

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Хамзина А.Р., Квятковская А.С., Сабурова Ю.Б. Исследование обрабатываемости стали 65Г электрохимическим методом // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 5–14. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.2.01

Please cite this article in English as:

Khamzina A.R., Kvyatkovskaya A.S., Saburova Y.B. The machinability of steel 65G by electrochemical method studying. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022, vol. 24, no. 2, pp. 5-14. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.2.01

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 24, № 2, 2022
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2022.2.01

УДК 669.018+669.3/6

А.Р. Хамзина, А.С. Квятковская, Ю.Б. Сабурова

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ СТАЛИ 65Г
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Специальная конструкционная низколегированная высокоуглеродистая сталь 65Г, относится к семейству рессорно-пружинных. Одна из самых востребованных российских марок рессорно-пружинной стали, которая подходит для создания ответственных промышленных деталей. Малое количество легирующих добавок обеспечивает относительную дешевизну сплава, что и делает его крайне востребованным. При изготовлении специзделий возникает достаточное количество технологических трудностей, связанных с обеспечением формы, оптимальности производственных материальных и временных затрат. Применение перспективных методов электрохимической обработки деталей является актуальным.

Исследование высокоскоростного анодного растворения стали 65Г проведено потенциостатическим методом на приборе потенциостат ПИ-50-1.1 при скорости развертки потенциала $5 \cdot 10^{-2}$ мВ/с с использованием электролитов на основе NaNO_3 с добавками глицерина, триэтанолamina, этилового спирта, бензоата натрия, перекиси водорода. Для определения лимитирующей стадии высокоскоростного растворения изучалось влияние скорости вращения электрода, которая варьировалась от 200 до 1000 об./мин. При скорости вращения электрода 1000 об./мин выявлена область активного анодного растворения. При введении добавок с повышением концентрации триэтанолamina, бензоата натрия, этилового спирта установлено увеличение плотности тока в активной области, а в анодно-анионной области наблюдается сдвиг потенциала начала анодно-анионной активации в область положительных потенциалов и снижение плотности анодного тока.

Выявлена зависимость значений выхода по току от природы электролита при одинаковых условиях поляризации. Установлено, что наибольший выход по току наблюдается при введении 10 % этилового спирта и 0,5 % перекиси водорода. При поляризации электродов в гальваностатических условиях изучалась микроструктура обрабатываемой поверхности. По результатам исследований рекомендованы электролиты с повышенной устойчивостью к питтингообразованию и наименьшей шероховатостью поверхности после поляризации для стали 65Г.

Ключевые слова: высокоскоростное анодное растворение, поляризация, потенциостат, гальваностатические исследования, электролит, сталь, выход по току, лимитирующая стадия, анодно-анионная область, потенциал, плотность тока, шероховатость поверхности.

A.R. Khamzina, A.S. Kvyatkovskaya, Y.B. Saburova

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

THE MACHINABILITY OF STEEL 65G BY ELECTROCHEMICAL METHOD STUDYING

Special structural low-alloy high-carbon steel 65G, belongs to the spring-spring family. One of the most popular Russian grades of spring steel, which is suitable for creating responsible industrial parts. A small amount of alloying additives provides the relative cheapness of the alloy, which makes it extremely popular. In the manufacture of special products, there are a lot of technological difficulties associated with ensuring the form, optimality of production material and time costs. The use of promising methods of electrochemical processing of parts is relevant.

The study of high-speed anodic dissolution of steel 65G was carried out by the potentiostatic method on a ПИ-50-1.1 device (potentiostat) at a potential rate of $5 \cdot 10^{-2}$ mV/s using electrolytes based on NaNO_3 with the addition of glycerol, triethanolamine, ethyl alcohol, sodium benzoate, hydrogen peroxide. To determine the limiting step of high-speed dissolution, the effect of the electrode rotation speed was studied, which ranged from 200 to 1000 rpm. At the electrode rotation speed of 1000 rpm, an active anode dissolution region was detected. When adding additives with increase of concentration of triethanolamine, sodium benzoate, ethyl alcohol, increase of current density in active area is established, and in anode-anionic area potential of anodic-anionic activation beginning is shifted to area of positive potentials and decrease of anode current density is observed.

Dependence of current output values on electrolyte nature under identical polarization conditions is revealed. It was found that the highest current yield was observed with the introduction of 10 % ethyl alcohol and 0.5 % hydrogen peroxide. When polarizing electrodes under galvanostatic conditions, the microstructure of the treated surface was studied. Based on the results of the studies, electrolytes with increased resistance to pitting and the lowest surface roughness after polarization for steel 65G were recommended.

Keywords: high-speed anodic dissolution, polarization, potentiostat, galvanostatic studies, electrolyte, steel, current output, limiting stage, anodic-anionic region, potential, current density, surface roughness.

Введение

Сталь 65Г является конструкционным материалом с высокой степенью упругости, что позволяет использовать его в машиностроении и станкостроении для производства механизмов, работающих под длительными и высокими нагрузками [1–3]. Перспективным с этой точки зрения является применение новых методов электрохимической обработки (ЭХО) при изготовлении деталей. Однако в литературных источниках отсутствует информация об особенностях электрохимической обработки стали 65Г.

Для разработки технологии электрохимической обработки деталей необходимо определение диапазонов технологических возможностей ЭХО указанной стали. Для выяснения закономерностей высокоскоростного анодного растворения и применимости того или иного электролита в потенциодинамических условиях снимались поляризационные кривые [4]. Поляризационные потенциодинамические исследования заключаются в установлении зависимости значений тока от задаваемых электроду некоторых значений потенциала [5–8].

Пружинистая сталь марки 65Г на основе железа содержит С 0,62 ... 0,7 %, незначительное количество хрома (меньше 0,25 %), никеля и меди [9–10]. Для изготовления деталей из данной стали электрохимическим методом исследовалось высокоскоростное анодное растворение в электролите на основе 8 % NaNO_3 и составных электролитах с добавками глицерина, этилового спирта ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), бензоата натрия, перекиси водорода [11; 12].

Экспериментальная часть

Поляризация электродов осуществлялась от электронного потенциостата ПИ-50-1.1 со скоростью развертки $5 \cdot 10^{-2}$ мВ/с. Потенциалы измеря-

лись относительно насыщенного хлорсеребряного электрода. Для исключения омической составляющей из величины анодных потенциалов изменение потенциалов проводилось с помощью капилляра Луггина – Габера (8–10 мкм), сообщаемого с электродом сравнения и подводимого на близкое расстояние (6–10 мкм) к исследуемому электроду. Для проведения поляризационных измерений применялась установка с вращающимся дисковым электродом. Электрод закреплялся на валу установки при помощи изолированного цангового зажима и приводился во вращение с помощью электродвигателя постоянного тока. Подвод тока к электроду осуществлялся на валу медным диском и графитовыми щеточками [13–19].

Гальваностатические поляризационные исследования проводились на потенциостате при скорости вращения электрода 200, 500, 1000 об./мин, плотности тока 1 А/см² в течение 200 с, в серии электролитов, представленных в табл. 1. Подробная методика проведения гальваностатических исследований представлена в работах [20–23].

Далее при обсуждении результатов нумерация исследованных электролитов соответствует табл. 1.

Для определения лимитирующей стадии высокоскоростного растворения изучалось влияние скорости вращения электрода, которая варьировалась от 200 до 1000 об/мин.

Для установления влияния природы электролита на высокоскоростную растворимость стали 65Г снимались потенциодинамические поляризационные кривые в электролитах, приведенных в табл. 1. В качестве добавок к основе электролита 8%-ного NaNO_3 использовали глицерин (0,4; 1; 2%-ный) триэтаноламин, концентрация которого изменялась от 0,1 до 0,5 % и который является ингибитором для углеродистых сталей. Далее в качестве добавки ис-

пользовался бензоат натрия (C_6H_5COONa) 0,1...1 %. Произведена замена растворителя – воды на этиловый спирт. Концентрация спирта варьировалась от 10 до 30 %. В связи с тем, что углеродистая сталь практически не содержит легирующих компонентов кроме углерода, для снижения активного анодного растворения в электролит добавлялась перекись водорода (0,5...1 %).

Таблица 1

Составы электролитов

№ электролита	Электролит
1	8 % $NaNO_3$
2	8 % $NaNO_3$ + 0,4 % глицерина
3	8 % $NaNO_3$ + 1 % глицерина
4	8 % $NaNO_3$ + 2 % глицерина
5	8 % $NaNO_3$ + 0,1 % триэтанолламин
6	8 % $NaNO_3$ + 0,5 % триэтанолламин
7	8 % $NaNO_3$ + 0,1 % C_6H_5COONa
8	8 % $NaNO_3$ + 1 % C_6H_5COONa
9	8 % $NaNO_3$ + 10 % C_2H_5OH
10	8 % $NaNO_3$ + 30 % C_2H_5OH
11	8 % $NaNO_3$ + 0,5 % H_2O_2
12	8 % $NaNO_3$ + 1 % H_2O_2

На рис. 1 представлены потенциодинамические поляризационные кривые для стали 65Г в электролите 8%-ного $NaNO_3$.

Как видно из рис. 1, характер поляризационных кривых с увеличением числа оборотов особенно изменяется в анодно-анионной области и при 1000 об./мин появляется область активного растворения, где максимум тока активного анодного растворения $i = 2,1 \text{ A/cm}^2$ наблюдается при $\phi = 0,7 \text{ В}$. В анодной области при положительных потенциалах выделяется кислород, происходит закономерный сдвиг потенциалов в область более отрицательных значений с увеличением числа оборотов от 200

до 1000 об./мин. При $\phi = 2,5 \text{ В}$ плотность анодного тока (при 200 об./мин) $i = 1 \text{ A/cm}^2$, при 500 об./мин $i = 2,8 \text{ A/cm}^2$, при 1000 об./мин $i = 5,6 \text{ A/cm}^2$, т.е. с увеличением числа оборотов плотность анодного тока возрастает в 12 раз.

Таким образом, при увеличении числа оборотов повышается скорость процессов, особенно в анодно-анионной области.

На рис. 2–9 приведены потенциодинамические поляризационные кривые при растворении сплава 65Г в электролитах под номерами 2–12 (см. табл. 1).

Добавки триэтанолламина (см. рис. 2, 3) с концентрацией 0,1 и 0,5 % не влияют на закономерность увеличения плотности тока с повышением числа оборотов. Однако наблюдается следующая картина: триэтанолламин при концентрации 0,1 % и, особенно, 0,5 % способствует сдвигу потенциала в анодно-анионной области в область более положительных значений по сравнению с 8%-ным $NaNO_3$.

Рассматривалось влияние добавки глицерина на ход поляризационных кривых. Концентрация варьировалась от 0,4 до 2 %. На рис. 4 и 5 представлены поляризационные кривые в составных электролитах с добавкой глицерина.

При 1000 об./мин (см. рис. 5) наблюдается увеличение плотности анодного тока в области активного анодного растворения с повышением концентрации глицерина. В 8%-ном $NaNO_3$ максимум плотности в активной области $i = 2,1 \text{ A/cm}^2$, а при добавлении 2 % глицерина возрастает в 2 раза. Как и при введении триэтанолламина, добавка глицерина в количестве 1 % способствует сдвигу потенциала в область более положительных значений. Характер изменения в анодно-анионной области при увеличении концентрации глицерина меняется незначительно.

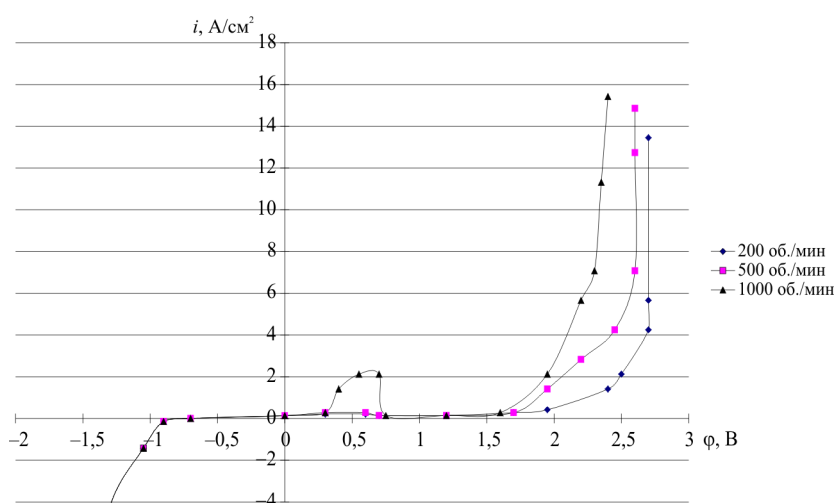


Рис. 1. Потенциодинамические кривые, полученные при растворении сплава 65Г в электролите 8%-ного $NaNO_3$, при скорости вращения электрода 200, 500 1000 об./мин (t электролита 18 °С, скорость развертки $5 \cdot 10^{-2} \text{ мВ/с}$)

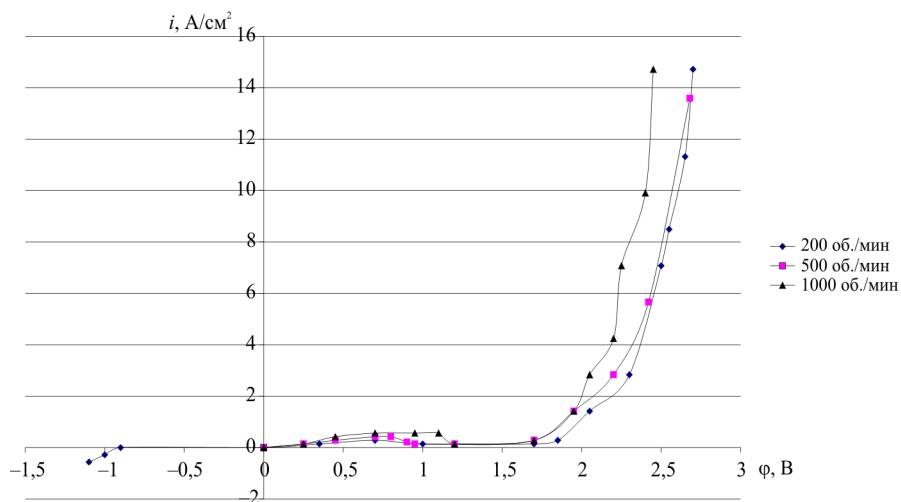


Рис. 2. Потенциодинамические кривые, полученные при растворении сплава 65Г в электролите 8 % NaNO_3 + 0,1 % триэтаноламина, при скорости вращения электрода 200, 500, 1000 об./мин (t электролита 18 °С, скорость развертки $5 \cdot 10^{-2}$ мВ/с)

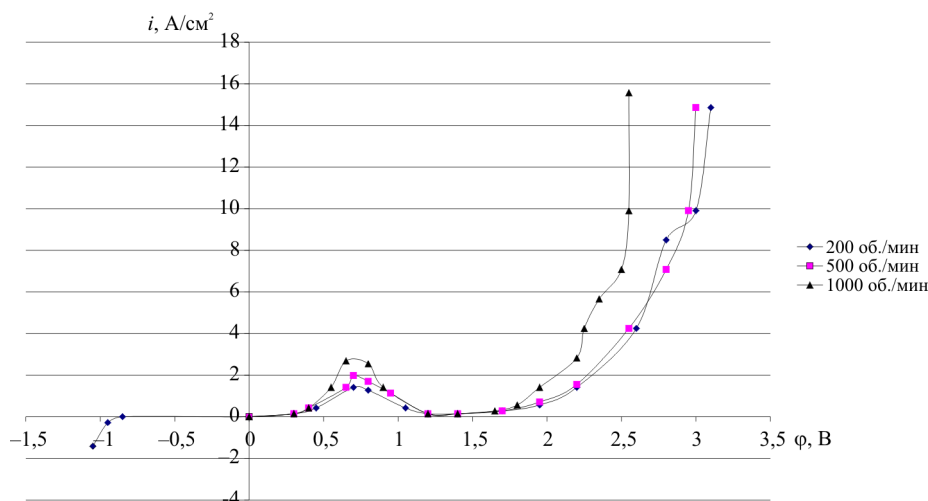


Рис. 3. Потенциодинамические кривые, полученные при растворении сплава 65Г в электролите 8 % NaNO_3 + 0,5 % триэтаноламина, при скорости вращения электрода 200, 500, 1000 об./мин (t электролита 18 °С, скорость развертки $5 \cdot 10^{-2}$ мВ/с)

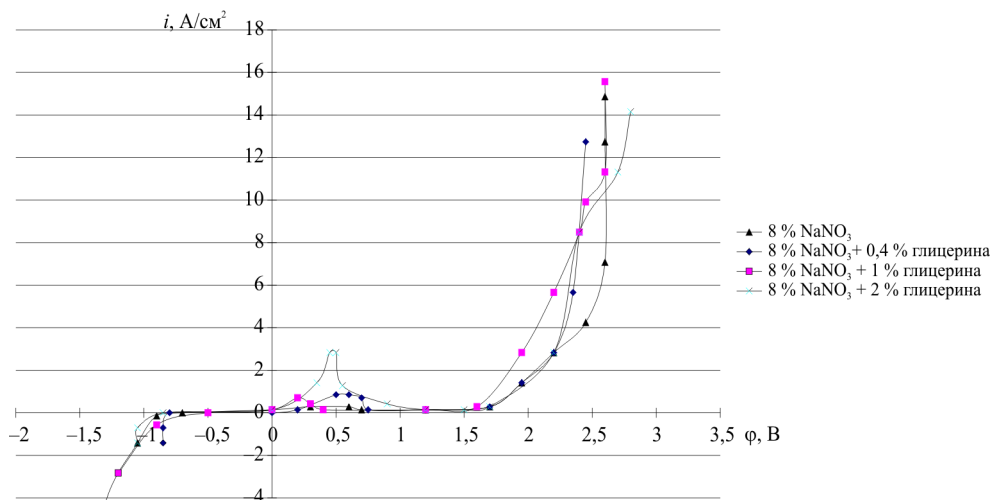


Рис. 4. Потенциодинамические кривые, полученные при растворении сплава 65Г, при скорости вращения электрода 500 об./мин (t электролита 18 °С, скорость развертки $5 \cdot 10^{-2}$ мВ/с)

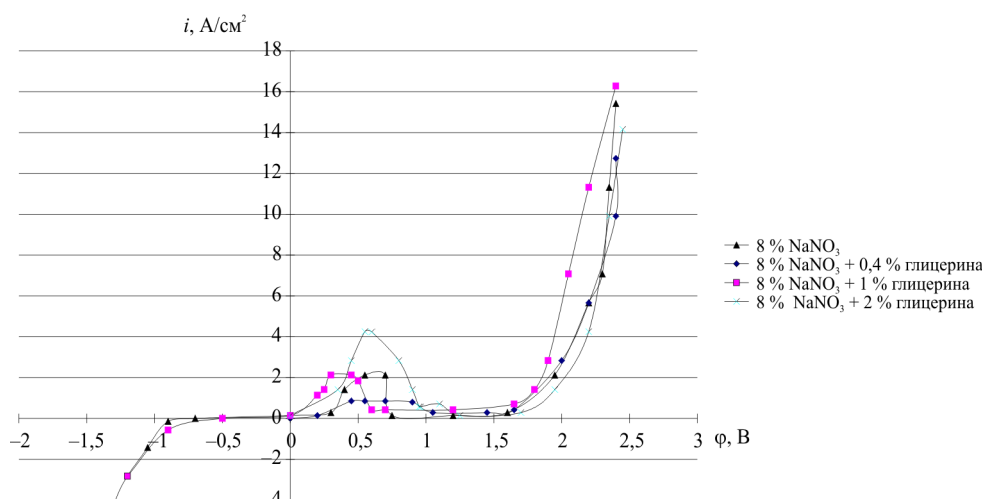


Рис. 5. Потенциодинамические кривые, полученные при растворении сплава 65Г, при скорости вращения электрода 1000 об./мин (t электролита 18 °С, скорость развертки $5 \cdot 10^{-2}$ мВ/с)

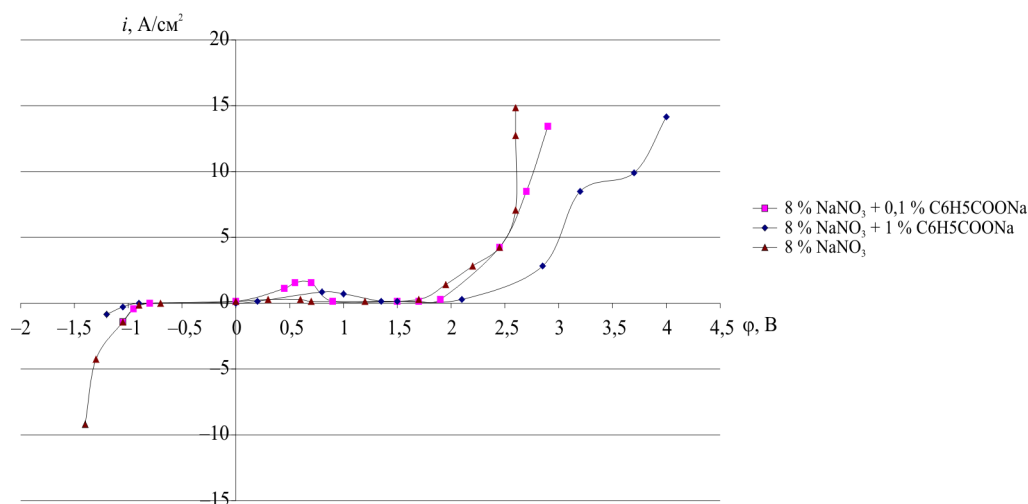


Рис. 6. Потенциодинамические кривые, полученные при растворении сплава 65Г, при скорости вращения электрода 500 об./мин (t электролита 18 °С, скорость развертки $5 \cdot 10^{-2}$ мВ/с)

На рис. 6 и 7 представлены поляризационные кривые при введении в электролит на основе 8%-ного NaNO_3 бензоата натрия. Как и при введении триэтаноламина и глицерина, проявляется область активного анодного растворения, наблюдается уменьшение плотности тока в анодно-анионной области. Чем больше концентрация добавки 1%-ного бензоата натрия, тем при более положительных потенциалах наблюдается анодно-анионная область (рис. 6).

С повышением концентрации добавки наблюдается закономерное снижение плотности поляризующего тока в анодно-анионной области при скорости вращения 500 об./мин $i = 5 \text{ A/cm}^2$ и $i = 1,8 \text{ A/cm}^2$ (см. рис. 6); при скорости вращения 1000 об./мин $i = 7 \text{ A/cm}^2$ и $i = 3 \text{ A/cm}^2$, $i = 0,4 \text{ A/cm}^2$ (см. рис. 7).

Рассмотрим влияние этилового спирта на ход поляризационных кривых (рис. 8, 9). Характер изменения хода поляризационных кривых как в ак-

тивной, так и в анодно-анионной области при введении спирта практически такой же, как и при введении триэтаноламина и бензоата натрия.

С повышением концентрации этилового спирта (см. рис. 8, 9), наблюдается также снижение плотности поляризующего тока в анодно-анионной области при скорости вращения 500 об./мин: $i = 3 \text{ A/cm}^2$, $i = 2,5 \text{ A/cm}^2$ и $i = 2 \text{ A/cm}^2$. При скорости вращения электрода 1000 об./мин (см. рис. 9) плотность тока составляет $i = 7 \text{ A/cm}^2$ и $i = 4 \text{ A/cm}^2$, $i = 3,5 \text{ A/cm}^2$.

Добавки спирта способствуют появлению активной области и уменьшению плотности тока в области анодно-анионной активации.

Обобщая полученные данные, можно отметить общую закономерность: при введении добавок триэтаноламина, бензоата натрия и этилового спирта наблюдается снижение плотности тока в анодно-анионной области, расширение области пассивации. Совершенно по-другому влияют на

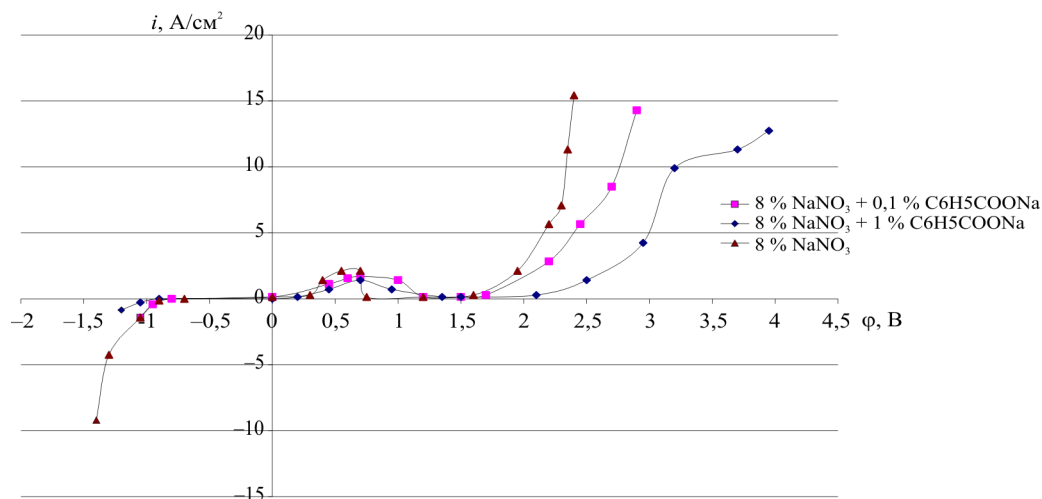


Рис. 7. Потенциодинамические кривые, полученные при растворении сплава 65Г, при скорости вращения электрода 1000 об./мин (t электролита 18 °С, скорость развертки $5 \cdot 10^{-2}$ мВ/с)

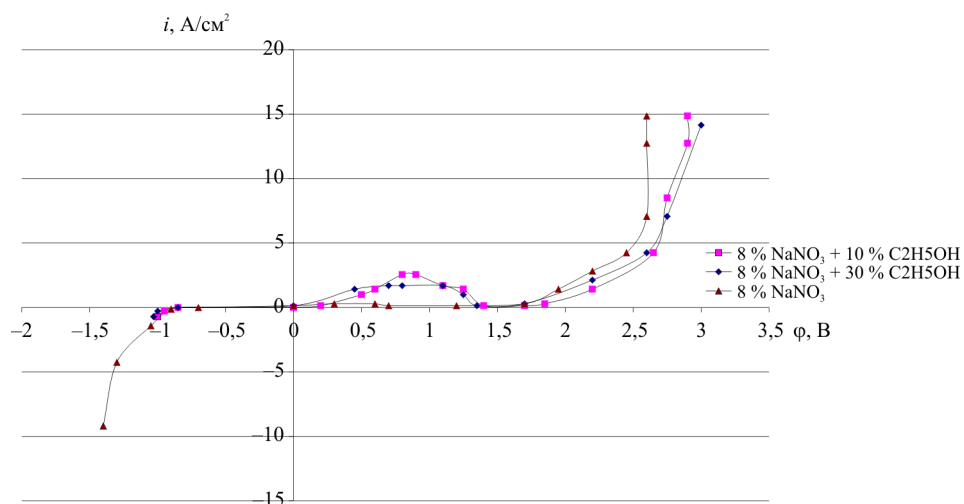


Рис. 8. Потенциодинамические кривые, полученные при растворении сплава 65Г, при скорости вращения электрода 500 об./мин (t электролита 18 °С, скорость развертки $5 \cdot 10^{-2}$ мВ/с)

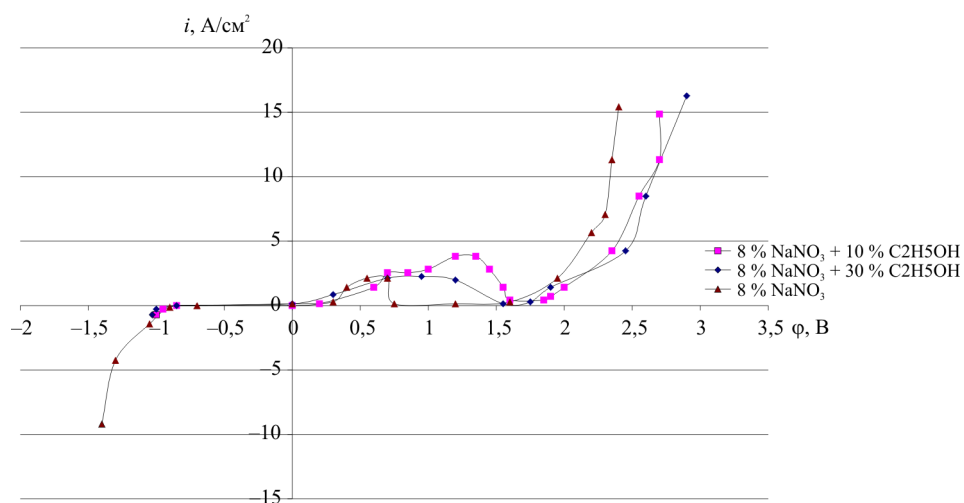


Рис. 9. Потенциодинамические кривые, полученные при растворении сплава 65Г, при скорости вращения электрода 1000 об./мин (t электролита 18 °С, скорость развертки $5 \cdot 10^{-2}$ мВ/с)

ход поляризационных кривых добавки глицерина. При введении глицерина повышаются плотности тока в активной области, а плотности тока в анодно-анионной области изменяются практически идентично при варьировании концентрации от 0,4 до 2 %. Во всех случаях повышение числа оборотов до 1000 об./мин способствует повышению плотности тока в анодно-анионной области.

Для суждения о влиянии природы электролита на выход по току проводились гальваностатические исследования. Получается характерная гальванодинамическая кривая в 8%-ном NaNO_3 (рис. 10), выявленная при 500 об./мин.

Как видно из рис. 10, начиная с потенциала $\varphi = 3,5$ В, наблюдается резкое увеличение плотности анодного тока с 8 до 16 A/cm^2 , т.е. при 3,5 В, очевидно, происходит устойчивая ионизация сплава в анодно-анионной области.

Исследования определения выхода по току от природы электролита при одинаковых условиях поляризации представлены на рис. 11.

Выявлена зависимость значений выхода по току от природы электролита. В электролите 8%-ного NaNO_3 выход по току стали составляет $\eta = 26,8 \%$. При введении глицерина от 0,4 до 2 % наблюдается закономерное повышение выхода по току от 20,11 до 53,6 %. Добавки триэтанолamina также способствуют повышению выхода по току. Выход по току при введении 0,5 % триэтанолamina почти в 2 раза больше, чем для чистого 8%-ного NaNO_3 . Добавки бензоата натрия неблагоприятны, так как при их введении выход по току снижается и достигает значения 18 %. Введение этилового спирта способствует значительному повышению выхода по току при концентрации 10 % ($\eta = 80,4 \%$), с увеличением концентрации спирта до 30 % выход по току уменьшается и

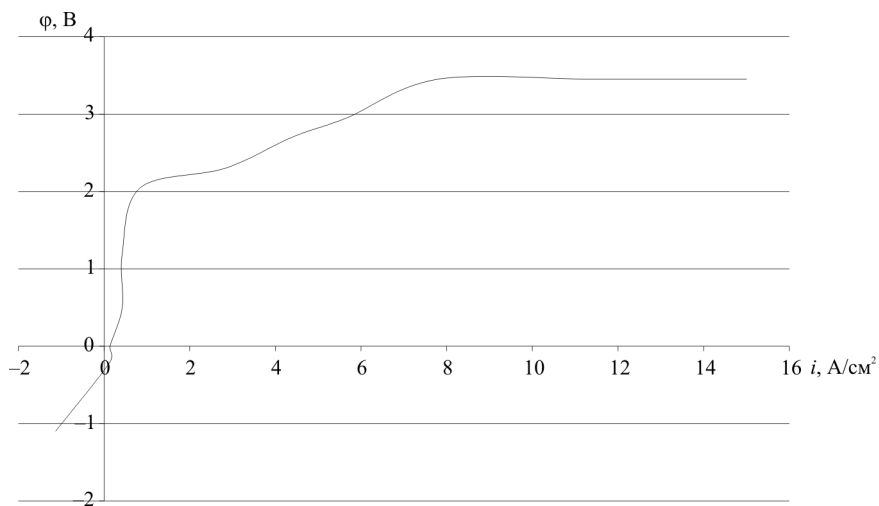


Рис. 10. Гальванодинамическая кривая сплава 65 Г при скорости вращения электрода 500 об./мин (t электролита 18°C , скорость развертки $5 \cdot 10^{-2}$ мВ/с)

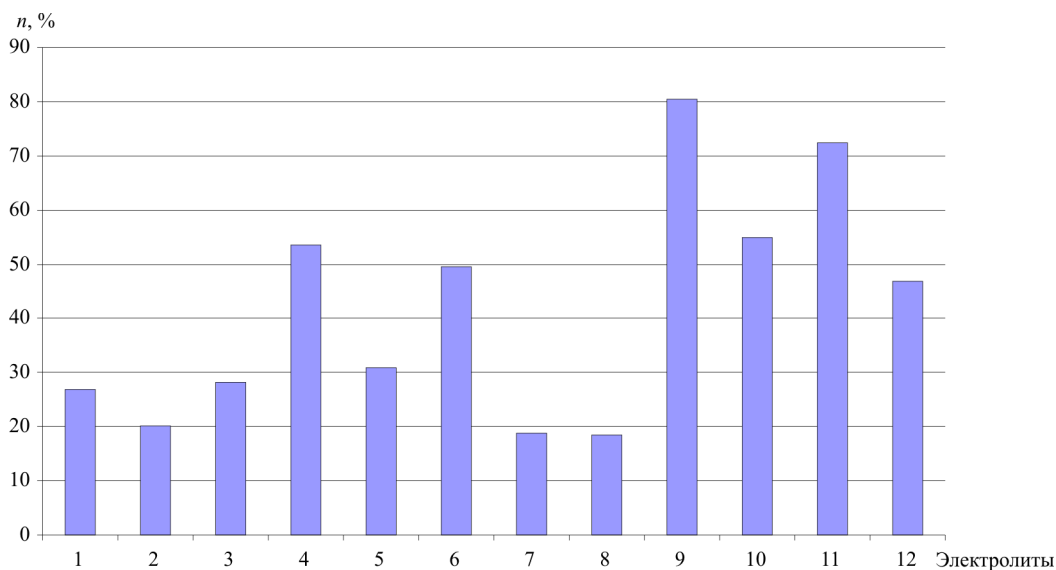


Рис. 11. Значения выхода по току сплава 65Г после поляризации в различных электролитах

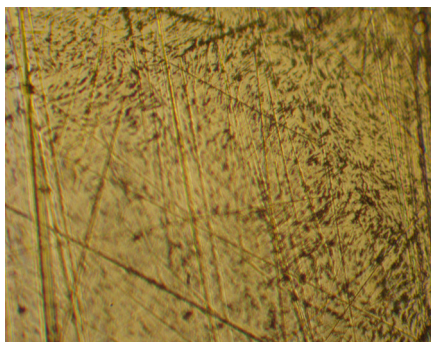


Рис. 12. Микроструктура поверхности после поляризации в электролите 8 % NaNO₃ + 0,4 % глицерина (ув. ×50)

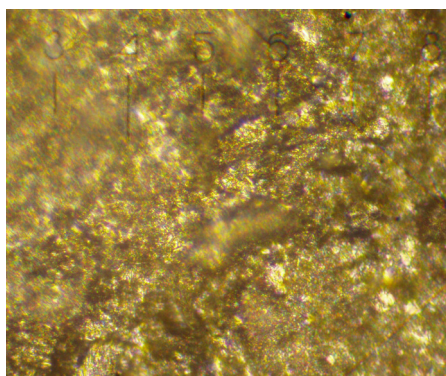


Рис. 13. Микроструктура поверхности после поляризации в электролите 8 % NaNO₃ + 2 % глицерина (ув. ×50)

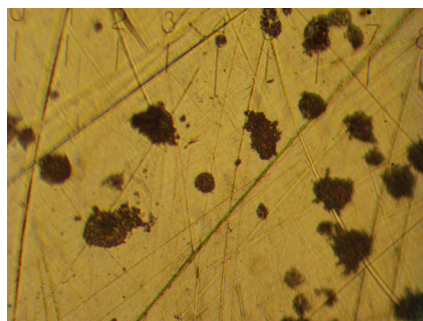


Рис. 14. Питтинги на поверхности стали 65Г после поляризации в электролите 8 % NaNO₃ + 1 % H₂O₂ (ув. ×50)

водорода H₂O₂ с концентрацией до 0,5 % также способствует повышению выхода по току в 2,7 раза. Выход по току при добавлении 0,5 % H₂O₂ выше, чем в 8%-ном NaNO₃, однако повышение концентрации перекиси водорода до 1 % приводит к понижению выхода по току в 1,5 раза.

Таким образом, анализируя результаты по определению выхода по току, установлено, что наибольший выход наблюдается при введении 10 % спирта, 0,5 % H₂O₂ и примерно одинаковые значения, в пределах 50 ... 54 %, установлены в электролитах с добавками 2 % глицерина, 0,5 % триэтаноламина, 30 % спирта и 1 % H₂O₂.

При поляризации электродов в гальваностатических условиях изучалась микроструктура обрабатываемой поверхности. На рис. 12–13 представлены микроструктуры образцов, обработанных в электролитах с повышенной устойчивостью к питтингообразованию.

Выявлено наличие питтингов по всей поверхности образцов после поляризации в электролитах на основе 8 % NaNO₃ с добавками H₂O₂, триэтаноламина, этилового спирта и перекиси водорода (рис. 14) и бензоата натрия.

В табл. 2 приведены значения микронеровностей после поляризации образцов. Как видно из табл. 2, наименьшая высота микронеровностей – 0,172–0,175 мкм достигается при поляризации в электролитах 8 % NaNO₃ + 0,4 % глицерина и 8 % NaNO₃ + 2 % глицерина, поверхность светло-серая, наблюдается устойчивость к питтингообразованию.

Заключение

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- при поляризации пружинистой стали 65Г в 8%-ном NaNO₃ преимущественно происходит ионизация сплава в анодно-анионной области;

- при скорости вращения электрода 1000 об./мин появляется область активного анодного растворения. При введении добавок триэтаноламина 0,1 и 0,5 %, бензоата натрия 0,1 и 1 %, 10 % C₂H₅OH, а также 30 % C₂H₅OH увеличиваются токи с повышением концентрации в активной области, а в анодно-анионной области наблюдается сдвиг потенциала начала анодно-анионной активации в область положительных потенциалов и снижение плотности тока. Совершенно по-иному влияет добавка глицерина. При введении глицерина от 0,4 до 2 % повышается плотность тока в активной области, а характер ионизации в анодно-анионной области сохраняется;

- оптимальным электролитом по результатам определения выхода по току и качества поверхности являются электролиты: 8 % NaNO₃ + 0,4–2 %

Таблица 2

Значения микронеровностей после поляризации образцов

№ электролита	Электролит	Ra, мкм
2	8 % NaNO ₃ + 0,4 % глицерина	0,172
3	8 % NaNO ₃ + 1 % глицерина	0,256
4	8 % NaNO ₃ + 2 % глицерина	0,175
9	8 % NaNO ₃ + 10 % C ₂ H ₅ OH	0,302
10	8 % NaNO ₃ + 30 % C ₂ H ₅ OH	0,376

близок по своим значениям к выходу по току к 8 % NaNO₃ + 2 % глицерина. Добавление перекиси

глицерина, где $\eta \approx 53\%$, Ra 0,172–0,175 мкм. Данный электролит является дешевым для применения в серийном производстве деталей из стали 65Г, изготавливаемых методом электрохимической размерной обработки.

Библиографический список

1. Фролов К.В. Энциклопедия. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. II-3. – 780 с.
2. Марочник сталей и сплавов / сост. А.С. Зубченко [и др.]; под ред. А.С. Зубченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 782 с.
3. Инструментальные материалы: учеб. пособие / Г.А. Воробьева [и др.]. – СПб.: Политехника, 2005. – 267 с.
4. Хамзина А.Р. Исследования высокоскоростного анодного растворения стали 65Г // III Международная научная конференция. Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности. – Казань: НПП Медпромдеталь, 2021. – С. 126–128.
5. Кац Н.Г. Анализ поляризационных кривых стальных и магниевых сплавов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2016. – № 2 (50). – С. 193–196.
6. Кац Н.Г., Васильев С.В. Поляризационные характеристики металлических материалов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2016. – № 1(49). – С. 138–142.
7. Дамаскин Б.Б., Петрий О.А., Цирлина Г.А. Электрохимия. – 2-е изд., перераб. – М.: Химия, КолосС, 2006. – 672 с.
8. Комиссаренков А.А., Пругло Г.Ф., Федоров В.А. Потенциометрия: учебно-методическое пособие / СПбГТУРП. – СПб., 2013. – 64 с.
9. Рахштадт А.Г. Пружинные стали и сплавы. – 3-е изд., доп. и перераб. – М.: Металлургия, 1982. – 400 с.
10. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. – 2-е изд. – М.: МИСИС, 1999. – 407 с.
11. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г.Л. Амитан [и др.]; под общ. ред. В.А. Волосатова. – Л.: Машиностроение: Ленингр. отд-ние, 1988. – 718 с.
12. Попилов Д.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: справочник – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.
13. Амирханова Н.А., Саяпова В.В. Особенности высокоскоростного анодного растворения никельхромовых сплавов. – Уфа: Гилем, 2002. – 200 с.
14. Хенце Г. Полярография и вольтамперометрия. Теоретические основы и аналитическая практика / пер. с нем. А.В. Гармаша и А.И. Каменева. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 284 с.
15. Плешкова Е.В., Виноградова С.С. Влияние скорости развертки при потенциодинамической поляризации на критерии питтингостойкости нержавеющей сталей // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20, № 6. – С. 51–53.
16. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. – СПб.: НПО «Профессионал», 2006. – Ч. II. – 916 с.

17. Амирханова Н.А., Галиев В.Э., Хамзина А.Р. Исследование обрабатываемости сплава ХН45МВТЮБР электрохимическим методом // Современные методы в теоретической и экспериментальной электрохимии: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. – Иваново: ИГХТУ, 2010. – С. 74.

18. Дмитриевич И.Н. Электрохимические методы анализа: практика применения в ЦБП: учеб.-метод. пособие / СПбГТУРП. – СПб., 2012. – 95 с.

19. Электрохимические методы исследования локальной коррозии пассивирующихся сплавов и многослойных систем: монография / Р.А. Кайдриков [и др.]; Казанский национальный исследовательский технологический университет. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. – 141 с.

20. Электроаналитические методы / под ред. Ф. Шольца. – М.: Мир, БИНОМ, 2009. – 326 с.

21. Основы аналитической химии: практическое руководство / Ю.А. Барбалат [и др.]; под ред. Ю.А. Золотова, Т.Н. Шеховцовой, К.В. Осолка. – М.: Лаборатория знаний, 2017. – 462 с.

22. Исхакова И.О., Виноградова С.С. Модификация поверхностей хромоникелевых сталей в условиях импульсной гальваностатической поляризации // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2012. – Т. 15, № 19. – С. 67–69.

23. Виноградова С.С., Тазиева Р.Ф. Исследование характеристик питтингостойкости хромоникелевых сталей в гальваностатических условиях на основе моделирования процесса // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–14. – С. 3013–3018.

References

1. Frolov K.V. Entsiklopediia [The Encyclopedia]. Moscow: Mashinostroenie, 2001, vol. II-3, 780 p.
2. Marochnik staley i splavov [Steel and Alloys Handbook]. Ed. A.S. Zubchenko. 2nd. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 782 p.
3. Instrumental'nye materialy [Instrumental materials]. G.A. Vorob'eva et al. Saint-Petersburg: Politekhnik, 2005, 267 p.
4. Khamzina A.R. Issledovaniia vysokoskorostnogo anodnogo rastvoreniia stali 65G [Studies of high-speed anodic dissolution of 65Mn steel]. III *Mezhdunarodnaia nauchnaia konferentsiia. Prioritetnye napravleniia innovatsionnoi deiatel'nosti v promyshlennosti*. Kazan': NPP Medpromdetal', 2021, pp. 126–128.
5. Kats N.G. Analiz poliarizatsionnykh krivykh stal'nykh i magnievykh splavov [Analysis of polarization curves of steel and magnesium alloys]. *Vestnik Samarского gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Serii: Tekhnicheskii nauki*, 2016, no. 2 (50), pp. 193–196.
6. Kats N.G., Vasil'ev S.V. Poliarizatsionnye kharakteristiki metallicheskih materialov [Polarization characteristics of metallic materials]. *Vestnik Samarского gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Serii: Tekhnicheskii nauki*, 2016, no. 1(49), pp. 138–142.
7. Damaskin B.B., Petrii O.A., Tsirlina G.A. Elektrokimiia [Electrochemistry]. 2nd. Moscow: Khimiia, KolosS, 2006, 672 p.
8. Komissarenkov A.A., Pruglo G.F., Fedorov V.A. Potentsiometriia [Potentiometry] *uchebno-metodicheskoe posobie*. SPbGTURP. Saint-Petersburg, 2013, 64 p.

9. Rakhshadt A.G. Pruzhinnye stali i splavy [Spring steels and alloys]. 3rd. Moscow: Metallurgiya, 1982, 400 p.

10. Gol'dshtein M.I., Grachev S.V., Veksler Iu.G. Spetsial'nye stali [Special steels]. 2nd. Moscow: MISIS, 1999, 407 p.

11. Spravochnik po elektrokhimicheskim i elektrofizicheskim metodam obrabotki [Handbook on electrochemical and electro-physical processing methods]. G.L. Amitan et al. Ed. V.A. Volosatova. Leningrad: Mashinostroenie: Leningradskoe otdelenie, 1988, 718 p.

12. Popilov D.Ia. Elektrofizicheskaia i elektrokhimicheskaia obrabotka materialov [Electrochemical and electro-physical treatment of materials]: spravochnik. 2nd. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 400 p.

13. Amirkhanova N.A., Saiapova V.V. Osobennosti vysokoskorostnogo anodnogo rastvoreniia nikel'kromovykh splavov [Peculiarities of high-speed anodic dissolution of nickel-chrome alloys]. Ufa: Gilem, 2002, 200 p.

14. Khentse G. Poliarografiia i vol'tamperometriia. Teoreticheskie osnovy i analiticheskaia praktika [Polarography and voltammetry. Theoretical foundations and analytical practice]. A.V. Garmasha i A.I. Kameneva. Moscow: BINOM. Laboratoriia znaniy, 2008, 284 p.

15. Pleshkova E.V., Vinogradova S.S. Vliianie skorosti razvertki pri potentsiodinamicheskoi poliarizatsii na kriterii pittingostoikosti nerzhavieushchikh staley [Effect of Sweep Rate during Potentiodynamic Polarization on Pitting Resistance Criteria for Stainless Steels]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, vol. 20, no. 6, pp. 51–53.

16. Novyi spravochnik khimika i tekhnologa. Protsessy i apparaty khimicheskikh tekhnologii [The new handbook of chemist and technologist. Processes and apparatus of chemical technologies]. Saint-Petersburg: NPO «Professional», 2006, part II, 916 p.

17. Amirkhanova N.A., Galiev V.E., Khamzina A.R. Issledovanie obrabatyvaemosti splava KhN45MVTuBR elektrokhimicheskim metodom [Study of machinability of the KhN45MVTuBR alloy by electrochemical method]. *Sovremennye metody v teoreticheskoi i eksperimental'noi elektrokhimii: materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Ivanovo: IGKhTU, 2010, 74 p.

18. Dmitrievich I.N. Elektrokhimicheskie metody analiza: praktika primeneniia v TsBP [Electrochemical methods of analysis: practice in the pulp and paper industry]. SPbGTURP. Saint-Petersburg, 2012, 95 p.

19. Elektrokhimicheskie metody issledovaniia lo-kal'noi korrozii passiviruiushchikhsia splavov i mnogosloinykh sistem: monografiia [Electrochemical methods for studying local corrosion of passivating alloys and multilayer systems: a monograph]. R.A. Kaidrikov et al. Kazanskii natsional'nyi issledovatel'skii tekhnologicheskii universitet. Izdatel'stvo KNITU, 2013, 141 p.

20. Elektroanaliticheskie metody [Electroanalytical methods]. Ed. F. Shol'tsa. Moscow: Mir, BINOM, 2009, 326 p.

21. Osnovy analiticheskoi khimii: prakticheskoe rukovodstvo [Fundamentals of Analytical Chemistry: A Practical Guide]. Iu.A. Barbalat et al. Ed. Iu.A. Zolotova, T.N. Shekhovtsovoi, K.V. Oskolka. Moscow: Laboratoriia znaniy, 2017, 462 p.

22. Iskhakova I.O., Vinogradova S.S. Modifikatsiia poverkhnostei khromonikelevykh staley v usloviakh impul'snoi gal'vanostatsicheskoi poliarizatsii [Surface modification of chromium-nickel steels under pulsed galvanostatic

polarization]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2012, vol. 15, no. 19, pp. 67–69.

23. Vinogradova S.S., Tazieva R.F. Issledovanie kharakteristik pittingostoikosti khromonikelevykh staley v gal'vanostatsicheskikh usloviakh na osnove modelirovaniia protsessa [Study of pitting resistance characteristics of chromium-nickel steels under galvanostatic conditions based on process modeling]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2015, no. 2–14, pp. 3013–3018.

Поступила: 20.03.2022

Одобрена: 12.05.2022

Принята к публикации: 27.05.2022

Сведения об авторах

Хамзина Альбина Расиховна (Уфа, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Уфимского государственного авиационного технического университета (Россия, 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, e-mail: FATSTM@yandex.ru).

Квятковская Аделя Станиславовна (Уфа, Россия) – кандидат технических наук, доцент, исполняющий обязанности заведующего кафедрой зеленой химии и ресурсосберегающей технологии Уфимского государственного авиационного технического университета (Россия, 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, e-mail: kvyatkovskay@mail.ru).

Сабурова Юлия Борисовна (Уфа, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры зеленой химии и ресурсосберегающей технологии Уфимского государственного авиационного технического университета (Россия, 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, e-mail: kutnyakova@mail.ru).

About the authors

Albina R. Khamzina (Ufa, Russian Federation) – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Mechanical Engineering Department of UGATU (12, K. Marx str., Ufa, 450008, Russian Federation, e-mail: FATSTM@yandex.ru).

Adel S. Kvyatkovskaya (Ufa, Russian Federation) – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Department of Green Chemistry and Resource-Saving Technology, USATU (12, K. Marx str., Ufa, 450008, Russian Federation, e-mail: kvyatkovskay@mail.ru).

Yulia B. Saburova (Ufa, Russian Federation) – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Green Chemistry and Resource-saving Technology, USATU (12, K. Marx str., Ufa, 450008, Russian Federation, e-mail: kutnyakova@mail.ru).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад всех авторов равноценен.