

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОПОЛИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОХРОМИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ХН35ВТЮ В РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Н. А. АМИРХАНОВА<sup>1</sup>, С. В. УСТЮЖАНИНА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>R1945S@yandex.ru, <sup>2</sup>semisvet19@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 22.12.2013

**Аннотация.** Сплав на железоникелевой основе ХН35ВТЮ является перспективным материалом в производстве рабочих лопаток газотурбинных и других двигателей, компрессорных лопаток. Обработка деталей высокой точности и сложной конфигурации из данного сплава механическими методами затруднена. В качестве альтернативного метода обработки предлагается электрохимическая обработка с последующим электрополированием.

**Ключевые слова:** электрохимическая обработка; сплав ХН35ВТЮ; электролит; высота микронеровностей; коррозионная стойкость; плотность тока коррозии; микроструктура поверхности; съем металла.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время весьма перспективным для изготовления компрессорных лопаток, рабочих лопаток газотурбинных и других двигателей нового поколения является сплав, содержащий в качестве основы железо, никель и хром.

Обработка данного сплава резанием и другими традиционными методами затруднена. В связи с этим в технологии машиностроения наряду с электрофизическими методами обработки материалов находит применение электрохимическая обработка (ЭХО) как одна из наиболее перспективных.

После электрохимической обработки никельхромовых сплавов на поверхности образуется оксидная пленка, которую необходимо удалять методом механического полирования. Наиболее перспективным является проведение электрохимического (ЭХП) полирования после ЭХО, которое может заменить механическую полировку. При этом после ЭХП улучшается качество поверхности и повышается коррозионная стойкость.

Процесс ЭХП после ЭХО жаропрочных никельхромовых сплавов изучался на образцах после шлифования, и в работе [1] установлены оптимальные составы электролитов и режимы обработки для жаропрочного сплава ЖСБУ, уп-

роченного TiC. Выявлено, что наиболее эффективным является сернофосфорный электролит с добавкой глицерина.

При разработке технологического процесса электрохимического полирования должно быть уделено особое внимание выбору электролита и режимам обработки. В рамках данной работы сформированы следующие требования к электрополированию:

1) После обработки необходимо получить поверхность, имеющую меньшую высоту микронеровностей по сравнению с исходной. Поверхность должна быть ровной, светлой без расклевываний.

2) Электрополирование должно способствовать повышению коррозионной стойкости металла.

3) Необходимо обеспечить минимальный съем металла. За предельное значение величины снимаемого слоя металла принято  $d = 0,005$  мм [6]

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Целью работы было выявление оптимальных составов электролита и режима ЭХП для образцов из железохромоникелевого сплава ХН35ВТЮ после ЭХО. Электрохимическая обработка данного сплава осуществлялась на установке, моделирующей процесс ЭХО. В работе

[2] выбран наиболее оптимальный с точки зрения качества поверхности, скорости съема и точности обработки двухкомпонентный электролит – 8%NaNO<sub>3</sub>+3%NaCl. Высота микронеровностей после ЭХО при этом находится в пределах 0,5–0,7 мкм, величина плотности тока коррозии после ЭХО составляет в среднем 0,0179 А/см<sup>2</sup>. Весьма важным фактором является то обстоятельство, что электрохимическое полирование не должно сопровождаться съемом материала, для сохранения размеров деталей (в пределах допуска). Для снятия припуска толщиной 0,005 мм, максимально допустимый съем металла для образца из данного материала, диаметром 6 мм равен 0,0011 г. Для исследования процесса электрополирования были выбраны электролиты на основе серной и фосфорной кислот с различными добавками. Составы электролитов и их нумерация приведены в табл. 1 [3, 4].

Электрополирование проводилось в электролитах, при этом плотность тока варьировалась в пределах 0,07–0,71 А/см<sup>2</sup>. Изучалось влияние времени на процесс ЭХП (от 10 до 300 с). До и после ЭХП определялась масса, высота микронеровностей, исследовалась микроструктура поверхности на микроскопе МИИ-4У4.2 при увеличении ×500, с помощью коррозиметра определялась плотность тока коррозии. Для суждения о степени полирования использован параметр относительного сглаживания поверхности [7]:

$$Ra' = \frac{Ra_{\text{ЭХО}} - Ra_{\text{ЭХП}}}{Ra_{\text{ЭХП}}}$$

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты электрополирования сплава ХН35ВТЮ в электролите № 4 представлены на рис. 1–3 и в табл. 2. При изменении времени обработки при постоянной плотности тока обработки  $i = 0,32$  А/см<sup>2</sup> максимальное выравнение достигается при  $\tau = 120$  с (рис. 2, а), относительное сглаживание при этом равно 31,4 %. Из рис. 2, б видно, что при изменении плотности тока обработки при неизменном времени  $\tau = 60$  с относительное сглаживание поверхности закономерно увеличивается с увеличением плотности тока электрополирования и максимально при  $i = 0,71$  А/см<sup>2</sup> (19,9 %). Коррозионные исследования показывают, что при варьировании времени обработки при  $i = \text{const} = 0,32$  А/см<sup>2</sup> коррозионностойкость удается увеличить только при  $\tau = 10$  с (рис. 3, а). При изменении плотности тока обработки при неизменном времени обработки  $\tau = 60$  с уменьшение плотности тока коррозии можно получить при плотностях тока электрополирования 0,035, 0,07 и 0,71 А/см<sup>2</sup> (рис. 3, б). Анализ данных по ЭХП сплава ХН35ВТЮ в электролите № 4 позволяет выявить следующие режимы электрополирования, удовлетворяющие первым трем условиям: 1)  $i = 0,32$  А/см<sup>2</sup> и  $\tau = 10$  с; 2)  $i = 0,07$  А/см<sup>2</sup> и  $\tau = 60$  с; 3)  $i = 0,71$  А/см<sup>2</sup> и  $\tau = 60$  с. При этом шероховатость снижается на 3, 2,6 и 19,9 % соответственно.

Таблица 1

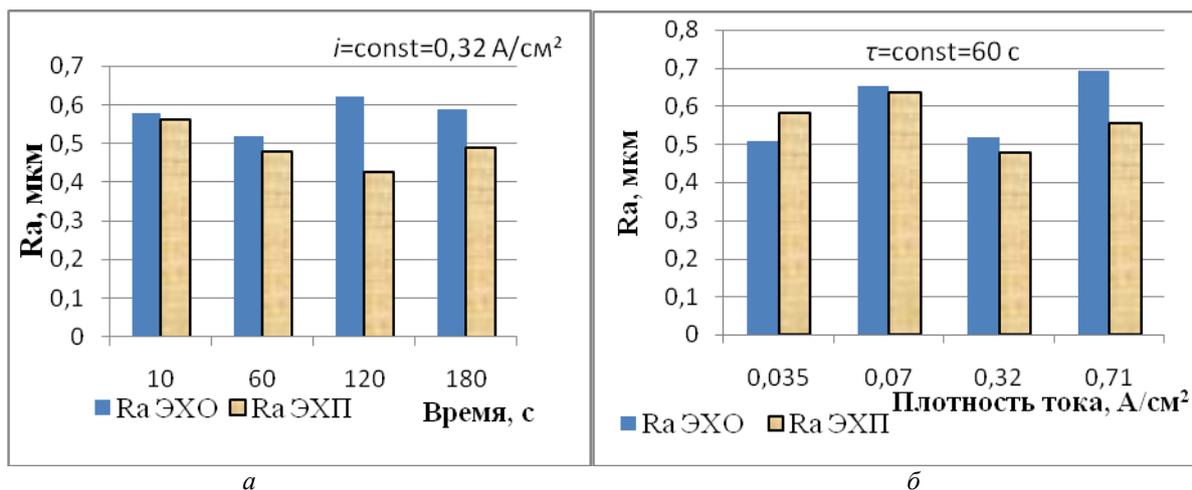
Составы электролитов для электрополирования и их нумерация

Номер	Состав электролита
1	25H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +55H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> +20H <sub>2</sub> O
2	50%(V)H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> +50%(V)H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +9 г. уротропин
3	42%H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +35%H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> +23% этиленгликоль
4	130г/лH <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> +1200г/лH <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +17 г. лимонная кислота
5	47%H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +38%H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> +15% глицерин
6	65%H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> +15%H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +5%CrO <sub>3</sub> +12% глицерин+3%H <sub>2</sub> O

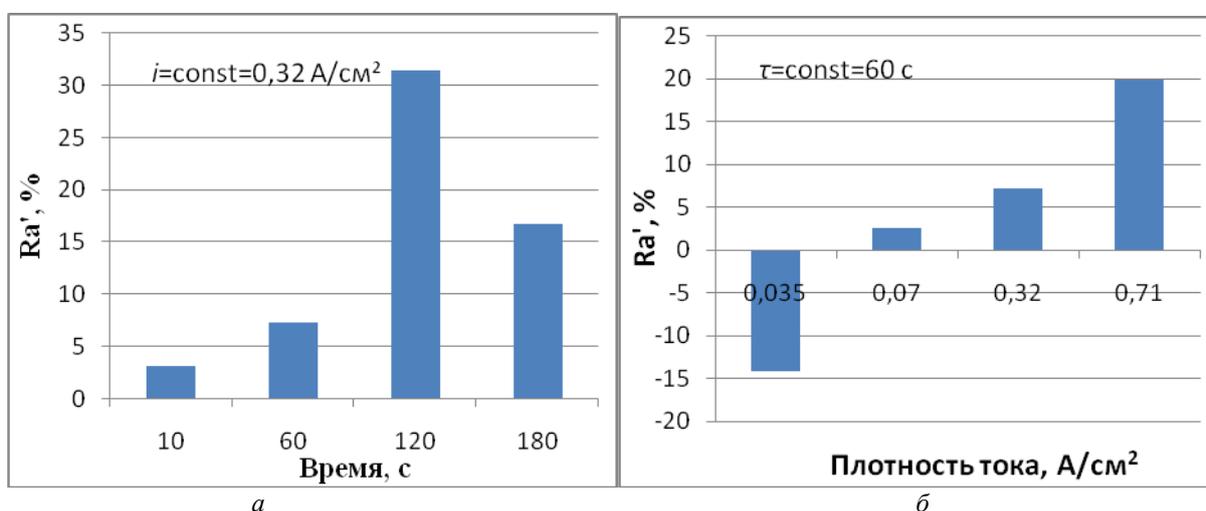
Таблица 2

Режимы и выходные параметры ЭХП в электролите № 4

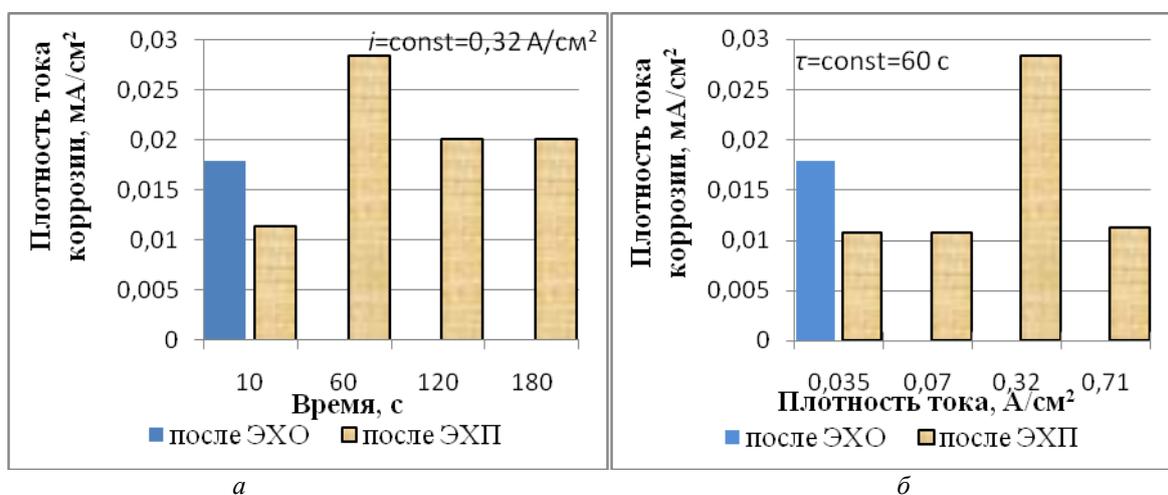
Режимы ЭХП		Выходные параметры ЭХП				
$i$ , А/см <sup>2</sup>	$\tau$ , с	$\Delta m$	Ra <sub>ЭХО</sub> , мкм	Ra <sub>ЭХП</sub> , мкм	Ra', %	$i_{\text{корр}}$ , А/см <sup>2</sup>
0,32	10	0,0003	0,578	0561	3,0	0,0113
0,32	60	0,0005	0,517	0,479	7,3	0,0284
0,32	120	0,0007	0,622	0,427	31,4	0,0201
0,32	180	0,001	0,587	0,489	16,8	0,0201
0,035	60	0,0001	0,509	0,581	-14,2	0,0108
0,07	60	0,0003	0,654	0,636	2,6	0,0108
0,71	60	0,0007	0,694	0,556	19,9	0,0113



**Рис. 1.** Высота микронеровностей сплава ХН35ВТЮ после ЭХО в 8%NaNO<sub>3</sub>+3%NaCl и после электрополирования в электролите № 4 в зависимости от времени обработки (а) и плотности тока электрополирования (б)



**Рис. 2.** Относительное сглаживание поверхности сплава ХН35ВТЮ после электрополирования в электролите № 4 в зависимости от времени обработки (а) и плотности тока электрополирования (б)



**Рис. 3.** Плотность тока коррозии сплава ХН35ВТЮ после ЭХО в 8%NaNO<sub>3</sub>+3%NaCl и электрополирования в электролите № 4 в зависимости от времени обработки (а) и плотности тока электрополирования (б)

На рис. 4–6 и в табл. 3 представлены результаты электрополирования в электролите № 6. Из рис. 5, *a* видно, что при варьировании времени электрополирования при постоянной плотности тока  $i = 0,07 \text{ A/cm}^2$  оптимальным является время обработки  $\tau = 120 \text{ с}$  (шероховатость уменьшается на 24 %). Из рис. 5, *б* видно, что при увеличении плотности обработки наблюдается выравнивание поверхности. Изучение коррозионной стойкости показало, что при варьировании времени обработки при постоянной плотности тока электрополирования  $i = 0,07 \text{ A/cm}^2$  коррозионностойкость увеличивается при времени  $\tau = 120 \text{ с}$  по сравнению с коррозионностойкостью после ЭХО, а при  $\tau = 60 \text{ с}$  и  $\tau = 180 \text{ с}$  оста-

ется одинаковой (рис. 6, *a*). При увеличении плотности тока электрополирования при постоянном времени обработки  $\tau = 60 \text{ с}$  плотность тока коррозии закономерно уменьшается и меньше исходной при плотности тока обработки  $i = 0,32; 0,71; 3,2 \text{ A/cm}^2$  (рис. 6, *б*). Анализ данных по электрополированию сплава ХН35ВТЮ в электролите № 2 позволяет выявить следующие режимы электрополирования, удовлетворяющие первым трем условиям: 1)  $i = 0,07 \text{ A/cm}^2$  и  $\tau = 120 \text{ с}$ ; 2)  $i = 0,71 \text{ A/cm}^2$  и  $\tau = 60 \text{ с}$ ; 3)  $i = 0,32 \text{ A/cm}^2$  и  $\tau = 60 \text{ с}$ . Шероховатость уменьшается на 24, 15,2 и 13,3 % соответственно.

Таблица 3

Режимы и выходные параметры ЭХП в электролите № 6

Режимы ЭХП		Выходные параметры ЭХП				
$i, \text{ A/cm}^2$	$\tau, \text{ с}$	$\Delta m$	$Ra_{\text{ЭХО}}, \text{ мкм}$	$Ra_{\text{ЭХП}}, \text{ мкм}$	$Ra^{\circ}, \%$	$i_{\text{корр}}, \text{ A/cm}^2$
0,07	10	0,0002	0,509	0,427	16,0	0,0429
0,07	60	0,0003	0,540	0,447	17,3	0,0179
0,07	120	0,0004	0,582	0,442	24,0	0,0167
0,07	180	0,0005	0,510	0,512	-0,3	0,0179
0,07	300	0,0007	0,478	0,538	-12,6	0,0220
0,035	60	0,0001	0,399	0,441	-10,7	0,0277
0,32	60	0,0008	0,530	0,460	13,3	0,0136
0,71	60	0,001	0,494	0,419	15,2	0,0113
3,2	60	0,0028	0,530	0,415	21,7	0,0086

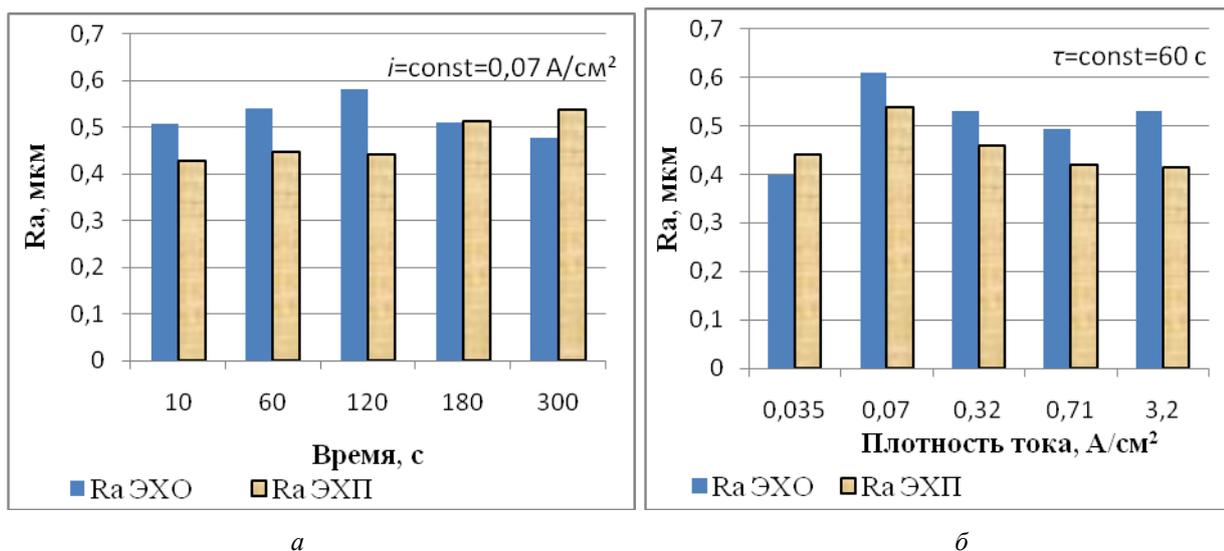


Рис. 4. Высота микронеровностей сплава ХН35ВТЮ после ЭХО в  $8\% \text{ NaNO}_3 + 3\% \text{ NaCl}$  и после электрополирования в электролите № 6 в зависимости от времени обработки (*a*) и плотности тока электрополирования (*б*)

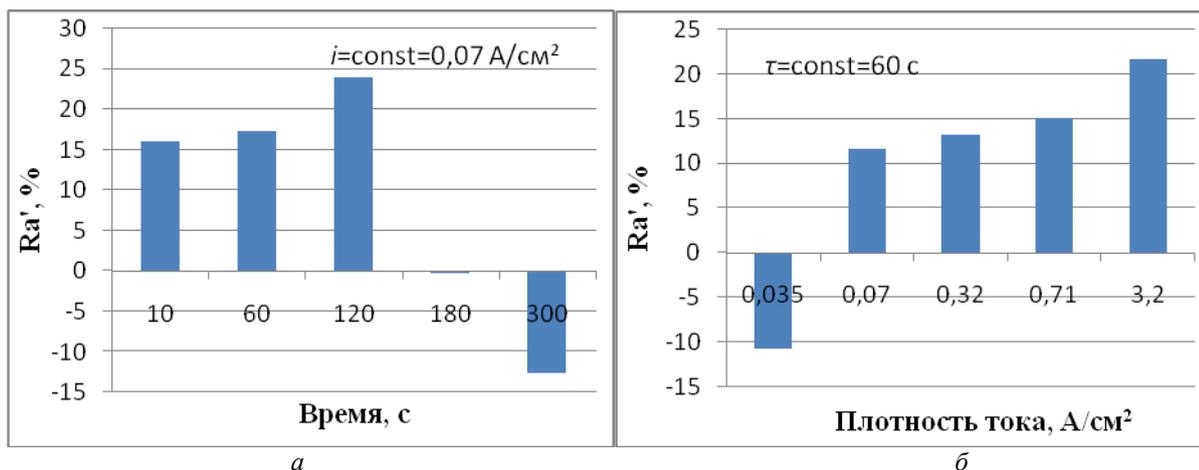


Рис. 5. Относительное сглаживание поверхности сплава ХН35ВТЮ после электрополирования в электролите № 6 в зависимости от времени обработки (а) и плотности тока электрополирования (б)

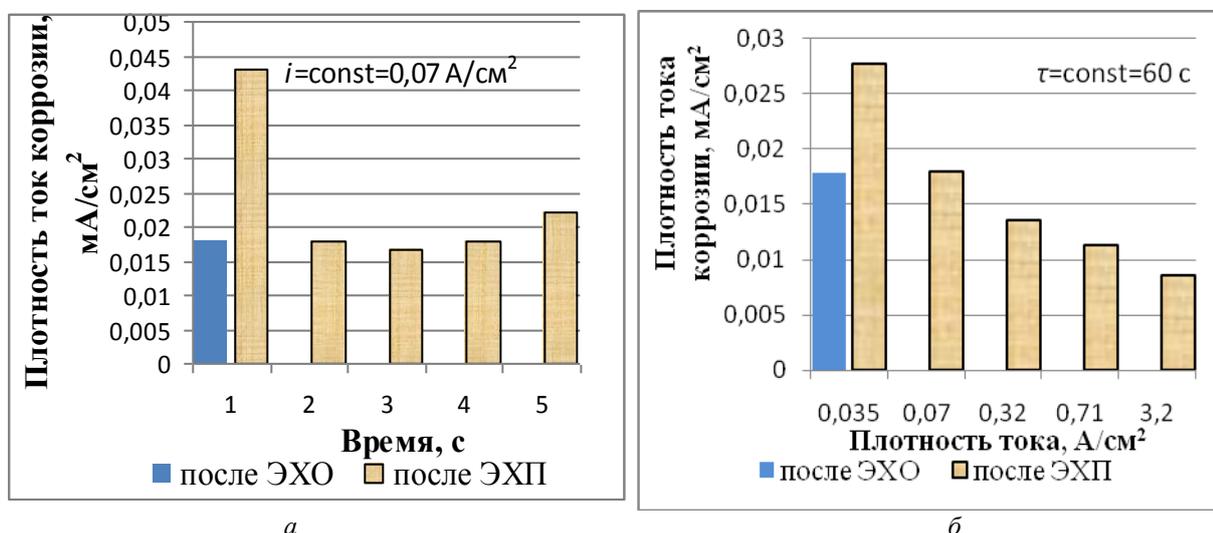


Рис. 6. Плотность тока коррозии сплава ХН35ВТЮ после ЭХО в 8%NaNO<sub>3</sub>+3NaCl и электрополирования в электролите № 6 в зависимости от времени обработки (а) и плотности тока электрополирования (б)

В табл. 4 представлены режимы электрополирования, удовлетворяющим первым трем условиям и выходные параметры обработки при

этих режимах. Наилучшие результаты по степени выравнивания представлены в табл. 5.

Таблица 4

Режимы электрополирования, удовлетворяющие трем первым условиям

Электролит			Выходные параметры		
	$i$ , A/cm <sup>2</sup>	$\tau$ , с	$\Delta m$ , г	Ra'	плотность тока коррозии, A/cm <sup>2</sup>
1	0,035	120	0,0002	16,0	0,0142
1	0,07	120	0,0009	8,9	0,0142
2	0,035	120	0,0002	10,9	0,0142
2	0,07	120	0,0006	20,2	0,0152
3	0,32	120	0,0009	20,0	0,0082
4	0,32	10	0,0003	3,0	0,0113
4	0,07	60	0,0003	2,6	0,0108
4	0,71	60	0,0007	19,9	0,0113
6	0,07	120	0,0004	24,0	0,0167
6	0,71	60	0,001	15,2	0,0113
6	0,32	60	0,0008	13,3	0,0136

Таблица 5

## Результаты электрополирования по степени выравнивания

Номер режима	Электролит	Выходные параметры				
		$i$ , А/см <sup>2</sup>	$\tau$ , с	$\Delta m$ , г	$Ra'$	плотность тока коррозии, А/см <sup>2</sup>
1	1	0,035	120	0,0002	16,0	0,0142
2	2	0,07	120	0,0006	20,2	0,0152
3	3	0,32	120	0,0009	20,0	0,0082
4	4	0,71	60	0,0007	19,9	0,0113
5	6	0,07	120	0,0004	24,0	0,0167
6	6	0,71	60	0,001	15,2	0,0113

На рис. 7 представлены микроструктуры поверхностей, соответствующие шести выбранным режимам из табл. 5. Из рисунка видно, что

наиболее равномерные светлые поверхности получены при режимах 4, 5, 6.

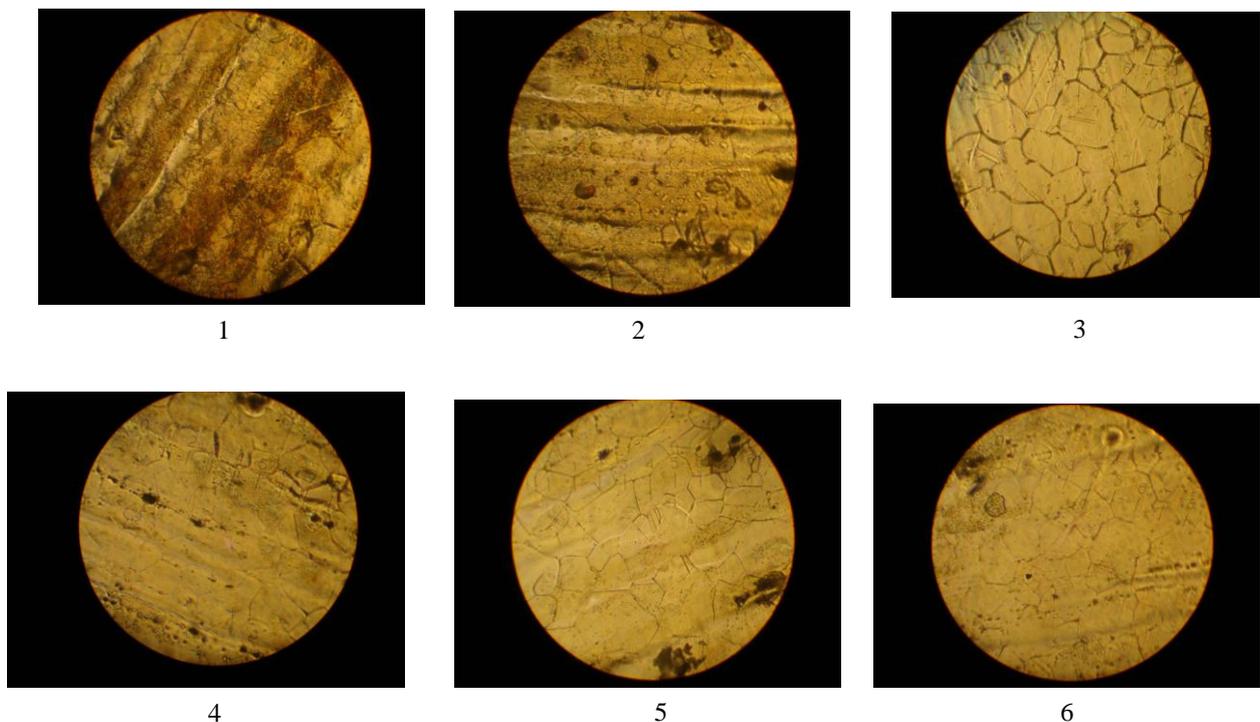


Рис. 7. Микроструктуры поверхностей при режимах и электролитах, указанных в табл. 5, при увеличении  $\times 500$

Обобщая результаты исследований, можно констатировать, что улучшение качества поверхности, снятие электрохимически поверхностной пленки, образованной после ЭХО, существенное повышение коррозионной стойкости можно обеспечить электрополированием сплава ХН35ВТЮ после ЭХО в комбинированном электролите 8%NaNO<sub>3</sub>+3%NaCl при следующих режимах:

1) Электролит 65 % H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + 15 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 5 % CrO<sub>3</sub> + 12 % глицерин + 3 % H<sub>2</sub>O, плотность тока 0,07 А/см<sup>2</sup>, время обработки 120 с. При этом снимается слой металла толщиной 0,001 мм, высота микронеровностей снижается на 24 %. Коррозионная стойкость повышается в 1,04 раза.

2) Электролит 65 % H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + 15 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 5 % CrO<sub>3</sub> + 12 % глицерин + 3 % вода, плот-

ность тока  $0,71 \text{ A/cm}^2$ , время обработки 60 с. При этом снимается слой металла толщиной  $0,0031 \text{ мм}$ , высота микронеровностей снижается на  $15,2 \%$ . Коррозионная стойкость повышается в  $1,54$  раза.

3) Электролит  $130 \text{ г/л H}_3\text{PO}_4 + 120 \text{ г/л H}_2\text{SO}_4 + 17 \text{ г/л}$  лимонная кислота, плотность тока  $0,71 \text{ A/cm}^2$ , время обработки 60 с. При этом снимается слой металла толщиной  $0,0031 \text{ мм}$ , высота микронеровностей снижается на  $19,9 \%$ . Коррозионная стойкость повышается в  $1,54$  раза.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке технологического процесса электрохимического полирования необходимо учитывать не только вышеуказанные требования к обработке, но и экономическую эффективность использования данного метода. Необходимо выбирать меньшие токи для уменьшения энергозатрат и снижать трудоемкость изготовления деталей за счет снижения времени электрополирования. Сплав ХН35ВТЮ после ЭХО рекомендуется обрабатывать в электролите  $65 \%$   $\text{H}_3\text{PO}_4 + 15 \%$   $\text{H}_2\text{SO}_4 + 5 \%$   $\text{CrO}_3 + 12 \%$  глицерин +  $3\%$   $\text{H}_2\text{O}$ , плотность тока  $0,71 \text{ A/cm}^2$ , время обработки 60 с. При этом обеспечивается относительно низкая трудоемкость, повышение коррозионной стойкости и сглаживание поверхности при небольшом съеме металла. Поверхность получается светлой и ровной без растратов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амирханова Н. А., Устюжанина С. В. Исследование влияния электрополирования после электрохимической размерной обработки сплава ЖС6У, упрочненного TiC // Мавлютовские чтения: Всерос. молодежн. науч. конф.: сб. тр. в 5 тт. Т. 5. Уфа: УГАТУ, 2011. С. 255–256. [ N. A. Amirchanova and S. V. Ustiuzhanina, "Investigation of electropolishing influence after electrochemical dimentional machihng of alloy ЖС6У, hardened by TiC," (in Russian), in *Proc. All-Russian youth scientific conference. "Mavliutovskie chtenia"*, vol. 5, USATU, Ufa, Russia, 2011, pp. 255-256. ]

2. Амирханова Н. А., Галиев В. Э., Устюжанина С. В. Особенности высокоскоростного растворения железохромоникелевого сплава ХН35ВТЮ применительно к электрохимической обработке // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 5 (50). С. 132–136. [ N. A. Amirchanova, V. E. Galiyev, and S. V. Ustiuzhanina, "Features of high-speed dissolution of iron-chromium-nickel alloy ХН35ВТЮ at electrochemical machining," (in Russian), *Vestnik UGATU*, vol. 16, no. 5 (50), pp. 132-136, 2012. ]

3. Грихилес С. Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов. Л.: Машиностроение, 1977. [ S. Ja. Grihiles, *Metal deoiling, pickling and polishing*, (in Russian). Leningrad: Mashinostrojenuje, 1977. ]

4. Бахвалов Г. Т., Биркган Л. Н., Лабутин В. П. Справочник гальваностега. М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит-ры по

черн. и цв. металлургии, 1954. [ G. T. Bachvalov, L. N. Birkgon, and V. P. Labutin, *Electroplater reference guide*, (in Russian). Moscow: State scientific-technical literature in black and color metallurgy, 1954. ]

5. Марочник сталей и сплавов / М. М. Колосков [и др.]. М.: Машиностроение, 2004. 672 с. [ M. M. Koloskov, et al., *Steels and alloys guide*, (in Russian). Moscow: Mashinostrojenuje, 2004. ]

6. Попилов Д. Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: справочник. М.: Машиностроение, 1982. 400 с. [ D. Ja. Popilov, *Electrophysical and electrochemical machining of materials: Reference guide*, (in Russian). Moscow: Mashinostrojenuje, 1982. ]

7. Электрохимическая размерная обработка металлов и сплавов. Проблемы теории и практики: монография / О. И. Невский, В. М. Бурков, Е. П. Гришина и др. Иваново: Ивановск. гос. хим.-технол. ун-т, 2006. 282 с. [ O. I. Nevskiy, V. M. Burkov, Je. P. Grishina, *Metals and alloys electrochemical dimentional machining. Theory and practice tasks*, (in Russian). Ivanovo: Ivanovo State Chemical-Technological Univ., 2006. ]

### ОБ АВТОРАХ

**АМИРХАНОВА Наиля Анваровна**, проф. каф. общей химии. Дипл. химик (КГУ, 1962). Канд. хим. наук. Д-р техн. наук по технол. электрохим. производств (М., ВИАМ, 1985). Засл. деят. науки РФ. Иссл. в обл. электрохим. обработки.

**УСТЮЖАНИНА Светлана Владимировна**, асп. каф. общей химии. Дипл. инж. по маш. и технол. высокоэф. процессов обработки (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. электрохим. обработки никельхромовых сплавов.

### METADATA

**Title:** Possibility investigation of iron-chromium-nickel alloy ХН35ВТЮ in various electrolytes after electrochemical machining.

**Authors:** N. A. Amirchanova, S. V. Ustiuzhanina

**Affiliation:** Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** semisvet19@mail.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 2 (63), pp. 47-53, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The alloy ХН35ВТЮ is a perspective material in production of working blades of gas-turbine and other engines, compressor blades. Machining of details of high precision and a difficult configuration from this alloy is complicated by mechanical methods. Electrochemical machining with following electropolishing is offered as an alternative processing method.

**Key words:** Electrochemical machining, alloy ХН35ВТЮ, electrolyte, height of microroughnesses, corrosion resistant, corrosion current density, surface microstructure, metal dissolution.

### About authors:

**АМИРХАНОВА, Nailya Anvarovna**, Prof., Dept. of Common Chemistry, Honored Scientist, Dipl. Chemist (Kazan State Univ., 1962). Cand. of Tech. Sci. Dr. of Tech. Sci. (Moscow, VIAM, 1985).

**УСТЮЖАНИНА, Svetlana Vladimirovna**, Postgrad. Student, Dept. of Common Chemistry, Dipl. Engineer (UGATU, 2010).