

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Особенности электрохимического полирования быстрорежущей стали Р6М5 / А.С. Квятковская, А.Р. Хамзина, А.Ю. Назаров, К.Н. Рамазанов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение. Материаловедение. – 2024. – Т. 26, № 1. – С. 50–58. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.1.06

Please cite this article in English as (**Perm Polytech Style**):

Kvyatkovskaya A.S., Khamzina A.R., Nazarov A.Yu., Ramazanov K.N. Features of electrochemical polishing of high-speed steel P6M5. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2024, vol. 26, no. 1, pp. 50-58. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.1.06

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 26, № 1, 2024
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2024.1.06

УДК 621.9.047

А.С. Квятковская, А.Р. Хамзина, А.Ю. Назаров, К.Н. Рамазанов

Уфимский университет науки и технологии, Уфа, Российская Федерация

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПОЛИРОВАНИЯ
БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5

Сталь Р6М5 относится к инструментальным сталям и применяется для изготовления режущего инструмента всех видов для обработки при обычной скорости резания деталей из углеродистых и среднелегированных конструкционных сталей с пределами прочности до 90-100 МПа. Трудоемкость финишных операций может превышать 20 % в общей трудоемкости изготовления деталей. Линейка инструментов, изготовленных из быстрорежущей стали Р6М5 охватывает множество форм и размеров, специально разработанных для обработки твердых металлов, которое затрудняет создание универсальных способов финишной обработки. Актуальным является применение электрохимического полирования быстрорежущей стали, которое имеет существенное преимущество перед химическим травлением, применяемым в промышленности в последнее время. Исследован процесс электрохимического полирования инструментальной быстрорежущей стали Р6М5 в электролитах на основе фосфорной кислоты с различными добавками путем снятия потенциодинамических поляризационных кривых на установке Р-45Х. В электролитах на основе фосфорной кислоты с добавлением хромового ангидрида выявлено наличие петли Жаке, присущей электрохимическому полированию. Установлено влияние режимов и составов электролита для электрохимического полирования на качество поверхности. Исследования показали, что в электролитах 60–65 % фосфорной кислоты с добавками серной кислоты, хромового ангидрида и карбамида наблюдаются высокие показатели анодного выхода по току. Однако эффект глянцевого, зеркального блеска достигается в электролитах 88 % фосфорной кислоты с добавкой хромового ангидрида в пределах 7–8 %, в результате чего обеспечивается получение шероховатости поверхности, соответствующей 9–10-му классу чистоты поверхности, наиболее подходящим для применения в области машиностроения.

Ключевые слова: поляризационная кривая, плотность тока, потенциал, растрав, шероховатость поверхности, микроструктура, скорость развертки, электрохимическое полирование, электролит.

A.S. Kvyatkovskaya, A.R. Khamzina, A.Yu. Nazarov, K.N. Ramazanov

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

FEATURES OF ELECTROCHEMICAL POLISHING OF HIGH-SPEED STEEL P6M5

Steel P6M5 refers to tool steels and is used for the manufacture of cutting tools of all types for machining at normal cutting speed of parts made of carbon and medium alloyed structural steels with strength limits up to 90-100 MPa. The labor intensity of finishing operations may exceed 20 % of the total labor intensity of parts manufacturing. The line of tools made of high-speed steel P6M5 covers a variety of shapes and sizes specially designed for hard metal processing, which makes it difficult to create universal methods of finishing. The application of electrochemical polishing of high-speed steel, which has a significant advantage over the chemical etching used in industry recently, is relevant. The process of electrochemical polishing of tool high-speed steel P6M5 in electrolytes based on phosphoric acid with various additives by taking potentiodynamic polarization curves on the R-45X unit has been studied. In electrolytes based on phosphoric acid with addition of chromic anhydride the presence of Jacquet loop inherent to electrochemical polishing was revealed. The influence of modes and compositions of electrolyte for electrochemical polishing on the surface quality has been established. Studies have shown that in electrolytes of 60–65 % phosphoric acid with additions of sulfuric acid, chromic anhydride and urea, high anodic current yields are observed. However, the effect of glossy, mirror-like shine is achieved in electrolytes of 88 % phosphoric acid with the addition of chromic anhydride in the range of 7–8 %, resulting in obtaining surface roughness corresponding to the 9–10 class of surface cleanliness, most suitable for use in the field of mechanical engineering.

Keywords: polarization curve, current density, potential, rastering, surface roughness, microstructure, sweep speed, electrochemical polishing, electrolyte.

Введение

Производительность электрохимического процесса чистовой обработки не зависит от механических свойств материала и конфигурации обрабатываемых деталей. Это является одним из его основных преимуществ по сравнению с известными способами механической обработки [1; 2]. Следует учитывать также, что получаемый в результате электрохимического полирования (ЭХП) своеобразный волнистый микрорельеф поверхности весьма благоприятен для деталей, работающих в условиях трения, механических нагрузок, коррозии. Поэтому целесообразность применения электрохимического полирования для чистовой обработки инструмента основывается на том, что достигаемое при этом сглаживание шероховатостей поверхности и изменение некоторых ее физико-химических свойств благоприятно сказываются на стойкости инструмента при эксплуатации и на качестве его работы [3–6].

Электрохимическое полирование стали, как, впрочем, и химическое, менее трудоемкое, чем механическое полирование. Одновременно этим способом может полироваться большое количество деталей, имеющих самую различную форму и габариты, что невозможно при ручной механической обработке полировальными кругами [7; 8].

Выявлено положительное влияние ЭХП-сверл, изготовленных из инструментальной стали, которое связано с удалением содержащего остаточный аустенит поверхностного слоя металла, отличающийся пониженной твердостью и теплопроводностью. Помимо этого полированная поверхность канавок сверла облегчает отвод стружки, что также способствует повышению его стойкости. Электрохимическим полированием повышают эксплуатационную надежность деталей и их срок службы [9–11].

Избежать неблагоприятного воздействия механической обработки на металл при его формообразовании невозможно, так же как невозможно механически удалить его внешний некондиционный слой. Известные способы травления тоже не могут полностью решить эту задачу. Электрохимическое полирование в этом случае имеет существенное преимущество. В специфических условиях его реализации происходит регламентированное удаление по толщине некондиционного слоя и формирование нового поверхностного слоя свободных от дефектов, вносимых при механической обработке. Такое изменение не проходит бесследно для физико-химических, механических, электрических свойств материалов, которые в большинстве случаев улучшаются. Это говорит о целесообразности расширения использования электрохимического полирования [12–15]. Поэтому актуальным является дальнейшее исследование процесса электрохимического полирования деталей, изготовленных из инструментальных сталей.

На модельной установке изучалось влияние природы и состава электролита, температуры, а также электрического режима на качество полирования поверхности образцов. Исследование проводили в электролитах на основе H_3PO_4 , H_2SO_4 с добавками хромового ангидрида, карбамида и триэтаноламина. Критерием качества служил блеск поверхности после обработки, отсутствие растрыва, оцениваемого с помощью металлографического микроскопа «Метам ЛВ-34», уменьшение шероховатости, измеряемого на профилометре «Абрис-7ПМ», а также анодный выход по току. Потенциодинамические исследования проводились на потенциостате Р-45Х [16; 17].

Экспериментальная часть

Исследование механизма ЭХП может дать, очевидно, новую информацию как о кинетике

растворения металла в исследуемых условиях, так и о влиянии этих условий на его микрогеометрические, физико-химические характеристики. Исследованные материалы станут хорошей основой для разработки путей усовершенствования технологии электрохимического полирования деталей, изготовленных из стали Р6М5.

Для определения наличия петли Жаке, присущей для ЭХП, снимались потенциодинамические поляризационные кривые на неподвижном электроде [18].

На рис. 1 представлены поляризационные кривые стали Р6М5 в фосфорносернокислых электролитах с добавлением CrO_3 и $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$. В результате исследований выявлено, что в электролите 60 % H_3PO_4 + 15 % H_2SO_4 + 6 % CrO_3 значение тока в области транспассивного растворения

заметно выше, чем в присутствии 6 % $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ (карбамида), ток составляет $I = 0,29\text{ А}$ при $\varphi = 3,69\text{ В}$. Выражена петля Жаке, присущая для ЭХП. Площадка предельного тока начинается при потенциале $-0,34\text{ В}$.

В электролите 60 % H_3PO_4 + 15 % H_2SO_4 область активного анодного растворения начинается при потенциале 1,8 В. При сдвиге потенциала в область положительных значения ($\varphi = 3,8\text{ В}$) достигается максимальный анодный ток $I = 0,1\text{ А}$. При этом на поляризационной кривой отсутствует площадка предельного тока, условия пассивирования не наблюдаются.

На рис. 2 представлены поляризационные кривые для стали Р6М5 в электролитах на основе 65%-ной фосфорной кислоты с добавками триэтанолamina и хромового ангидрида.

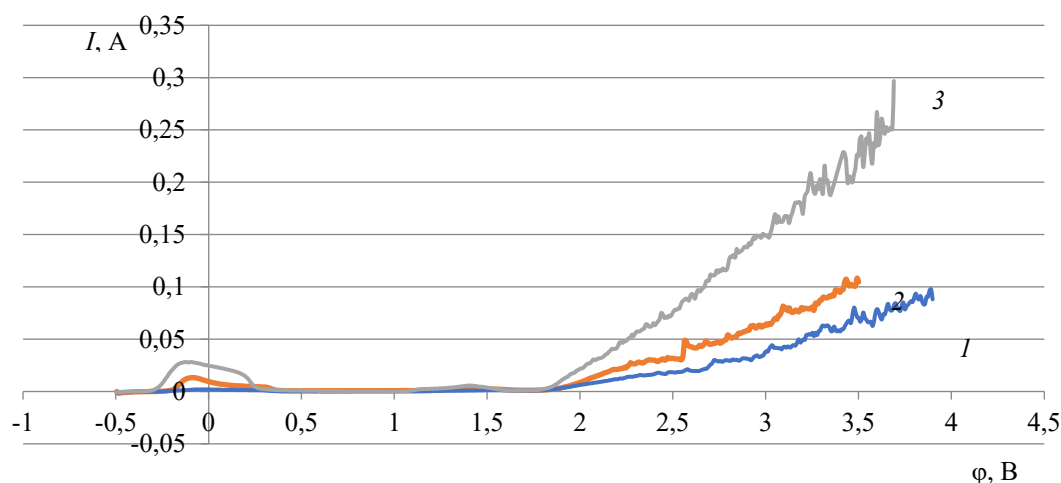


Рис. 1. Потенциодинамические поляризационные кривые стали Р6М5 в электролитах: 1 – 60 % H_3PO_4 + 15 % H_2SO_4 ; 2 – 60 % H_3PO_4 + 15 % H_2SO_4 + 6 % $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$; 3 – 60 % H_3PO_4 + 15 % H_2SO_4 + 6 % CrO_3 (скорость развертки 50 мВ/с)

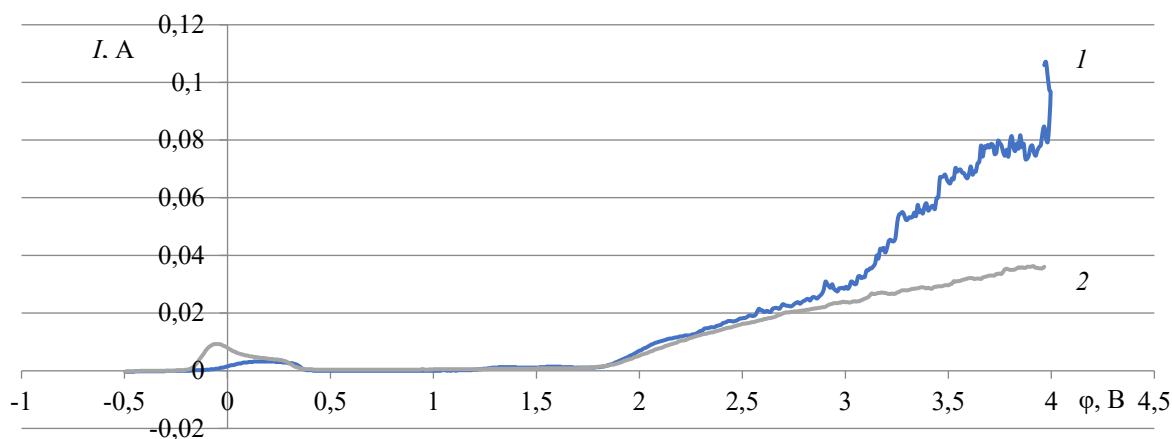


Рис. 2. Потенциодинамические поляризационные кривые стали Р6М5 в электролитах: 1 – 65 % H_3PO_4 + 15 % H_2SO_4 + 6 % CrO_3 ; 2 – 65 % H_3PO_4 + 15 % H_2SO_4 + 10 % CrO_3 + 10 % триэтанолamina (скорость развертки 50 мВ/с)

Как видно из рис. 2, при скорости развертки 50 мВ/с в электролитах при увеличении концентрации фосфорной кислоты до 65 % наблюдается петля Жаке. В электролите 65 % H_3PO_4 + 15 % H_2SO_4 + 6 % CrO_3 максимальный ток наблюдается при потенциале 0,2 В. Далее наблюдается снижение плотности тока до потенциала $\phi = 0,4$ В вследствие насыщения прианодного слоя продуктами анодного растворения. При добавлении в электролит триэтаноламина плотность тока выше, чем в фосфорносернохромовом электролите ($i = 0,11$ А/см² при $\phi = -0,1$ В). Триэтаноламин оказывает активирующее действие, склонен к образованию комплексных соединений с ионами металлов, входящих в состав стали [19–21].

На рис. 3 представлены поляризационные кривые в электролитах на основе 88 % H_3PO_4 . В электролите 88 % H_3PO_4 + 7 % CrO_3 имеет место область активного растворения металла при потенциале -0,1 В, после которой наблюдается протяженная вплоть до потенциала 2 В область пассивации. Наличие данной области позволяет прогнозировать, что данный электролит будет способствовать выравниванию микронеровностей и иметь полирующий эффект. При увеличении концентрации CrO_3 от 8 до 10 % имеет место активное анодное растворение (при потенциале 1,78 В) и повышение скорости растворения металла. Причиной этого является то, что растворение стали начинается при потенциале более положительном, чем потенциал выделения кислорода [22–24].

Интересно выявить влияние добавки карбамида различной концентрации в потенциодинамических условиях на эффект ЭХП (рис. 4).

Как видно из рисунка (рис. 4), в электролитах №1, 2 подъем плотности тока начинается при потенциале $\phi = 1,7$ В для стали Р6М5. При сдвиге потенциала в область положительных значения ($\phi = 3,8 \dots 3,9$ В) достигается максимальный анодный ток $I = 0,04$ А и 0,047 А соответственно. При увеличении концентрации $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ до 10 % наблюдается снижение поляризующего тока до 0,02 А. Таким образом, процесс разложения карбамида проходит интенсивнее при увеличении его концентрации. Накопление продукта разложения аммиака проявляется в увеличении рН раствора, что способствует снижению скорости анодного растворения и ухудшению качества поверхности обработанной стали, так как рН раствора для ЭХП инструментальной стали составляет от 1...7.

Важными факторами, влияющими на внешний вид электрохимически полированной поверхности, являются плотность тока, состав электролита, перемешивание и температура ванны, продолжительность процесса.

Температура электролита очень важный технологический параметр, если она низкая, то увеличивается вязкость прианодного слоя, при этом ухудшается диффузия через прианодный слой. Повышение температуры снижает вязкость прианодного слоя, при слишком большой температуре наблюдается простое травление металла.

Для выявления состава электролита и режима обработки, проводились исследования на установке для ЭХП.

В таблице представлены режимы ЭХП и выход по току, рассчитанный в результате исследований.

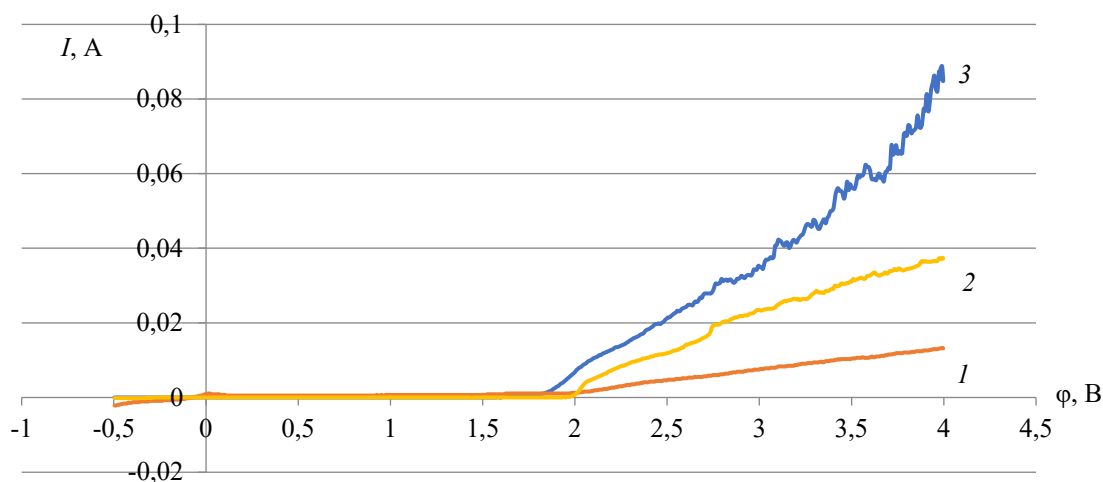


Рис. 3. Потенциодинамические поляризационные кривые стали Р6М5 в электролитах: 1 – 88 % H_3PO_4 + 7 % CrO_3 ; 2 – 88 % H_3PO_4 + 8 % CrO_3 ; 3 – 88 % H_3PO_4 + 10 % CrO_3 (скорость развертки 50 мВ/с)

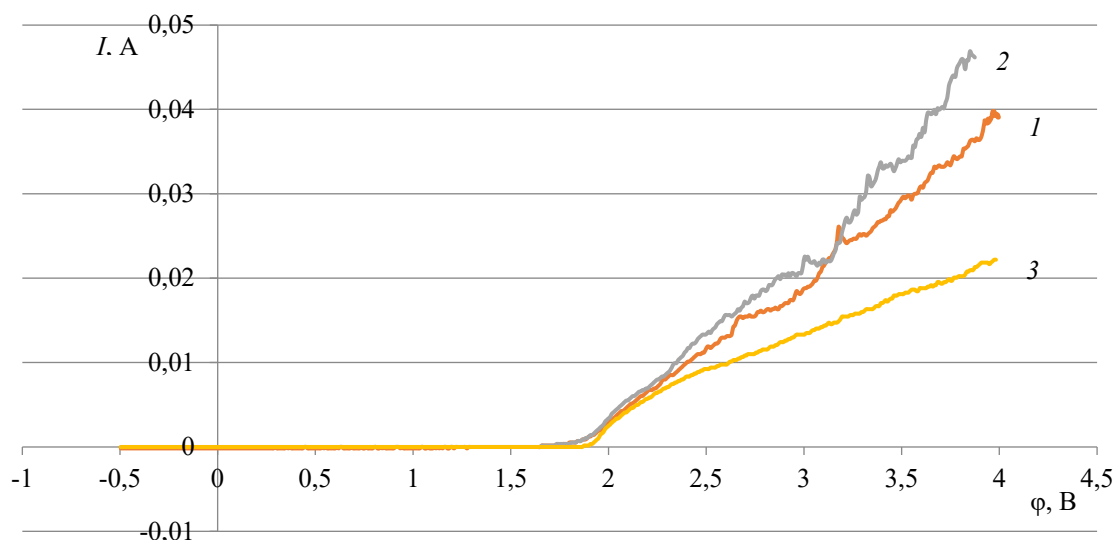


Рис. 4. Потенциодинамические поляризационные кривые стали Р6М5 в электролитах: 1 – 88 % H_3PO_4 + 10 % CrO_3 + 3 % $(NH_2)_2CO$; 2 – 88 % H_3PO_4 + 10 % CrO_3 + 6 % $(NH_2)_2CO$; 3 – 88 % H_3PO_4 + 10 % CrO_3 + 10 % $(NH_2)_2CO$ (скорость развертки 50 мВ/с)

Режимы ЭХП стали Р6М5

№ режима ЭХП	Электролиты	Плотность тока i , А/см ²	Время обработки t , мин	Температура электролита, °С	η , выход по току
1	60 % H_3PO_4 + 15 % H_2SO_4	1...1,2	5	40	0,90
2	60 % H_3PO_4 + 15 % H_2SO_4 + 6 % CrO_3	1,1...1,45	5	50	0,97
3	60 % H_3PO_4 + 15 % H_2SO_4 + 6 % $(NH_2)_2CO$ (карбамид)	2...3	5	60	0,98
4	65 % H_3PO_4 + 15 % H_2SO_4 + 6 % CrO_3	1...1,4	5	50	0,72
5	65 % H_3PO_4 + 15 % H_2SO_4 + 10 % CrO_3 + 10 % триэтанолamina	0,9...1,2	4	45	0,65
6	88 % H_3PO_4 + 7 % CrO_3	2...2,5	4	64	0,58
7	88 % H_3PO_4 + 8 % CrO_3	1,5...2,2	4	60	0,63
8	88 % H_3PO_4 + 10 % CrO_3	1...1,4	5	40	0,54
9	88 % H_3PO_4 + 10 % CrO_3 + 3 % $(NH_2)_2CO$	1...1,4	5	40	0,30
10	88 % H_3PO_4 + 10 % CrO_3 + 6 % $(NH_2)_2CO$	1,6	5	40	0,39
11	88 % H_3PO_4 + 10 % CrO_3 + 10 % $(NH_2)_2CO$	2...3	5	50	0,40

Значения выхода по току при использовании электролита на основе 60 % H_3PO_4 + 15 % H_2SO_4 с добавками карбамида и хромового ангидрида имеют высокие показатели ($\eta = 0,90...0,98$), что подтверждают потенциодинамические кривые, где наблюдается самый высокий ток в данных растворах по сравнению с остальными. При этом имеет место увеличение анодного выхода по току с ростом температуры электролита. В электролитах на основе 65 % H_3PO_4 с добавкой триэтанолamina значение выхода по току уменьшается в 1,5 раза.

Использование электролитов на основе 88 % H_3PO_4 с добавлением хромового ангидрида приводит к уменьшению выхода по току ввиду интенсивного образования пассивирующего слоя на поверхности стали. Введение добавок карбамида от 3 до 10 % приводит к уменьшению значений выхода по

току в 1,6 раза, так как происходит увеличение pH раствора, условия для обработки стали ухудшаются. Выявлено, что с ростом температуры электролита от 40 до 50 °С происходит незначительный рост анодного выхода по току от 0,30 до 0,40.

Повышение температуры до 64 °С способствует значительному улучшению внешнего вида образцов из стали Р6М5. Процесс растворения оксидов металлов, входящих в состав стали, облегчается при увеличении температуры раствора. Частичное растворение оксидного слоя способствует повышению выхода по току реакции анодного растворения металла [25].

С помощью металлографического микроскопа «Метам ЛВ-34» проводили оценку состояния поверхности образцов. На рис. 5 представлена микроструктура поверхности стали в электролитах на основе 60 % H_3PO_4 .

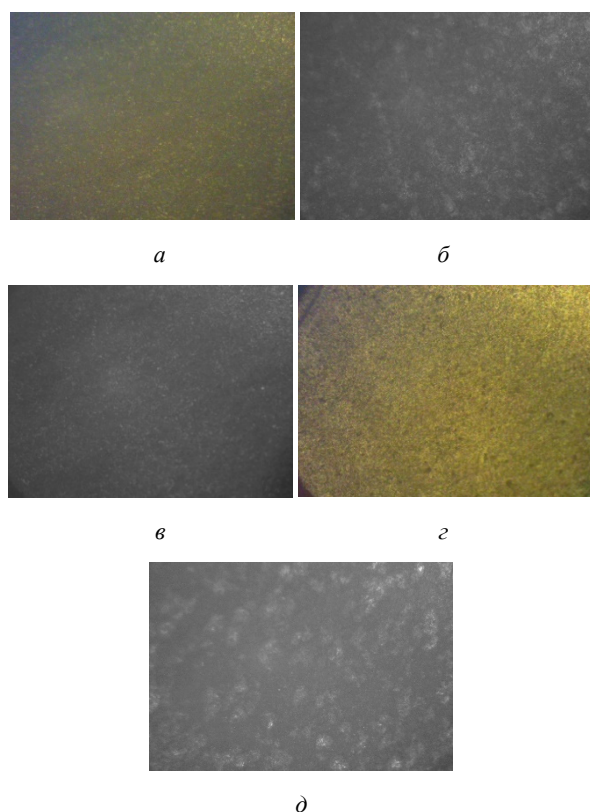


Рис. 5. Микроструктуры поверхности стали Р6М5 после ЭХП (x100): а – в электролите 60 % H_3PO_4 + 15 % H_2SO_4 (режим №1); б – 60 % H_3PO_4 + 15 % H_2SO_4 + 6 % CrO_3 (режим №2); в – 60 % H_3PO_4 + 15 % H_2SO_4 + 6 % $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ (режим №3); з – 65 % H_3PO_4 + 15 % H_2SO_4 + 6 % CrO_3 (режим №4); д – 65 % H_3PO_4 + 15 % H_2SO_4 + 10 % CrO_3 + 10 % триэтанолamina (режим №5)

Как видно из рис. 5, при использовании режимов №1 и 4, качество поверхности является наилучшим, растратов на поверхности не обнаружено. Установлено, что поверхность покрыта черным оксидным слоем в результате ЭХП в электролите 60 % H_3PO_4 + 15 % H_2SO_4 + 6 % $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ (см. рис. 5, в), при этом эффекта полирования нет. Выявлено влияние добавки триэтанолamina в электролите 65 % H_3PO_4 + 15 % H_2SO_4 + 10 % CrO_3 (см. рис. 5, д). Поверхность однородная, с выраженным рисунком, возникающим в результате неравномерного растворения отдельных компонентов стали Р6М5.

Рассмотрим микроструктуру поверхности стали после ЭХП в электролитах на основе 88 % H_3PO_4 (рис. 6).

Из рис. 6 (а–е) установлено, что ЭХП при использовании режимов № 6–8 добавкой хромового ангидрида способствует выравниванию микрогеометрии поверхности. Выявлено наличие зеркального блеска при обработке в растворах 88 % H_3PO_4 + 7–8 % CrO_3 (режим № 6, 7). Шероховатость поверхности исследуемых образцов составила $R_a = 0,1 \dots 0,2$ мкм, что соответствует 9–10-му классу

чистоты поверхности. При введении в электролит добавок карбамида имеет место травление поверхности в виде точек и отдельно встречающихся крагеров (см. рис. 6, з–е).

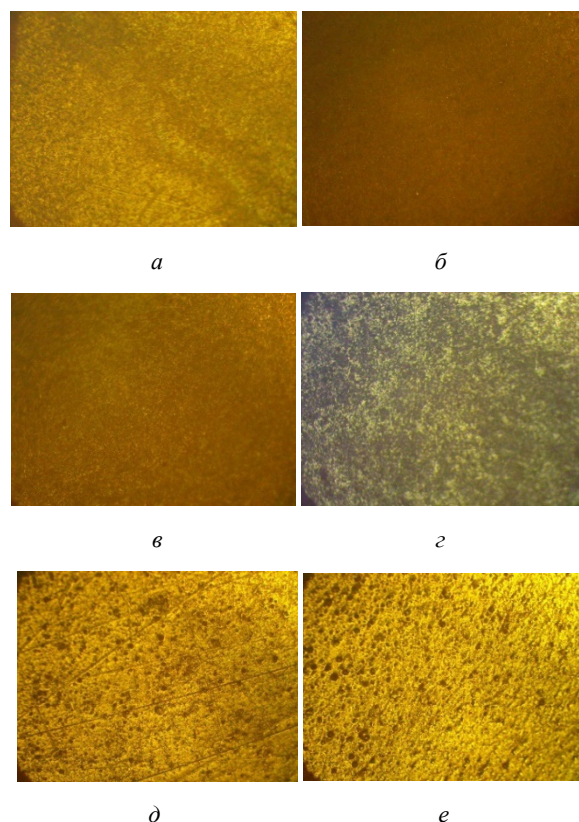


Рис. 6. Микроструктуры поверхности стали Р6М5 после ЭХП (x100): а – в электролите 88 % H_3PO_4 + 7 % CrO_3 (режим №6); б – 88 % H_3PO_4 + 8 % CrO_3 (режим №7); в – 88 % H_3PO_4 + 10 % CrO_3 (режим №8); з – 88 % H_3PO_4 + 10 % CrO_3 + 3 % $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ (режим №9); д – 88 % H_3PO_4 + 10 % CrO_3 + 6 % $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ (режим №10); е – 88 % H_3PO_4 + 10 % CrO_3 + 10 % $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ (режим №11)

Результаты приведенных исследований свидетельствуют, что в потенциодинамических условиях выявлена петля Жаке в электролитах на основе фосфорной кислоты с добавкой хромового ангидрида. В электролите 88 % H_3PO_4 + 7 % CrO_3 установлена протяженная площадка предельного тока, которая прогнозирует полирующий эффект в данном электролите (интервал потенциала составляет от $-0,1$ В до 2В). Полученные исследования на установке для ЭХП констатируют, что для ЭХП стали Р6М5 оптимальными являются электролиты 88 % H_3PO_4 + 7 % CrO_3 ($i = 2\text{--}2,5$ А/см², $t = 4$ мин, $T = 60\text{--}64$ °С) и 88 % H_3PO_4 + 8 % CrO_3 ($i = 1,5\text{--}2,2$ А/см², $t = 4$ мин, $T = 60\text{--}64$ °С), т.е. данные электролиты являются универсальным для инструментальной стали Р6М5, так как имеет место наличие зеркального блеска и отсутствия растрата на обрабатываемой поверхности.

Библиографический список

1. Гриликес, С.Я. Электрохимическое и химическое полирование: Теория и практика. Влияние на свойство металлов / С.Я. Гриликес. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1987. – 232 с.
2. Попилов, Д.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: справочник – 2-е изд., перераб. и доп. / Д.Я. Попилов. – М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.
3. Носенко, В.А. Физико-химические методы обработки материалов: учеб. пособие / В.А. Носенко, М.В. Даниленко. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 196 с.
4. Электроимпульсное полирование. Электроимпульсное полирование на основе железа, хрома и никеля / Ю.В. Синькевич [и др.]. – Минск: БНТУ, 2014. – 325 с.
5. Никифоров, В.И. Электрохимические и электрофизические технологии в машиностроении: учеб. пособие / В.И. Никифоров; М-во образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2013. – 302 с.
6. Волков, А.И. Справочник по электрохимии / А.И. Волков, А.А. Черник. – Минск: Книжный дом: ЛитераГранд, 2017. – 127 с.
7. Дамаскин, Б.Б. Электрохимия / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий, Г.А. Цирлина. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Химия, КолосС, 2006. – 672 с.
8. Лобода, А.А. Электрохимическая доводка аэродинамических профилей лопаточных колес / А.А. Лобода, С.А. Мозгов, Б.П. Саушкин // Известия МГТУ «МАМИ». – 2013. – Т. 2, № 2(16). – С. 251–257.
9. Фролов, К.В. Энциклопедия / К.В. Фролов. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 2-3. – 780 с.
10. 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.
11. Куликов, И.С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И.С. Куликов, С.В. Ващенко, А.Я. Каменев. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 232 с.
12. Федорова, Е.А. Анодная обработка поверхности хромистых сталей и титановых сплавов перед напылением нитрида титана / Е.А. Федорова // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2001. – Т. 9, № 1. – С. 41–46.
13. Амирханова, Н.А. Повышение стойкости газовой коррозии при электрохимическом полировании сплавов ХН45МВТЮБР и ХН50ВМТЮБ / Н.А. Амирханова, В.Э. Галлиев, А.Р. Хамзина // Металлообработка. – 2008. – № 1 (43). – С. 17–21.
14. Шибаев, Б.А. Влияние условий обработки на показатели процесса электрохимического полирования легированных сталей / Б.А. Шибаев, В.С. Белова, А.В. Балмасов // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – Иваново, 2018. – Т. 61 (4-5). – С. 64–70.
15. Амирханова, Н.А. Повышение коррозионной стойкости сплава ЭП 648 к высокотемпературной газовой коррозии / Н.А. Амирханова, А.Р. Хамзина // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника – Пермь, 2014. – № 36. – С. 38–48.
16. Хенце, Г. Полярграфия и вольтамперометрия. Теоретические основы и аналитическая практика /

- Г. Хенце; пер. с нем. А.В. Гармаша и А.И. Каменева. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 284 с.
17. Комиссаренков, А.А. Потенциометрия: учебно-методическое пособие / А.А. Комиссаренков, Г.Ф. Пругло, В.А. Фёдоров // СПбГТУРП. – СПб., 2013. – 64 с.
 18. Амирханова, Н.А. Электрохимическое полирование жаропрочных никель-хромовых сплавов ХН45МВТЮБР и ХН50ВМТЮБ / Н.А. Амирханова, А.Р. Хамзина // Металлообработка. – 2006. – № 5-6 (35-36). – С. 29–33.
 19. Кац, Н.Г. Анализ поляризационных кривых стальных и магниевых сплавов / Н.Г. Кац // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2016. – № 2(50). – С. 193–196.
 20. Шибаев, Б.А. Электрохимическое полирование конструкционных легированных сталей / Б.А. Шибаев, А.В. Балмасов // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2019. – Т. 27, № 2. – С. 23–30.
 21. Плешкова, Е.В. Влияние скорости развертки при потенциодинамической поляризации на критерии питтингостойкости нержавеющей сталей / Е.В. Плешкова, С.С. Виноградова // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20, № 6. – С. 51–53.
 22. Виноградова, С.С. Исследование характеристик питтингостойкости хромоникелевых сталей в гальваностатических условиях на основе моделирования процесса / С.С. Виноградова, Р.Ф. Тазиева // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2-14. – С. 3013–3018.
 23. Кац, Н.Г. Поляризационные характеристики металлических материалов / Н.Г. Кац, С.В. Васильев // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2016. – № 1(49). – С. 138–142.
 24. Применение импульсных режимов при электрохимическом полировании коррозионноустойчивых сталей / Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королев, В. С. Нисс [и др.] // Наука и техника. – 2019. – Т. 18, № 3. – С. 200–208.
 25. Ставышенко А. С. Основные показатели качества поверхности деталей из нержавеющей сталей после полирования электрохимическим способом / А.С. Ставышенко // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2009. – № 1(55). – С. 51–56.

References

1. Grilikhes, S.Ia. Elektrokhimicheskoe i khimicheskoe polirovanie: Teoriia i praktika. Vliianie na svoistvo metallov [Electrochemical and chemical polishing: Theory and practice. Influence on the property of metals]. Ed. S.Ia. Grilikhes. 2nd. Leningrad: Mashinostroenie, 1987, 232 p.
2. Popilov D.Ia. Elektrofizicheskaia i elektro-khimicheskaiia obrabotka materialov: spravochnik [Electrophysical and electrochemical processing of materials: handbook]. 2nd. Ed. D.Ia. Popilov. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 400 p.
3. Nosenko V.A., Danilenko M.V. Fiziko-khimicheskie metody obrabotki materialov: uchebnoe posobie [Physicochemical methods of materials processing: textbook]. Staryi Oskol: TNT, 2012, 196 p.
4. Sin'kevich Iu.V. et al. Elektroimpul'snoe polirovanie. Elektroimpul'snoe polirovanie na osnove zheleza,

khroma i nikelia [Electroimpulse polishing. Electropulse polishing on iron, chromium and nickel basis]. Ed. Iu.V. Sin'kevich. Minsk: BNTU, 2014, 325 p.

5. Nikiforov V.I. Elektrokhimicheskie i elek-trofizicheskie tekhnologii v mashinostroenii: uchebnoe posobie [Electrochemical and electrophysical technologies in mechanical engineering: textbook]. Ed. V.I. Nikiforov. Saint Petersburg: Izdatelstvo Politekhnicheskogo universiteta, 2013, 302 p.

6. Volkov A.I. Spravochnik po elektrokhimii [Handbook of Electrochemistry]. A.I. Volkov, A.A. Chernik. Minsk: Knizhnyi dom: LiteraGrand, 2017, 127 p.

7. Damaskin B.B., Petrii O.A., Tsirlina G.A. Elektrokhimia [Electrochemistry]. 2nd. Moscow: Khimiia, Koles, 2006, 672 p.

8. Loboda A.A., Mozgov S.A., Saushkin B.P. Elektrokhimicheskaia dovodka aerodinamicheskikh profilei lopatochnykh koles [Electrochemical finishing of aerodynamic profiles of impeller blades]. *Izvestiia MGTU «MAMI»*, 2013, vol. 2, no. 2(16), pp. 251–257.

9. Frolov K.V. Entsiklopediia [Encyclopedia]. K.V. Frolov. Moscow: Mashinostroenie, 2001, vol. 2-3, 780 p.

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

11. Kulikov I.S., Vashchenko S.V., Kamenev A.Ia. Elektrolitno-plazmennaiia obrabotka materialov [Electrolyte and plasma treatment of materials]. Minsk: Belaruskaii navuka, 2010, 232 p.

12. Fedorova E.A. Anodnaia obrabotka poverkhnosti khromistykh stali i titanovykh splavov pered napyleniem nitrída titana [Anodic surface treatment of chromium steels and titanium alloys before titanium nitride spraying]. Ed. E.A. Fedorova. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*, 2001, vol. 9, no. 1, pp. 41–46.

13. Amirkhanova N.A., Galliev V.E., Khamzina A.R. Povyshenie stoikosti gazovoi korrozii pri elektrokhimicheskom polirovanii splavov KhN45MVTiUBR i KhN50VMTiUB [Increase of gas corrosion resistance at electro-chemical polishing of CrNi45MoVTiUBR and CrNi50VMoTiUB alloys]. *Metalloobrabotka*, 2008, no. 1 (43), pp. 17–21.

14. Shibaev B.A., Belova V.S., Balmasov A.V. Vliianie uslovii obrabotki na pokazateli protsessá elektrokhimicheskogo polirovaniia legirovannykh stali [Influence of processing conditions on the process parameters of electrochemical polishing of alloy steels]. *Izvestiia vuzov. Khimiia i khimicheskaiia tekhnologiia*. Ivanovo, 2018, vol. 61 (4-5), pp. 64–70.

15. Amirkhanova N.A., Khamzina A.R. Povyshenie korrozionnoi stoikosti splava EP 648 k vysokotemperaturnoi gazo-voi korrozii [Improvement of corrosion resistance of EP 648 alloy to high-temperature gas corrosion]. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaiia tekhnika*. Perm', 2014, no. 36, pp. 38–48.

16. Khentse G. Poliarografiia i vol'tamperometriia. Teoreticheskie osnovy i analiticheskaia praktika [Polarography and voltammetry. Theoretical foundations and analytical practice]. Moscow: BINOM. Laboratoriia znanií, 2008, 284 p.

17. Komissarenkov A.A., Pruglo G.F., Fedorov V.A. Potentsiometriia: uchebno-metodicheskoe posobie [Potentiometry: training manual]. Saint-Petersburg, 2013, 64 p.

18. Amirkhanova N.A., Khamzina A.R. Elektrokhimicheskoe poli-rovanie zharoprochnykh nikel'khromovykh splavov KhN45MVTiUBR i KhN50VMTiUB [Electrochemical polishing of heat-resistant nickel-chromium alloys CrNi45MoVTiUBR and CrNi50VMoTiUBR]. *Metalloobrabotka*, 2006, no. 5-6 (35-36), pp. 29–33.

19. Kats N.G. Analiz poliarizatsionnykh krivyykh stal'nykh i magnievykh splavov [Analysis of polarization curves of steel and magnesium alloys]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriia: Tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 2(50), pp. 193–196.

20. Shibaev B.A., Balmasov A.V. Elektrokhimicheskoe polirovanie konstruktsionnykh legirovannykh stali [Electrochemical polishing of structural alloy steels]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*, 2019, vol. 27, no. 2, pp. 23–30.

21. Pleshkova E.V. Vliianie skorosti razvertki pri potentsiodinamicheskoi poliarizatsii na kriterii pittingostoikosti nerzhaveiushchikh stali [Influence of sweep speed at potentiodynamic polarization on criteria of pitting resistance of non-rusting steels]. E.V. Pleshkova, S.S. Vinogradova. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, vol. 20, no. 6, pp. 51–53.

22. Vinogradova S.S., Tazieva R.F. Issledovanie kharakteristik pittingostoikosti khromonikelevykh stali v gal'vanostaticheskikh usloviiax na osnove modelirovaniia protsessá [Study of pitting resistance characteristics of chromium-nickel steels under galvanostatic conditions on the basis of process modeling]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2015, vol. 2-14, pp. 3013–3018.

23. Kats N.G., Vasil'ev S.V. Poliarizatsionnye kharakteristiki metallicheskih materialov [Polarization characteristics of metallic materials]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriia: Tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 1(49), pp. 138–142.

24. Alekseev Iu.G., Korolev A.Iu., Niss V.S. et al. Primenenie impul'snykh rezhimov pri elektrokhimicheskom polirovanii korrozionnostoikikh stali [Application of pulse modes at electrochemical polishing of corrosion-resistant steels]. *Nauka i tekhnika*, 2019, vol. 18, no. 3, pp. 200–208.

25. Stavysheiko A.S. Osnovnye pokazateli kachestva poverkhnosti detalei iz nerzhaveiushchikh stali posle polirovaniia elektrokhimicheskim sposobom [Main indicators of surface quality of stainless steel parts after polishing by electro-chemical method]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, no. 1(55), pp. 51–56.

Поступила: 13.12.2023

Одобрена: 27.12.2023

Принята к публикации: 15.02.2024

Об авторах

Квятковская Адель Станиславовна (Уфа, Российская Федерация) – кандидат технических наук, заведующая кафедрой “Зеленой химии и ресурсосберегающей технологии” (Российская Федерация, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32, e-mail: kvyatkovskay@mail.ru).

Хамзина Альбина Расиховна (Уфа, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент кафедры

“Технология машиностроения” (Российская Федерация, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32, e-mail: e-mail: FATSTM@yandex.ru).

Назаров Алмаз Юнирович (Уфа, Российская Федерация) – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры “Технология машиностроения” (Российская Федерация, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32, e-mail: e-mail: nazarov_almaz15@mail.ru).

Рамазанов Камилъ Нуруллаевич (Уфа, Российская Федерация) – доктор технических наук, заведующий кафедрой “Технология машиностроения” (Российская Федерация, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32, e-mail: e-mail: ramazanovkn@gmail.com).

About the authors

Adele S. Kvyatkovskaya (Ufa, Russian Federation) – Cand. Sci. (Eng.), Head of Green Chemistry and Resource-Saving Technology (32, St. Zaki Validi, Ufa, 450076, Russian Federation, e-mail: kvyatkovskay@mail.ru).

Khamzina Albina R. (Ufa, Russian Federation) – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of

Technology of Mechanical Engineering (32, St. Zaki Validi, Ufa, 450076, Russian Federation, e-mail: FATSTM@yandex.ru).

Nazarov Almaz Yu. (Ufa, Russian Federation) – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Technology of Mechanical Engineering (32, St. Zaki Validi, Ufa, 450076, Russian Federation, e-mail: nazarov_almaz15@mail.ru).

Ramazanov Kamil N. (Ufa, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology (32, St. Zaki Validi, Ufa, 450076, Russian Federation, e-mail: ramazanovkn@gmail.com).

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания «Исследование физико-химических и механических процессов при формообразовании и упрочнении деталей для авиакосмической и транспортной техники» № FEUE-2023-0006.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад всех авторов равноценен.