

МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МЕТАЛООБРОБКА

УДК 544.653.22

doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160262

© Осипенко В.І.¹, Плахотний О.П.², Тімченко О.В.³

ПОЛЯРИЗАЦІЯ ІМПУЛЬСНИМ СТРУМОМ АНОДА З ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЛАТУННОГО КАТОДА В ВОДНОМУ РОЗЧИНІ NaCl

Стаття присвячена проблемі створення окремих елементів наукових засад розвитку технології електрохімічної обробки сталей латунними дротяними електродами. Запропонована авторами схема експериментальної установки на основі імпульсно-гальваностатичного методу отримання поляризаційних характеристик дозволяє фізично моделювати окремі важливі сторони процесу електрохімічної обробки сталей латунними дротяними електродами. На основі комплексу експериментальних досліджень динаміки поляризації анода з вуглецевої сталі при використанні латунних електродів в водному розчині нейтральної солі NaCl виявлені закономірності та встановлено рівні вагомості впливу величини міжелектродного проміжку, амплітудного значення та густини поляризуючого імпульсного струму, часових параметрів джерела живлення на динаміку поляризації анода. Доведено, що за технологічних умов, близьких до електрохімічної розмірної обробки дротяним електродом, при суттєвій вагомості густини струму вона є не єдиним фактором, що визначає характер поляризації анода і, відповідно, швидкість і умови протікання електрохімічних процесів. Вагомими факторами є також амплітудне значення струму поляризації та геометрична величина міжелектродного проміжку. В рамках проведених експериментів не виявлено значимого впливу на амплітуду потенціалу поляризації часових параметрів джерела живлення. Отримані результати будуть корисними при дослідженні процесу та проектуванні реально діючих технологій електрохімічної розмірної обробки дротяними латунними електродами. Розроблена і опробувана методика може бути поширена на дослідження інших пар електродів та технологічних режимів анодного розчинення струмопровідних матеріалів.

Ключові слова: електрохімічна розмірна обробка, міжелектродний проміжок, дротяний електрод, поляризація електродів, струм поляризації, амплітудно-часові параметри джерела живлення, імпульсно-гальваностатичний метод.

Осипенко В.И., Плахотный А.П., Тимченко А.В. Поляризация импульсным током анода из углеродистой стали при использовании латунного катода в водном растворе NaCl. Статья посвящена проблеме создания отдельных элементов научных основ развития технологии электрохимической обработки сталей латунными проволочными электродами. Предложенная авторами схема экспериментальной установки на основе импульсно-гальваностатического метода получения поляризационных характеристик позволяет физически моделировать отдельные важные стороны процесса электрохимической обработки сталей латунными проволочными электродами. На основе комплекса экспериментальных исследований динамики поляризации анода из углеродистой стали при использовании латунных

¹ д-р техн. наук, проф., Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, osip5906@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, pldecor@ukr.net

³ асистент, Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, alec.timchenko@gmail.com

электродов в водном растворе нейтральной соли NaCl выявлены закономерности и установлены уровни значимости влияния величины межэлектродного промежутка, амплитудного значения и плотности поляризующего импульсного тока, временных параметров источника питания на динамику поляризации анода. Доказано, что по технологическим условиям, близким к размерной электрохимической размерной обработке проволочным электродом, при существенной значимости плотности тока она является не единственным фактором, определяющим характер поляризации анода и, соответственно, скорость и условия протекания электрохимических процессов. Весомыми факторами являются также амплитудное значение тока поляризации и геометрическая величина межэлектродного промежутка. В рамках проведенных экспериментов не обнаружено значимого влияния на амплитуду потенциала поляризации временных параметров источника питания. Полученные результаты могут быть полезными при исследованиях процесса и проектировании реально действующих технологий электрохимической размерной обработки проволочными латунными электродами. Разработанная и апробированная методика может быть распространена на исследования других пар электродов и технологических режимов анодного растворения токопроводящих материалов.

Ключевые слова: электрохимическая размерная обработка, межэлектродный промежуток, проволочный электрод, поляризация электродов, ток поляризации, амплитудно-временные параметры источника питания, импульсно-гальваностатический метод.

V.I. Osypenko, O.P. Plakhotnyi, O.V. Timchenko. Analytical research of the reduction processes in blast furnace at powder coal injection. The objective of the article is to investigate analytically the alternations in reduction processes indices in a blast furnace at partial replacement of coke with powder coal. To compensate the reduced gas permeability of the charge materials column at powder coal injection the share of direct mixed supplies in charging cycles was decreased. The performed comparison revealed that the indices of reduction processes in the investigated periods turned out to be close enough. It was found out that in the period before repairs the thermal losses of the furnace were actually 2 % higher before PC injection process implementation. The overall coefficient of coke replacement with coal powder did not reach the value of 1 kg/PC kg. The furnace operation indices before and after powder coal injection into the furnace hearth with equal thermal losses have been determined. The comparison revealed the worsening of reduction processes indices at powder coal injection into the furnace hearth as well as the possibility to reduce the specific coke consumption due to improvement in gas flow reducing operation. By means of graphical and analytical diagram of the blast furnace process all the alternations of melting indices have been analyzed with regard to the gas composition approximation within the area of decelerated thermal exchange to equilibrium condition, judging by reaction of iron monoxide reduction by gases before and after powder coal injection into the furnace hearth. The minimal theoretically possible degrees of direct reduction, according to M.A. Pavlov as well as the consumption of coke, solid fuel and the reducing gas have been determined. The analyzed operation modes have been comparatively studied, as well as the degrees of gas utilization, the complex index of reduction processes, the criterion of completeness of indirect reduction reactions and indices of the melting ideality. The usefulness of determination of the degree of melting ideality according to the overall consumption of solid fuel has been shown.

Key words: blast furnace, degrees of gas utilization, criterion of completeness of indirect reduction reactions.

Постановка проблеми. Реалізація ефективного технологічного процесу електрохімічної розмірної обробки (ЕХРО) рухомим дротяним електродом-інструментом (ДЕІ) за технологічної схеми електроерозійного дротяного вирізання (ЕЕДВ) на сьогодні є піонерською та достатньо складною в науково-технічному плані задачею, вирішення якої вимагає комплексу експериментальних та теоретичних досліджень, математичного і фізичного моделювання основних проце-

сів, що визначають характер електрохімічного розчинення отриманої електроерозійним методом поверхні деталі-анода за використання в якості катода ДЕІ.

Основною проблемою сучасного рівня розвитку ЕХРО є забезпечення високої точності відтворення профілю деталей складної форми зі збереженням високої швидкості обробки та необхідної якості отриманих поверхонь. Вагомим фактором даної проблеми є амплітудно-часові параметри джерела технологічного струму (АЧПДТС) та закономірності їх впливу на процес електрохімічного розчинення в конкретних технологічних умовах. При ЕХРО рухомих дротяним електродом міжелектродний проміжок (МЕП) нерівномірний в різних точках зони обробки через циліндричну форму електроду. Таким чином, для дротяного електроду характерна суттєва нерівномірність густини струму на поверхні анода. Це призводить до нерівномірної локальної поляризації і, відповідно, швидкості анодного розчинення. При використанні імпульсів струму співрозмірних по тривалості з наростанням поляризації змінюється характер анодного розчинення за рахунок того, що ділянки зі збільшеним міжелектродним проміжком не встигають поляризуватися до рівня потенціалу розчинення матеріалу анода. Даний факт дозволяє суттєво посилити локалізацію процесу розчинення і, отже, забезпечити відносно невелику зону розтікання технологічного струму. Дослідження особливостей динаміки анодної поляризації на плоских електродах дозволяє в «чистому» вигляді фізично моделювати і, відповідно, отримувати дані про окремі важливі сторони процесу електрохімічної обробки за технологічних умов ЕХРО. Такий підхід дає можливість більш точно визначати співвідношення швидкостей розчинення та розміри зони розтікання технологічного струму і, таким чином, цілеспрямовано варіювати АЧПДТС, суттєво покращуючи керованість процесу і кінцеві результати ЕХРО ДЕІ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Поляризація – це потенціал, який визначається відносно обраного електроду порівняння і є рушійним джерелом процесів розчинення металу. В МЕП протікають фізичні і хімічні процеси, на які витрачається енергія струму поляризації. Більшість цих процесів є негативними по відношенню до швидкості електрохімічного розчинення металу, тому при розмірній обробці для початку процесу розчинення деталі необхідно, щоб в МЕП було досягнуто величини поляризації до рівня потенціалу розчинення матеріалу анода.

Прогнозування електрохімічної оброблюваності металів і сплавів базується на методах зняття і аналізу поляризаційних характеристик. Поляризаційними характеристиками або поляризаційними кривими називають графіки, які відображають функціональну залежність між потенціалом вибраного робочого електроду і амплітудою або густиною анодного (або катодного) струму.

Експерименти, представлені в роботах [1-5], показали домінуючу залежність динаміки анодної поляризації від густини струму в імпульсі. Чим більша густина струму в імпульсі, тим до більшої величини і за менший час поляризується анод. Якщо тривалість імпульсу коротша за перехідний процес наростання поляризації, то кожному моменту часу імпульсу відповідає своя величина поляризації і, відповідно, швидкість і умови протікання електрохімічних процесів. При перевищенні певної кількості електрики в імпульсі (зі збільшенням амплітуди або тривалості) поляризація досягає максимального значення, яке відповідає даній густині струму.

Керованість процесу ЕХРО дротяним електродом-інструментом вимагає точного кількісного визначення вагомості впливу базових факторів на продуктивність і локалізацію розчинення металу. Дослідження, проведені в Черкаському державному технологічному університеті і в інших роботах [6-10], показали, що основними факторами, які впливають на процеси електрохімічного розчинення, є склад електроліту, густина струму, величина МЕП, гідродинаміка потоку електроліту, АЧПДТС. На відміну від експериментів з дисковим електродом [4], де при різних швидкостях обертання величина поляризації анода є в основному функцією густини струму і практично не залежить від величини МЕП, за умов ЕХРО дротяним електродом [6, 7] величина МЕП має значний вплив на процеси електрохімічного розчинення, особливо при розмірах менше 1 мм.

Такі результати вимагають додаткових досліджень закономірностей та вагомості впливу геометричної величини МЕП, площі взаємодіючих поверхонь електродів, амплітудного значення та густини поляризуючого імпульсного струму, часових параметрів джерела живлення на величину поляризації анода. Аналіз поляризаційних кривих може дати важливу інформацію про стан МЕП, наявність шкідливих побічних реакцій, характер впливу АЧПДТС та інших

чинників на ефективність вибраних режимів обробки, продуктивність, локалізацію анодного розчинення і характеристики фінішної поверхні. Це особливо є важливим для розвитку технології електрохімічної обробки дротяним електродом.

Мета статті – створити окремі елементи наукових засад розвитку технології електрохімічної обробки дротяним електродом шляхом визначення закономірностей та вагомості впливу геометричної величини МЕР, площі взаємодіючих поверхонь електродів, амплітудного значення та густини поляризуючого імпульсного струму, часових параметрів джерела живлення на динаміку поляризації анода з вуглецевої сталі при використанні латунних електродів в водному розчині NaCl.

Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення таких задач: 1) визначити базові параметри ЕХРО дротяним електродом, які впливають на швидкість та локалізацію електрохімічного розчинення; 2) обґрунтувати методику та провести комплекс експериментальних досліджень динаміки поляризації анода з вуглецевої сталі при використанні латунних електродів в водному розчині нейтральної солі NaCl; 3) спираючись на отримані результати, визначити вагомість впливу густини поляризуючого імпульсу струму, величини МЕР, амплітудного значення та часових параметрів джерела живлення на динаміку анодної поляризації.

Виклад основного матеріалу. Технологічна схема та методи дослідження. Враховуючи технологічні особливості та сучасний рівень розвитку ЕХРО дротяним латунним електродом, дослідження виконувалися з використанням водних розчинів нейтральної солі NaCl, плоских анодів з вуглецевої інструментальної сталі У8 та плоских катодів з латуні Л63.

Був обраний імпульсно-гальваностатичний метод дослідження поляризаційних характеристик, так як він добре моделює процеси експлуатації металевих електродів в умовах електрохімічної обробки [11].

При проведенні досліджень в якості електрохімічної комірки використовувалась пластикова ванна, в яку занурювались електроди, закріплені на магнітних стійках (рис. 1).



Рис. 1 – Фотографії експериментальної установки: а) – загальний вигляд стану, б) – робоча зона електрохімічного розчинення

Анод – пластина зі сталі У8 розмірами 12,5×1,2×50 мм, катод – пластина з латуні Л63 розмірами 12,5×1,2×90 мм. В якості електроду порівняння був використаний платиновий електрод, опущений в розчин 1М NaCl. Ванна з електродом порівняння з'єднувалася з робочою ванною електролітичним ключем. В якості робочого електроліту використовувався водний розчин 1М NaCl, температура $t = 25^{\circ}\text{C}$. Постійно здійснювалися контроль і підтримка стабільності електропровідності та температури електроліту, для усунення їх впливу на зміну опору МЕР. Спеціально розроблене джерело живлення працювало в гальваностатичному режимі, підтримуючи постійною силу струму, яка задавалась цифровим генератором RIGOL DG1022. На генераторі задавались прямокутні імпульси струму з періодом $T = 1$ мс, сквапністю $q = 10, 5, 2.5$, тобто час дії імпульсу t_{on} в періоді складав 100, 200, 400 мкс, відповідно. Осцилограми знімалися за допомогою цифрового осцилографа ATTEN ADS 1022С. Імпульси струму і відповідного потенціалу поляризації анода реєструвалися за величин МЕР 0,8; 2,4; 4 мм ($\pm 0,1$ мм) та площі перекриття електродів 1, 2 і 4 см² ($\pm 0,1$ см²). Технологічна схема представлена на рис. 2.

Для уникнення обмежень анодному розчиненню система реєструвала перші імпульси струму та відповідні їм потенціали поляризації анода. Отримані осцилограми записувалися на USB-носій і в подальшому оброблялися за допомогою програмного забезпечення MathCAD.

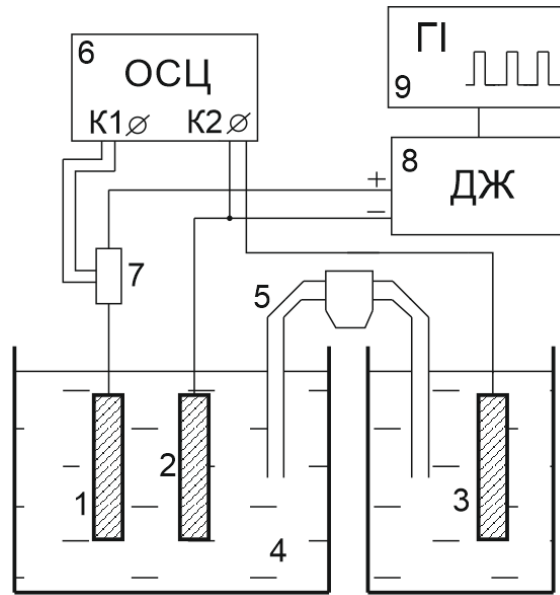


Рис. 2 – Технологічна схема дослідження поляризаційних характеристик імпульсно-гальваностатичним методом: 1 – анод; 2 – катод; 3 – електрод порівняння (платиновий); 4 – електроліт; 5 – електролітичний ключ; 6 – осцилограф; 7 – датчик струму; 8 – джерело живлення; 9 – цифровий генератор імпульсів

Динаміка поляризації досліджувалася шляхом аналізу осцилограм поляризації анода прямокутними імпульсами струму при дотриманні умови відсутності обмежень анодному розчиненню. Аналіз відомих результатів досліджень свідчить, що на швидкість та локалізацію процесу електрохімічного розчинення в координатах «поляризація-час» впливають амплітудні значення потенціалу поляризації та ділянки перехідного процесу його наростання та спаду. В загальному випадку до факторного простору, що впливає на наведені характеристики поляризаційних кривих, відносять густину струму поляризації, величину МЕР, амплітудні значення струму поляризації та часові параметри джерела живлення.

Сутність гальваностатичного методу полягає у встановленні залежності потенціалу електрода, що досліджується, від сили струму. Досліджуваний електрод підключається до одного з полюсів зовнішнього джерела живлення і гальваностатично поляризується струмом певної величини i_A . Як функція відгуку реєструється (з подальшим аналізом) зміна в часі потенціалу електрода φ_A відносно платинового електроду порівняння (рис. 2).

Результати та їх обговорення. На першому етапі досліджень за обраних технологічних умов визначався вплив густини струму на амплітудне значення потенціалу поляризації анода (рис. 3).

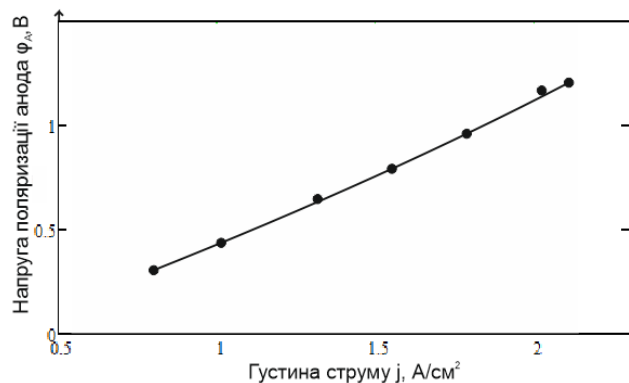


Рис. 3 – Залежність амплітудного значення потенціалу поляризації від густини поляризуючого струму ($S = 2 \text{ см}^2$, $q = 5$, МЕР = 0,5 мм)

Експерименти показали явну, близьку до лінійної, залежність амплітудних величин потенціалу поляризації сталевго анода від густини струму в імпульсі, що добре корелює з класичними уявленнями про процес.

На другому етапі досліджень, враховуючи обраний факторний простір, за підтримання постійної густини струму $j = 2 \text{ A/cm}^2$ варіювалися амплітудні значення струму поляризації, площі взаємодіючих поверхонь електродів, геометричні величини МЕП та часові параметри імпульсного джерела живлення. Характерні осцилограми представлені на рис. 4.

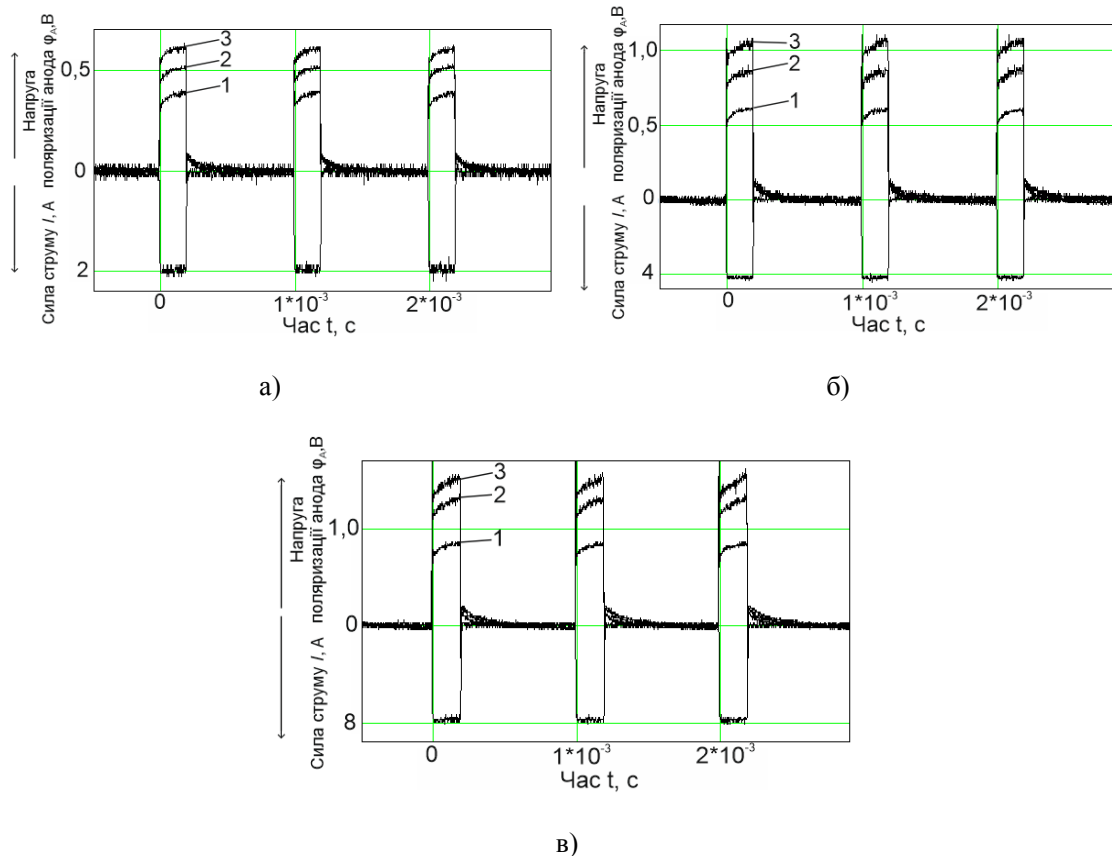


Рис. 4 – Осцилограми потенціалу поляризації за різних величин МЕП ($j = 2 \text{ A/cm}^2$; $q = 5$): а) – $S = 1 \text{ cm}^2$, $I = 2 \text{ A}$; б) – $S = 2 \text{ cm}^2$, $I = 4 \text{ A}$; в) – $S = 4 \text{ cm}^2$, $I = 8 \text{ A}$; 1 – МЕП = 0,8 мм, 2 – МЕП = 2,4 мм, 3 – МЕП = 4,0 мм

Їх аналіз показує, що за технологічних умов, близьких до ЕХРО ДЕІ, при суттєвій вагомості густини струму вона є не єдиним фактором, що визначає характер поляризації анода, а також швидкість і умови протікання електрохімічних процесів. Виявлено, що за однакової густини струму $j = 2 \text{ A/cm}^2$, геометрична величина МЕП та максимальне значення амплітуди струму суттєво впливають на потенціал поляризації анода. Так, за площі $S = 1 \text{ cm}^2$, амплітуди струму $I = 2 \text{ A}$ і $S = 4 \text{ cm}^2$, $I = 8 \text{ A}$ на геометричній величині МЕП = 0,8 мм амплітудні значення потенціалу поляризації анода відрізняються в 2,5 рази (0,32 і 0,81 В, відповідно). За тих же умов на геометричній величині МЕП = 2,4 мм (рис. 5) амплітудні значення потенціалу поляризації анода відрізняються в 2,8 рази (0,53 і 1,49 В, відповідно). На практиці це може відповідати різним механізмам розчинення поверхні аноду. Варто також відзначити тенденцію до зростання амплітуди потенціалу поляризації зі збільшенням геометричної величини МЕП (рис. 5).

Не виявлено значимого впливу на амплітуду потенціалу поляризації часових параметрів джерела живлення, характерних для ЕХРО ДЕІ (рис. 6). Тенденція до зростання амплітуди потенціалу поляризації анода (від 3% до 14% величини потенціалу поляризації на різних МЕП) спостерігається лише за $I = 8 \text{ A}$ при збільшенні тривалості імпульсу від 100 мкс до 400 мкс. Але за $I = 2 \text{ A}$ ця тенденція практично зникає.

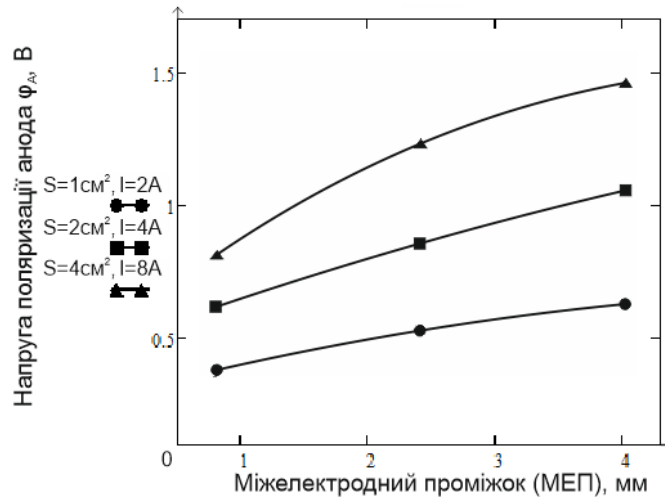


Рис. 5 – Залежність потенціалу поляризації від МЕП за різних комбінацій площі електродів і амплітуди струму поляризації ($j = 2 \text{ A/cm}^2$; $q = 5$)

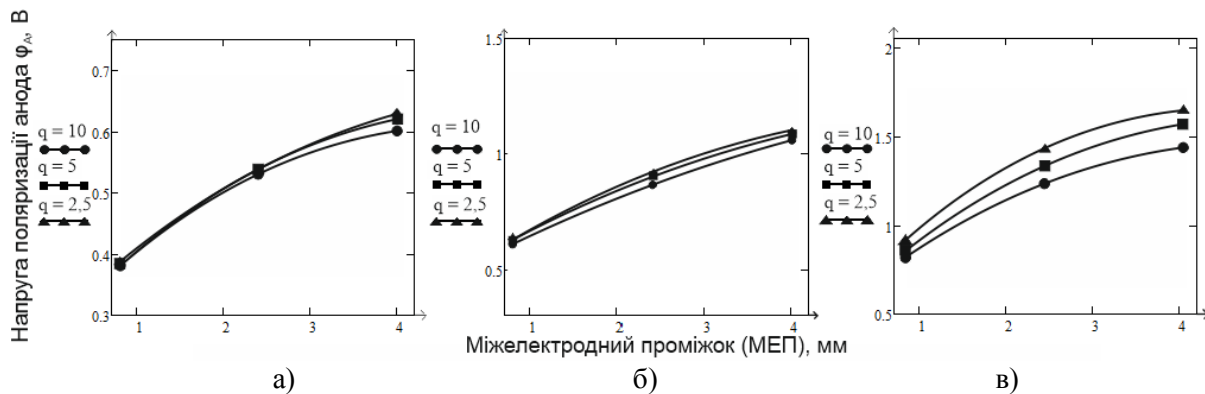


Рис. 6 – Вплив сквапності імпульсів q на величину потенціалу поляризації за різних значень МЕП: а) – $S = 1 \text{ cm}^2$, $I = 2 \text{ A}$; б) – $S = 2 \text{ cm}^2$, $I = 4 \text{ A}$; в) – $S = 4 \text{ cm}^2$, $I = 8 \text{ A}$

Це можна пояснити незавершеністю за даних тривалостей імпульсів перехідного процесу росту потенціалу поляризації. Не виключено, що при подальшому зростанні струму поляризації дана тенденція стане більш вагомюю.

Висновки

1. Виявлено, що за технологічних умов, близьких до ЕХРО ДЕІ, при суттєвій вагомості густини струму вона є не єдиним фактором, що визначає характер поляризації анода і, відповідно, швидкість і умови протікання електрохімічних процесів. Вагомими факторами є також амплітудне значення струму поляризації та геометрична величина МЕП.

2. Встановлено якісний та кількісний вплив амплітудного значення струму поляризації та геометричної величини МЕП на динаміку анодної поляризації за технологічних умов, близьких до ЕХРО ДЕІ.

3. Створено окремі елементи наукових засад розвитку технології електрохімічної обробки дротяним електродом, які можуть бути корисними при дослідженнях процесу та проектуванні реально діючих технологій ЕХРО ДЕІ.

Перелік використаних джерел:

1. A Study of Electrochemical Machining of Ti-6Al-4V in NaNO_3 solution / H. Li [et al.] // Scientific Reports. – 2016. – № 6:35013. – Pp. 1-11. – Mode of access: DOI: 10.1038/srep35013.
2. Электрохимическая размерная обработка металлов и сплавов. Проблемы теории и практики : монография / О.И. Невский, В.М. Бурков, Е.П. Гришина, Е.Л. Гаврилова, А.В. Балмасов,

- А.В. Носков, М.Г. Донцов. – Иваново : ГОУВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2006. – 282 с.
3. Davydov A.D. Electrochemical Machining of Metals: Fundamentals of Electrochemical Shaping / A.D. Davydov, V.M. Volgin, V.V. Lyubimov // Russian Journal of Electrochemistry. – 2004. – Vol. 40, № 12. – Pp. 1230-1265.
 4. Галанин С. И. Электрохимическая обработка металлов и сплавов микросекундными импульсами тока / С.И. Галанин. – Кострома, 2001. – 119 с.
 5. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия: учебник для хим.-технолог. спец. ВУЗов / Л.И. Антропов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1984. – 519 с.
 6. Расчет параметров распределения плотности технологического тока при электрохимической обработке проволочным электродом / В.И. Осипенко, Д.О. Ступак, О.А. Тригуб, А.В. Билан // Электронная обработка материалов. – 2012. – № 48 (2). – С. 16-23.
 7. Осипенко В.И. Исследование процессов съема материала при электрохимической размерной обработке проволочным электродом / В.И. Осипенко, А.П. Плахотный, А.В. Билан // Вісник СевНТУ : Зб. наук. пр. – 2011. – С. 107-112.
 8. Rybalka K.V. Electrochemical Behavior of Stainless Steel in Aerated NaCl Solutions by Electrochemical Impedance and Rotating Disk Electrode Methods / K.V. Rybalka, L.A. Beketaeva, A.D. Davydov // Russian Journal of Electrochemistry. – 2006. – Vol. 42, № 4. – Pp. 370-374.
 9. Galanin S.I. Polarization of Jewelry Gold Alloys by Bipolar Current Pulses in a Polishing Electrolyte / S.I. Galanin, I.V. Kalinnikov // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2008. – Vol. 44, № 5. – Pp. 359-366.
 10. External control of anodic dissolution mechanisms of 100Cr6 in nitrate/chloride mixed electrolytes / A. Lesch, G. Wittstock, C. Burger, B. Walther, J. Hackenberg // Journal of Electrochemical Science and Engineering. – 2011. – Vol. 1, № 1. – Pp. 39-54. – Mode of access: DOI: 10.5599/jese.2011.0004.
 11. Основы теории и практики электрохимической обработки металлов и сплавов / М.А. Толстая [и др.]. – М. : 1981. – 263 с.

References:

1. Li H., Gao C., Wang G., Qu N., Zhu D. A Study of Electrochemical Machining of Ti-6Al-4V in NaNO₃ solution. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6:35013, pp. 1-11. doi: 10.1038/srep35013.
2. Nevskiy O.I., Burkov V.M., Grishina Ye.P., Gavrilova Ye.L., Balmasov A.V., Noskov A.V., Dontsov M. *Elektrokhimicheskaya razmernaya obrabotka metallov i spлавov. Problemy teorii i praktiki: Monografiya* [Electrochemical dimensional processing of metals and alloys. Problems of Theory and Practice: Monograph]. Ivanovo, GOUVPO Ivanovskii state chemistry-technological university Publ., 2006. 282 p. (Rus.)
3. Davydov A. D., Volgin V.M., Lyubimov V.V. Electrochemical Machining of Metals: Fundamentals of Electrochemical. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2004, vol. 40, no. 12, pp. 1230-1265.
4. Galanin S.I. *Elektrokhimicheskaya obrabotka metallov i spлавov mikrosekundnymi impul'sami toka* [Electrochemical treatment of metals and alloys by microsecond current pulses]. Kostroma, 2001. 119 p. (Rus.)
5. Antropov L.I. *Teoreticheskaya elektrokhimiya: Uchebnic dlya khimiko-tekhnologicheskikh spets vuzov* [Theoretical Electrochemistry: Textbook. for chemical technologist specialist universities]. Moscow, Higher School Publ., 1984. 519 p. (Rus.)
6. Osipenko V.I., Stupak D.O., Trigub O.A., Bilan A.V. *Raschet parametrov raspredeleniya plotnosti tekhnologicheskogo toka pri elektrokhimicheskoy obrabotke provolochnym elektrodom* [Calculation of the parameters of the distribution of the density of the technological current in the electrochemical processing of wire electrode]. *Elektronnaiia obrabotka materialov – Surface engineering and applied electrochemistry*, 2012, no. 48 (2), pp. 16-23. (Rus.)
7. Osipenko V.I., Plakhotny A.P., Bilan A.V. Issledovaniye protsessov s'yema materiala pri elektrokhimicheskoy razmernoy obrabotke provolochnym elektrodom [Study of the processes of removal of material during electrochemical dimensional processing with a wire electrode]. *Visnyk SevNTU – Journal of the Sevastopol National Technical University*, 2011, pp. 107-112. (Rus.)
8. Rybalka K.V., Beketaeva L.A., Davydov A.D. Electrochemical Behavior of Stainless Steel in Aerated NaCl Solutions by Electrochemical Impedance and Rotating Disk Electrode Methods. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2006, vol. 42, no. 4, pp. 370-374.

9. Galanin S.I., Kalinnikov I.V. Polarization of Jewelry Gold Alloys by Bipolar Current Pulses in a Polishing Electrolyte. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2008, vol. 44, no. 5, pp. 359-366.
10. Lesch A., Wittstock G., Burger C., Walther B., Hackenberg J. External control of anodic dissolution mechanisms of 100Cr6 in nitrate/chloride mixed electrolytes. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, 2011, vol. 1, no. 1, pp. 39-54. doi: 10.5599/jese.2011.0004.
11. Shcherbak M.V., Tolstaia M.A., Anisimov A.P., Postanogov V.Kh. *Osnovy teorii i praktiki elektrokhimicheskoy obrabotki metallov i splavov* [Fundamentals of the theory and practice of electrochemical machining of metals and alloys]. Moscow, 1981. 263 p. (Rus.)

Рецензент: С.В. Поздєєв

д-р техн. наук, професор, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України

Стаття надійшла 12.09.2018

УДК 621.658.012.531

doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160266

© Самотугін С.С.¹, Христенко О.А.²

НАНОТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ: ПЛАЗМЕННОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ РЕЗЬБОНАРЕЗНОГО ИНСТРУМЕНТА

В работе исследован процесс плазменного поверхностного модифицирования резьбонарезной гребенки из стали Р6М5 с образованием субмикроструктурной структуры на поверхности инструмента. При определенных технологических условиях плазменного модифицирования инструмента из быстрорежущей стали создаются возможности дополнительного повышения твердости и теплостойкости за счет образования в модифицированной зоне после финишного отпуска ультрадисперсной мартенситно-карбидной структуры.

Ключевые слова: упрочнение, плазма, гребенка, резьбонарезание, субмикроструктурирование.

Самотугін С.С., Христенко О.А. Нанотехнології в машинобудуванні: плазмове модифікування різьбонарізного інструменту. У роботі досліджено процес плазмового поверхневого модифікування різьбонарізної гребінки зі сталі Р6М5 з утворенням субмикроструктурної структури на поверхні інструменту. При певних технологічних умовах плазмового модифікування інструменту зі швидкорізальної сталі створюються можливості додаткового підвищення твердості і теплостійкості за рахунок утворення в модифікованій зоні після фінішної відпустки ультрадисперсної мартенситно-карбідної структури. Дослідження показали, що підвищення твердості і теплостійкості різальних крайок гребінок зі сталі Р6М5 при плазмовому модифікуванні обумовлено дією субструктурного, дислокаційного і твердорастворного механізмів зміцнення. В структурі модифікованої зони утворюються надзвичайно дисперсні карбідні частки (близько 100 нм), які грають роль бар'єрів і перешкоджають росту аустенітного зерна і, отже, кристалів мартенситу при швидкісному загартовуванню як в рідкій, так і в твердій фазі. Разом з тим, ступінь підвищення HV і K4p58 незначна, а підвищення вмісту залишкового аустеніту і додаткове насичення твердого розчину вуглецем і карбідообразуючими елементами припускають ефективність виконання фінішної об'ємної відпустки і реалі-

¹ д-р техн. наук, професор, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь

² ассистент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь, khrystenko.olga@gmail.com