loboda A.A., Mozgov S.A., Saushkin B.P.** Electrochemical refinement of aerodynamic profiles of scapular wheels. *Izv. MGTU «MAMI»*. 2013. V. 2. N 2(16). P. 251-257 (in Russian).
19. **Balmasov A.V., Lilin S.A., Koroleva E.V.** Electrochemical polishing of silver in water-organic solutions of potassium thiocyanate. *Zashchita metallov*. 2005. V. 41. N 4. P. 386-389 (in Russian).
20. **Balmasov A.V., Chashina E.N.** Anodic behavior of copper in water-amino alcohol solutions of potassium thiocyanate. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2009. V. 52. N 3. P. 42-45 (in Russian).

*Поступила в редакцию 15.09.2017
Принята к опубликованию 12.03.2018*

*Received 15.09.2017
Accepted 12.03.2018*