

УДК 621.9.048.4

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.24-35>

О.Ф. Сіса, доц., канд. техн. наук, **В. Я. Мірзак**, доц., канд. техн. наук, **В. В. Пукалов**, доц., канд. техн. наук, **О. С. Довжук**, асп., **Д. С. Тупаленко**, асп.

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: sisoaleh@gmail.com

Удосконалення технології виготовлення зразків із ливарної високоміцної сталі 110Г13Л для металографічних досліджень та випробувань

Запропоновано прогресивну технологію виготовлення зразків із ливарної високоміцної сталі 110Г13Л для металографічних досліджень та випробувань за рахунок використання для формоутворення зразка-стрижня квадратного перерізу способу розмірної обробки електричною дугою в поперечному гідравлічному потоці робочої рідини в умовах прямого прокачування рідини крізь технологічний отвір в графітовому електроді-інструменті. За допомогою метода математичного планування експерименту (план 2^{4+1}), експериментально досліджено такі технологічні характеристики процесу РОД, як продуктивність обробки, питома продуктивність обробки, питома витрата електроенергії, шорсткість обробленої поверхні, бічний міжелектродний зазор та відносний лінійний знос графітового електрода-інструмента. Показано, що використання технології РОД зразків, порівняно з електроімпульсною обробкою, дозволяє збільшити продуктивність обробки у 8 – 10 разів.

сталь 110Г13Л, електрична дуга, гідродинамічний потік, технологічне оснащення, технологічні характеристики

Постановка проблеми. На Україні деякі заводи гірничого обладнання спеціалізуються по випуску великогабаритних конусів броні для млинів, що здрибнюють гірську породу. Звичайно конуси виготовляють із ливарної високоміцної сталі Гадфільда марки 110Г13Л. Оскільки дані деталі відповідальні та коштовні, з кожного відливка із приливку виготовляють стрижневі зразки квадратного перерізу для подальших досліджень, з метою перевірки на працездатність: що найменш, один – для заводу та один – для організації покупця цього виробу.

Виготовлення стрижневих зразків із ливарної сталі 110Г13Л пов'язано з певними технічними складностями. Дана сталь, як відомо [1–4], характеризується тим, що її висока зносостійкість поєднується з високим значенням міцності, пластичності та ударної в'язкості. Вона має такі механічні характеристики: $\sigma_e = 800 \dots 1000$ МПа, $\sigma_m = 250 \dots 400$ МПа, $\delta = 35 \dots 45$ %, $\psi = 40 \dots 50$ %. Збільшена твердість (до НВ 550 – 600) та зносостійкість поверхневих шарів конусів із цієї сталі набуває в процесі експлуатації під дією ударних навантажень і абразивного впливу, завдяки підвищеній здібності до деформаційного зміцнення високомарганцевого аустеніту. Саме тому дану сталь можна віднести до важкооброблюваних різанням матеріалів [5].

В цьому зв'язку, певний практичний інтерес являє використання для виготовлення зразків із ливарної сталі 110Г13Л електроерозійної обробки, яка здатна обробляти будь-якій електропровідний матеріал поза залежністю від його фізичних властивостей [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вибір способу електроерозійної обробки зразків, насамперед, пов'язаний з ефективністю його застосування. В свою чергу, ефективність визначається такою технологічною характеристикою, як продуктивність обробки.

Існують три основних способи електроерозійної обробки, які можуть бути застосовані для виготовлення зразків-стрижнів:

- електроіскрова обробка [7]. При її реалізації процес здійснюється виключно іскровими розрядами, а електрична енергія вводиться в робочу зону невеликими порціями (дискретно) зі шпаруватістю $q > 10$, тобто з великими паузами. Саме тому продуктивність електроіскрової обробки не перевищує сотні $\text{мм}^3/\text{хв}$. Крім того, процес супроводжується значним лінійним зносом електрода-інструмента ($\gamma_l > 40\%$);

- електроімпульсна обробка [8]. Вона реалізується за рахунок застосування спеціальних генераторів імпульсів, які забезпечують їх шпаруватість в межах $1 < q < 10$, тобто із значно меншими паузами. Це дозволило довести продуктивність електроімпульсної обробки до тисячі $\text{мм}^3/\text{хв}$. При цьому відносний лінійний знос суттєво зменшився ($\gamma_l < 1\%$);

- розмірна обробка електричною дугою (РОД) [9, 10]. При реалізації способу РОД процес здійснюється електричною дугою, яка безперервно (без пауз: $q = 1$) горить між електродом-інструментом та електродом-заготовкою, що обробляється. Оскільки електрична енергія вводиться в зону обробки безперервно, спосіб РОД забезпечує найбільшу із усіх способів електроерозійної обробки продуктивність. Так, при РОД глибоких отворів (діаметр 35 мм, глибина 2800 мм) в каландровому валку на верстаті моделі «Дуга 12», продуктивність при технологічному струмі 800 А складає 25 000 $\text{мм}^3/\text{хв}$ [9, с. 274].

Одним із факторів, що впливає на процес РОД, є гідродинамічний режим робочої рідини. В процесі обробки він виконує потрійну функцію:

- визначає енергетичний стан дуги. В роботі [11] показано, із підвищенням динамічного тиску потоку P_d (тиску в напрямку течії робочої рідини): напруженість електричного поля E та густина струму в стовпі дуги зростають;

- визначає геометричний стан електричної дуги як інструмента для розмірної обробки різних поверхонь. Із підвищенням динамічного тиску потоку P_d площа поперечного перерізу дуги S зменшується. Це дозволяє використати таку дугу для достатньо точного формоутворення поверхонь;

- відповідає за процес інтенсивного вилучення продуктів ерозії із зони горіння дуги, чим забезпечує передумови стабілізації процесу обробки поверхонь.

Однак, процес РОД квадратних стрижнів, до якого відносяться зразки із ливарної сталі 110Г13Л, не був об'єктом дослідження, а тому невідомі ефективні електричний та гідродинамічний режими і технологічні характеристики обробки, що стримує його технологічні можливості.

Постановка завдання. Як бачимо, для того, щоб мати можливість керувати процесом РОД квадратних стрижнів, треба експериментально встановити зв'язки між факторами, що обумовлюють режим обробки, та вихідними технологічними характеристиками.

Метою дослідження є будівництво математичних моделей технологічних характеристик процесу РОД квадратних стрижнів із ливарної сталі 110Г13Л.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- запропонувати новий технологічний процес РОД квадратних стрижнів;
- отримати математичні моделі продуктивності обробки M , питомої продуктивності обробки M_a , питомої витрати електроенергії a , шорсткості обробленої поверхні

Ra , бічного міжелектродного зазору δ та відносного лінійного зносу електрода-інструмента γ_L .

Методика дослідження. На підставі апріорної інформації було відібрано чотири фактора, які можуть впливати на технологічні характеристики процесу РОД квадратних стрижнів. Це: сила струму I , А; статичний тиск робочої рідини на потоку в міжелектродний проміжок $P_{ст}$, МПа; площа торцевої поверхні електрода-інструмента (площа обробки) F та висота пояса h на електроді-інструменті. В роботі застосовувалося багатофакторне планування експерименту, зокрема план 24-1, який передбачає проведення 8 основних дослідів та 4 досліді у центрі плану для визначення дисперсії дослідів. Діапазон варіювання факторів показано в таблиці 1. Усі вибрані фактори задовольняють умовам керованості, операціональності та однозначності.

Таблиця 1 – Матриця планування та результати експериментальних досліджень технологічних характеристик процесу РОД квадратних стрижнів

Фактори		I , А	$P_{ст}$, МПа	F , мм ²	h , мм	Технологічні характеристики							
Основний рівень (X_{i0})		300	1,0	3633	12,5	M , мм ³ /хв	$M_{ав}$, мм ³ /А·хв	a , кВт·год кг	Ra , мкм	δ , мм	γ_L , %		
Інтервал варіювання (ΔX_i)		200	0,2	1717	7,5								
Верхній рівень ($x_i = +1$)		500	1,2	5350	20								
Нижній рівень ($x_i = -1$)		100	0,8	1916	5								
Код		x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6		
Номер дослідів	1	Порядок реалізації	9	+	+	+	+	9150	18,30	4,07	30	0,14	3,42
	2		2	-	+	+	-	1720	17,20	4,35	20	0,07	3,10
	3		7	+	-	+	-	6040	12,08	4,41	45	0,10	2,65
	4		1	-	-	+	+	1370	13,70	4,05	25	0,16	2,00
	5		3	+	+	-	-	10450	20,90	3,52	30	0,10	1,45
	6		4	-	+	-	+	1500	15,0	4,90	14	0,15	1,02
	7		6	+	-	-	+	5710	11,42	4,65	40	0,18	0,70
	8		5	-	-	-	-	1510	15,10	3,52	16	0,13	0,50
Досліді у центрі плану	1	0	0	0	0	4680	15,60	4,20	26	0,13	1,85		
	2	0	0	0	0	4682	15,61	4,30	30	0,13	1,90		
	3	0	0	0	0	4679	15,59	3,80	24	0,14	1,80		
	4	0	0	0	0	4678	15,59	4,10	27	0,13	1,85		

Джерело: розроблено авторами

Інші параметри процесу РОД квадратних стрижнів були зафіксовані на таких постійних рівнях:

- напруга на електродах $U = 30$ В;
- склад робочої рідини: масло «Індустріальне І-20А ДСТУ 20790-05 – 50 %»; гас освітлювальний ДСТУ 4953-05 – 50 %;
- полярність обробки – пряма (електрод-заготовка – «плюс»).

Для дослідження технологічних характеристик процесу РОД квадратних стрижневих зразків із ливарної сталі 110Г13Л використовувався експериментальний електроерозійний копіювально-прошивний верстат моделі «АМ-1» (рис. 1).



1 – верстат; 2 – пульт керування; 3 – станція робочої рідини; 4 – джерело живлення технологічним струмом; 5 – пульт керування
Рисунок 1 – Електроерозійний верстат «АМ-1»

Джерело: розроблено авторами

Технологічна схема формоутворення квадратного стержневого зразка способом РОД пояснюється за допомогою креслення експериментального пристрою (рис. 2).

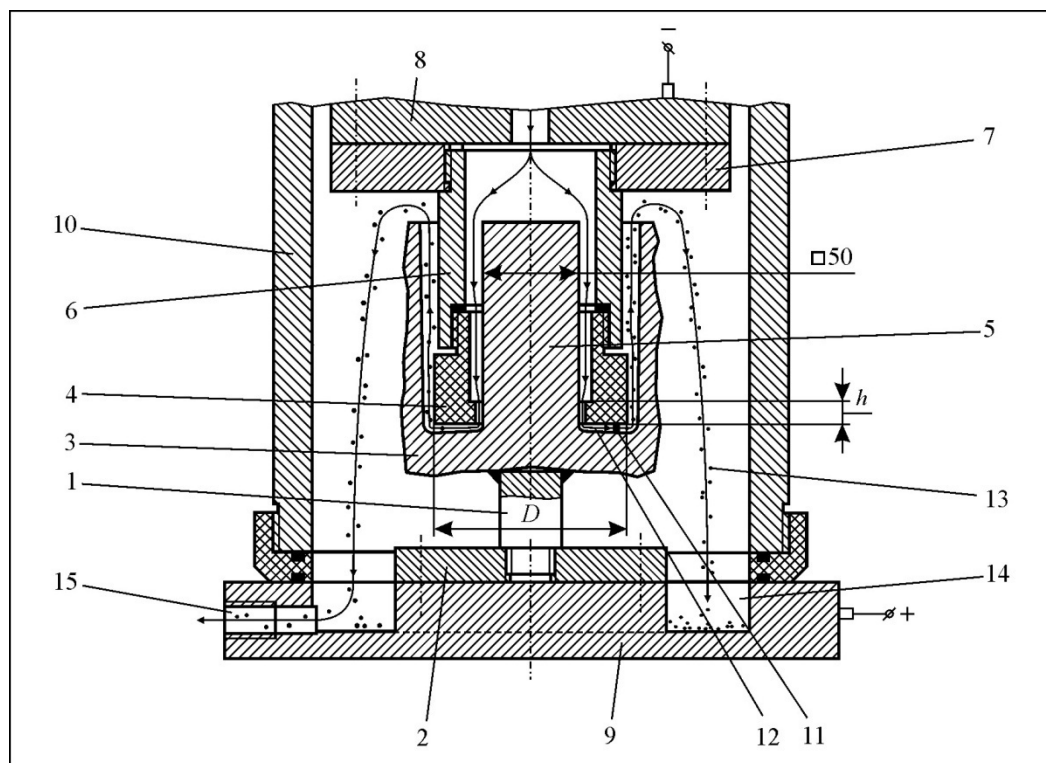


Рисунок 2 – Креслення експериментального пристрою

Джерело: розроблено авторами

Пристрій включає в себе основні деталі:

- тримач електрода-заготовки складеної конструкції, який виконано із стрижня 1 та фланцю 2, та з'єднані різьбою;
- електрод-заготовка 3, що відрізана від корпусу броні газовим різакон та приварена до стрижня 1 тримача для подальшої обробки;

- електрод-інструмент 4 кільцевої конструкції з квадратним центральним отвором для формоутворення квадратного зразка-стрижня 5, який кріпиться різьбою на електродотримачі 6;
- тримач 7 для закріплення електродотримача 6 разом з електродом-інструментом 4 на шпindelній плиті 8 верстата;
- плита 9 для закріплення фланця 2 разом зі стрижнем 1 та електродом-заготовкою 3.

Пристрій працює таким чином. Перед початком роботи герметичну камеру 10 та шпindelну плиту 8 піднімають вгору за допомогою гідроприводу (на рис. 2 не показано). На шпindelній плиті 8 закріплюють тримач 7 разом з електродотримачем 6 та електродом-інструментом 4 (рухома частина), а на плиті 9 закріплюють фланець 2 разом зі стрижнем 1 та електродом-заготовкою 3, з урахуванням центрування останніх. Далі опускають камеру 10 до фізичного герметичного контакту з верхньою горизонтальною поверхнею плити 9 та включають насос подачі робочої рідини. Робоча рідина подається в зону обробки крізь центральний отвір в шпindelній плиті 8. Реалізується зворотне прокачування. Вмикають технологічний струм та ведуть обробку електрода-заготовки 3 з формоутворенням квадратного зразка-стрижня 5. При цьому електрична дуга 11 горить в торцевому міжелектродному зазорі 12 в потужному гідродинамічному потоці робочої рідини, а продукти ерозії 13, що утворюються при РОД, інтенсивно виносяться із зони обробки спочатку у кільцеву порожнину 14 у плиті 9, і далі вилучаються із неї разом з відпрацьованою робочою рідиною через отвір 15 у фільтр та в бак станції робочої рідини верстата (на рис. 2 не показано).

Слід відмітити, що варіювання площі обробки F здійснювалося за рахунок зміни зовнішнього діаметра D електрода-інструмента 4. Так, площі обробки $F_{\max} = 5350 \text{ мм}^2$ відповідає $D_{\max} = 100 \text{ мм}$; $F_{\text{сеп}} = 3633 \text{ мм}^2$ – $D_{\text{сеп}} = 88,4 \text{ мм}$; $F_{\min} = 1916 \text{ мм}^2$ – $D_{\min} = 75 \text{ мм}$.

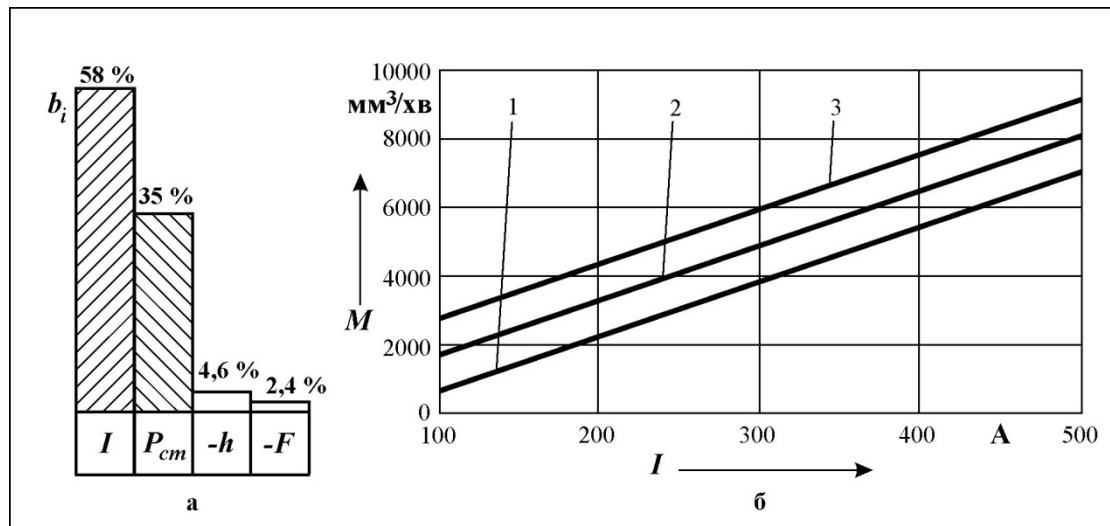
Виклад основного матеріалу. При будівні математичних моделей технологічних характеристик процесу РОД квадратних стрижневих зразків із ливарної сталі 110Г13Л виходили із того, що значення факторів у кодовому (x_i) та натуральному (X_i) масштабах зв'язані співвідношеннями

$$x_1 = \frac{X_1 - 300}{200}; \quad (1) \quad x_2 = \frac{X_2 - 1,0}{0,2}; \quad (2) \quad x_3 = \frac{X_3 - 3633}{1717}; \quad (3) \quad x_4 = \frac{X_4 - 12,5}{7,5}. \quad (4)$$

Отримано математичну модель продуктивності обробки M (5)

$$y_1 = 4681 + 3156x_1 + 1023x_2 - 111x_3 - 249x_4. \quad (5)$$

Як бачимо (рис. 3, а), найбільш впливає на продуктивність обробки M сила технологічного струму I : ступінь впливу складає 58 %. Із підвищенням сили струму продуктивність підвищується. Останнє підтверджує теплову природу процесу РОД. Саме тому, силу струму можна розглядати як головний керуючий фактор.



1 – $P_{cm} = 0,8$ МПа; 2 – $P_{cm} = 1,0$ МПа; 3 – $P_{cm} = 1,2$ МПа
Рисунок 3 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність продуктивності обробки M від I та P_{cm}
($F = 1916 \text{ мм}^2$; $h = 5 \text{ мм}$) (б)

Джерело: розроблено авторами

Вплив на продуктивність обробки статичного тиску робочої рідини на вході в міжелектродний зазор P_{cm} трохи менший, але достатньо великий і складає 35%. Оскільки підвищення тиску приводить до підвищення продуктивності обробки стрижневих зразків, певний практичний інтерес являє процес інтенсифікації обробки за рахунок одночасного підвищення сили технологічного струму I та тиску P_{cm} . З фізичної точки зору дане явище пояснюється тим, що з підвищенням сили струму збільшується кількість продуктів ерозії в міжелектродному зазорі, що провокує їх вторинне диспергування, а підвищення тиску приводить до підвищення швидкості потоку в зазорі та інтенсифікації вилучення їх із нього і процес стабілізується.

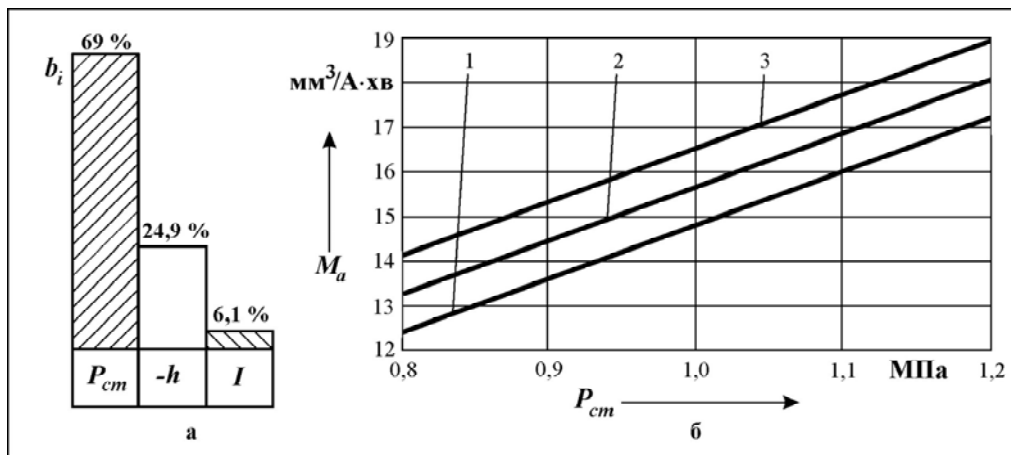
Вплив на продуктивність обробки інших факторів – незначний і складає: висота пояса на електроді-інструменті h – 4,6% та площа обробки F – 2,4%.

На рис. 3, б представлена графічна залежність продуктивності обробки M від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_{cm} . В рамках експерименту продуктивність обробки стрижневих зразків змінювалася у межах від $1500 \text{ мм}^3/\text{хв}$ до $10450 \text{ мм}^3/\text{хв}$, що перевищує продуктивність електроімпульсної обробки у 8–10 разів.

Отримано математичну модель питомої продуктивності обробки M_a (6)

$$y_2 = 15,46 + 0,21x_1 + 2,38x_2 - 0,86x_4. \quad (6)$$

Як бачимо, на питому продуктивність обробки M_a значно впливає статичний тиск робочої рідини на вході потоку в міжелектродний зазор P_{cm} . Із підвищенням статичного тиску питома продуктивність збільшується. Вплив складає 69% (рис. 4, а). Саме тому, статичний тиск можна розглядати як головний керуючий фактор. Суттєва залежність питомої продуктивності обробки від статичного тиску, також як і продуктивність обробки, пояснюється тим, що інтенсивний потік зменшує долю вторинного диспергування продуктів ерозії в міжелектродному зазорі, що є особливістю процесу РОД, його додатковим керуючим фактором. Останнє дозволяє розширити технологічні можливості процесу РОД.



1 – $h = 20$ мм; 2 – $h = 12,5$ мм; 3 – $h = 5$ мм

Рисунок 4 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність питомої продуктивності обробки M_a від P_{cm} та h ($I = 500$ А) (б)

Джерело: розроблено авторами

Вплив на питому продуктивність обробки M_a висоти пояска на електроді-інструменті h менший, але суттєвий, і складає 24,9 %. Із зменшенням величини h питома продуктивність збільшується.

Найменш впливає на питому продуктивність обробки M_a сила технологічного струму. Вплив її складає 6,1 %. А площа обробки F , як показали дослідження, статистично не впливає на M_a . Тому фактор F вилучено із моделі (6).

На рис. 4, б, представлена графічна залежність питомої продуктивності обробки M_a від двох найбільш впливових факторів: статичного тиску робочої рідини P_{cm} та висоти пояска на електроді-інструменті h . В рамках експерименту питома продуктивність обробки стержневих зразків змінювалася у межах від 15,0 $\text{mm}^3/\text{A}\cdot\text{хв}$ до 20,9 $\text{mm}^3/\text{A}\cdot\text{хв}$, що перевищує питому продуктивність електроімпульсної обробки у 1,5-2 рази.

Отримано математичну модель питомої витрати електроенергії a (7)

$$y_3 = 4,184 + 0,234x_4 \tag{7}$$

За результатами дослідження, усі коефіцієнти регресії моделі, за винятком коефіцієнта при факторі h , признані статистично не значимими та вилучені із моделі. Отже, на питому витрату електроенергії впливає лише один фактор (ступінь впливу 100 %): висота пояска на електроді-інструменті h (рис. 5).

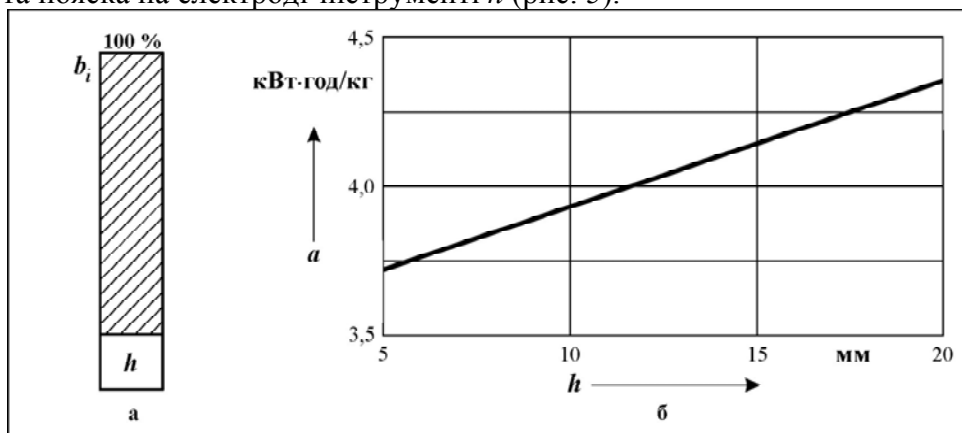


Рисунок 5 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність питомої витрати електроенергії a від h (б)

Джерело: розроблено авторами

З фізичної точки зору, висота пояска h (див. рис. 2) обмежує довжину бічного міжелектродного зазору, в якому можуть виникати холості (не робочі) електричні розряди, які споживають електроенергію, але не руйнують торцеву поверхню деталі.

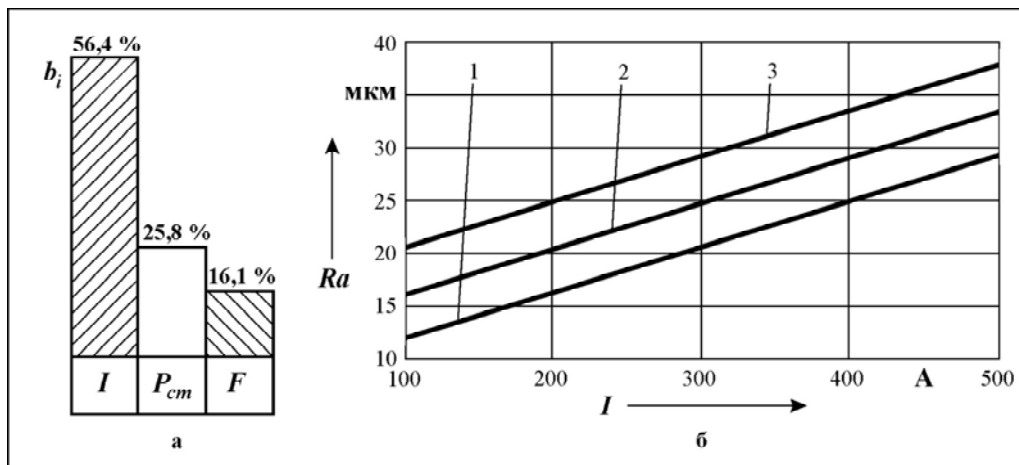
В рамках експерименту питома витрата електроенергії процесу РОД стержневих зразків змінювалася у межах від 3,52 кВт·год/кг до 4,90 кВт·год/кг, що не перевищує питому продуктивність електроімпульсної обробки.

Отримано математичну модель шорсткості обробленої поверхні Ra (8)

$$y_4 = 27,5 + 8,75x_1 - 4x_2 + 2,5x_3. \quad (8)$$

Як бачимо (рис. 6, а), найбільш впливає на шорсткість обробленої поверхні Ra сила технологічного струму I : ступінь впливу складає 56,1 %. Із підвищенням сили струму шорсткість підвищується. Це явище узгоджується з тим, що підвищення сили струму приводить до підвищення геометричних параметрів елементарної електроерозійної лунки, а саме її глибини та діаметру. Саме тому, силу струму можна розглядати як головний керуючий фактор.

Вплив на шорсткість обробленої бічної поверхні зразка статичного тиску робочої рідини на вході в міжелектродний зазор P_{cm} трохи менший, але достатньо великий і складає 25,8 %. Оскільки підвищення тиску приводить до зменшення шорсткості Ra , з метою забезпечення високопродуктивної обробки без суттєвого зниження якості обробленої поверхні, доцільно одночасно підвищувати силу технологічного струму I та тиск P_{cm} .



1 – $P_{cm} = 1,2$ МПа; 2 – $P_{cm} = 1,0$ МПа; 3 – $P_{cm} = 0,8$ МПа

Рисунок 6 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність шорсткості обробленої поверхні Ra від I та P_{cm} ($F = 1916 \text{ мм}^2$) (б)

Джерело: розроблено авторами

Ступінь впливу на шорсткість обробленої бічної поверхні зразка площі обробки F ще менша і складає 16,1 %.

На рис. 6, б, представлена графічна залежність шорсткості обробленої бічної поверхні зразка Ra від двох найбільш впливових факторів: сили струму I та статичного тиску робочої рідини P_{cm} . В рамках експерименту шорсткість обробленої бічної поверхні зразка після РОД змінювалася у межах від Ra 14 μm до Ra 45 μm . Оскільки отримані зразки для металографічних досліджень подальше оброблюються (розрізаються, шліфуються та поліруються), отримана після РОД шорсткість є задовільною.

Отримано математичну модель бічного міжелектродного зазору δ (9)

$$y_5 = 0,13 + 0,03x_4. \quad (9)$$

Як бачимо, в умовах експерименту фактори I , P_{cm} та F не впливають на δ . Бічний міжелектродний зазор повністю (ступінь впливу 100 %) визначається висотою пояска на електроді-інструменті h (рис. 7). Із підвищенням h зазор δ збільшується. З фізичної точки зору даний ефект пояснюється підвищенням гідравлічного опору течії рідини в міжелектродному зазорі та подальшого зменшення швидкості потоку, а меншій швидкості, як відомо [11], відповідає більша довжина стовпа дуги, а отже більший міжелектродний зазор.

В рамках експерименту бічний міжелектродний зазор при РОД зразка змінювався у межах від 0,07 мм до 0,18 мм. Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні електродів-інструментів для реалізації процесу РОД квадратних зразків із ливарної сталі 110Г13Л.

Слід відмітити, якщо лінія контуру заготовки зразка в плані в реальних умовах не виходить за межі контуру діаметра D електрода-інструмента (див. рис. 2), процес РОД квадратних зразків здійснюється без утворення або з частковим утворенням бічного міжелектродного зазору (рис. 8).

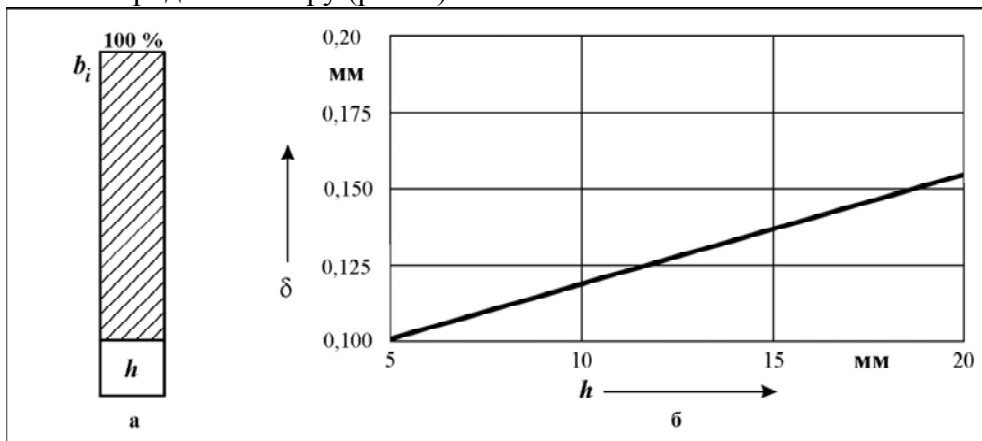


Рисунок 7 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність бічного міжелектродного зазору δ від висоти пояска на електроді-інструменті h (б)

Джерело: розроблено авторами

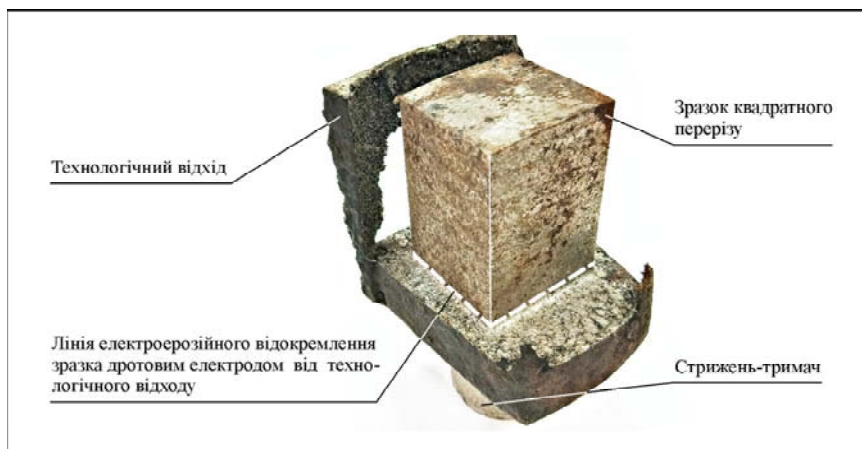


Рисунок 8 – Зразок із ливарної сталі 110Г13Л після РОД

Джерело: розроблено авторами

Отримано математичну модель відносного лінійного зносу графітового електрода-інструмента γ_L (10):

$$y_5 = 1,85 + 0,39x_2 + 0,94x_3. \quad (10)$$

За результатами досліджень, ступінь впливу на знос γ_L площі обробки F – найбільша та складає 70,7 % (рис. 9). Отже, фактор F є головним, керуючим. Вплив статичного тиску P_{cm} менший, але суттєвий, та складає 29,3 %. Той факт, що знос γ_L не залежить від сили струму, дозволяє реалізувати високопродуктивну РОД зразків (при відносно великій силі струму) в малозносному режимі роботи графітового електрода-інструмента, коли $\gamma_L < 1$ %.

В рамках експерименту відносний лінійний знос електрода-інструмента змінювався у межах від 0,5 % до 3,42 %. Результати дослідження можуть бути використані при оптимізації режиму процесу РОД квадратних зразків із ливарної сталі 110Г13Л.

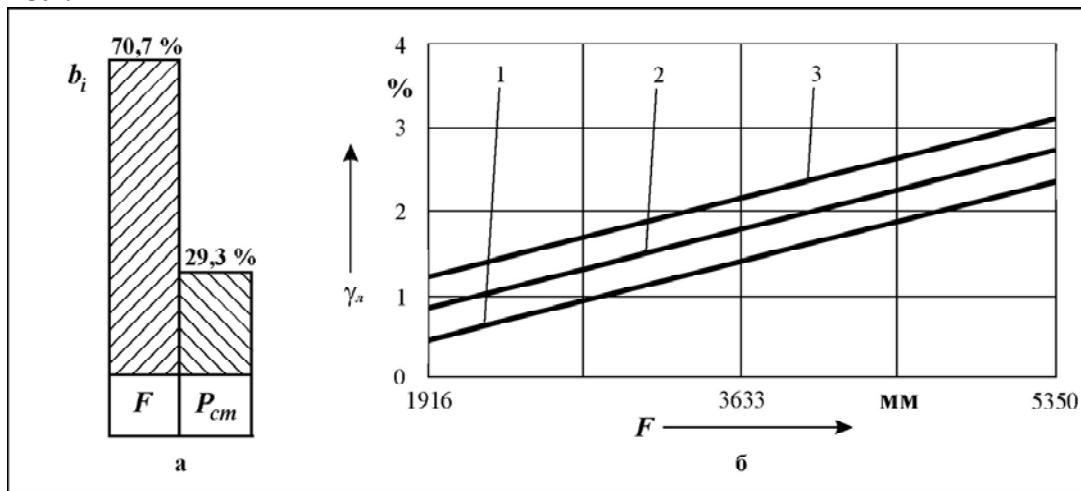


Рисунок 9 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність відносного лінійного зносу графітового електрода-інструмента γ від F та P_{cm} (б)

Джерело: розроблено авторами

Отримані моделі технологічних характеристик дозволили оптимізувати режим РОД квадратних зразків (табл. 2).

Таблиця 2 – Параметри оптимального режиму РОД квадратних зразків та його зв'язок з вихідними характеристиками

Режим обробки				Технологічні характеристики					
I , А	P_{cm} , МПа	F , мм ²	h , мм	M , мм ³ /хв	M_a , мм ³ /А·хв	a , кВт·год/кг	Ra , мкм	δ , мм	γ_L , %
500	1,2	1916	5	9720	19,44	4,42	27	0,127	1,3

Джерело: розроблено авторами

Як бачимо, найбільша продуктивність РОД зразків M складає 9720 мм³/хв, що відповідає швидкості обробки $V = 5,1$ мм/хв. В той же час, швидкість електроімпульсної обробки, принаймні, на порядок нижча. Таким чином, спосіб РОД дозволяє обробити квадратний зразок 50 × 50 мм, висотою 100 мм із ливарної сталі 110Г13Л за 19,6 хв.

Висновки. Запропоновано прогресивну технологію виготовлення квадратних зразків із ливарної високоміцної сталі 110Г13Л для металографічних досліджень та випробувань з використанням для їх формоутворення способу розмірної обробки електричною дугою. Отримано математичні моделі процесу РОД даних зразків, що дозволяють керувати продуктивністю обробки, питомою продуктивністю обробки, питомою витратою електроенергії, шорсткістю обробленої поверхні, а також бічним міжелектродним зазором та відносним лінійним зносом графітового електрода-інструмента. Показано, що використання технології РОД зразків, порівняно з їх електроімпульсною обробкою, дозволяє збільшити продуктивність обробки у 8–10 разів.

Список літератури

1. Бугай Л. А. Зниження трудомісткості механічної обробки продукції з високомарганцевих сталей. *Гірничий вісник* : зб. наук. праць, 2023. Вип.111. С. 83–89.
2. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів / Хільчевський В.В., Кондратюк С.Є., Степаненко В.О., Лопатько К.Г. К.: Либідь, 2002. С.328.
3. Сіса О. Ф., Носуленко В. І. Альтернативний спосіб обробки високоміцних зносостійких матеріалів. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*, 2005. Вип.6. С. 136–138.
4. Аналіз нормативних вимог до ВМ-сталі та розробка методики мікроструктурного контролю зереннограничних її характеристик / К. І. Узлов, О. М. Мовчан, Т. О. Черниш, Ю. М. Сапунов, Г. В. Теорія і практика металургії : заг. держ. наук. журн., 2018. №3–5. С. 56–59.
5. Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П.Мазур, Ю.М.Внуков, В.Л.Доброскок та ін.; під заг. ред. М.П.Мазура. 2-е вид. перероб. і доп. Львів : Новий світ 2000, 2001. С.422.
6. Kamenskikh, A.A., Muratov, K.R., Shlykov, E.S., Sidhu, S.S., Mahajan, A., Kuznetsova, Y.S., Ablyaz, T.R.: Recent trends and developments in the Electrical Discharge Machining Industry: *A review. J. Manuf. Mater. Process.* 7, 204 (2023), p. 204. <https://doi.org/10.3390/jmmp7060204>.
7. Nugroho, B., Yahya, A., Mat Sidek, A. R., Andromeda, T., Khamis, N. H., Current Pulse Generated by Spark of Electrical Discharge Machining (EDM). *IOP Conference Series: Journal of Physics*, 2020. IOP Publishing, 1529:042109. doi:10.1088/1742-6596/1529/4/042109.
8. Lu, B., Tang, K., Wu, M.X., Yang, Y., Yang, G.: Mechanism of electropulsing treatment technology for flow stress of metal material: *A review. Alloys* 2024, Vol. 3(1), pp. 96–125. <https://doi.org/10.3390/alloys3010006>.
9. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою. Кіровоград : Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2002. 300 с.
10. Боков В. М., Сіса О. Ф. Оброблюваність матеріалів електричною дугою. Кіровоград : Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2013. 172 с.
11. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.07 / НТУУ «КПІ». Київ, 1999. 36 с.

References

1. Buhay, L.A. (2023). Reducing the complexity of machining products made of high-manganese steels. *Hirnychy visnyk*, 111, 83–89 [in Ukrainian].
2. Khil'chevs'kyu, V.V., Kondratyuk, S.Ye., Stepanenko, V.O. & Lopat'ko, K.H. (2002). *Materials science and technology of structural materials*. Kyiv: Lybid' [in Ukrainian].
3. Sisa, O.F. & Nosulenko V.I. (2005). An alternative method for processing high-strength, wear-resistant materials. *Visnyk Kremenchuts'koho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu*, 6, 136–138 [in Ukrainian].
4. Uzlov, K. I., Movchan, O. M., Chernysh, T. O. & Sapunov, Yu. M. (2018). Analiz normatyvnykh vymoh do VM-stali ta rozrobka metodyky mikrostrukturnoho kontrolyu zerenohranychnykh yiyi kharakterystyk. *Teoriya i praktyka metalurhiyi*, 3–5, 56–59 [in Ukrainian].
5. Mazur, M.P., Vnukov, Yu.M., Dobroskok, V.L., Zaloha, V.O., Novos'olov, Yu.K., & Yakubov, F.Ya. (2002). *Fundamentals of material cutting theory* (2th ed.). L'viv : Novyy svit 2000 [in Ukrainian].

6. Kamenskikh, A.A., Muratov, K.R., Shlykov, E.S., Sidhu, S.S., Mahajan, A., Kuznetsova, Y.S. & Ablyaz, T.R. (2023). Recent trends and developments in the Electrical Discharge Machining Industry: *A review. J. Manuf. Mater. Process.* 7, 204. <https://doi.org/10.3390/jmmp7060204> [in English].
7. Nugroho, B., Yahya, A., Mat Sidek, A. R., Andromeda, T. & Khamis, N. H. (2020). Current Pulse Generated by Spark of Electrical Discharge Machining (EDM). *IOP Conference Series: Journal of Physics.* IOP Publishing, 1529:042109. doi:10.1088/1742-6596/1529/4/042109 [in English].
8. Lu, B., Tang, K., Wu, M.X., Yang, Y. & Yang, G. (2024). Mechanism of electropulsing treatment technology for flow stress of metal material: *A review. Alloys.* 3(1), 96–125. <https://doi.org/10.3390/alloys3010006> [in English].
9. Bokov, V.M. (2002). *Dimensional shaping of surfaces by an electric arc.* Kirovohrad: Polihrafichno-vydavnychiy tsentr TOV «Imeks LTD» [in Ukrainian].
10. Bokov, V.M. & Sisa, O.F. (2013). *Obrobliuvanist materialiv elektrychnoiu duhoiu [Processing of materials with an electric arc].* Kirovohrad: Polihrafichno-vydavnychiy tsentr TOV «Imeks LTD» [in Ukrainian].
11. Nosulenko, V.I. (1999). Dimensional processing of metals with an electric arc. *Extended abstract of doctor's thesis.* Kyiv : NTUU «KPI» [in Ukrainian].

Oleh Sisa, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Mirzak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Victor Pukalov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olexandr Dovzhuk**, post-graduate, **Denys Tupalenko**, post-graduate
Central Ukraine National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Improvement of the Technology for Manufacturing Samples From High-Strength Cast Steel 110G13L for Metallographic research and Testing

Typically, armor cones for mills that crush rock are made of high-strength Hadfield foundry steel grade 110G13L. Since these parts are critical and expensive, square-section core samples are made from each casting from the casting for further research, in order to check for operability.

The production of core samples from cast steel 110G13L is associated with certain technical difficulties. This steel is characterized by its high wear resistance combined with high strength, ductility and impact toughness. That is why this steel can be attributed to materials that are difficult to machine.

Of certain practical interest is the use of electrical discharge machining for the manufacture of samples, which is capable of machining any electrically conductive material regardless of its physical properties. Of the three known methods of electrical discharge machining, the most productive is the method of dimensional machining of metals by electric arc (abbreviated as DMA). When implementing the DMA method, the process is carried out by an electric arc, which burns continuously (without pauses) between the electrode-tool and the electrode-workpiece being machined.

In the processing process, the hydrodynamic mode of the working fluid performs a triple function: it determines the energy state of the arc, determines the geometric state of the electric arc as a tool for dimensional processing of various surfaces and is responsible for the process of intensive removal of erosion products from the arc combustion zone, which provides the prerequisites for stabilizing the surface processing process. However, the process of DMA of square rods, to which samples from 110G13L cast steel belong, was not the object of research, and therefore the effective electrical and hydrodynamic modes and technological characteristics of processing are unknown, which limits its technological capabilities. Therefore, in order to be able to control the process of DMA of square rods, it is necessary to experimentally establish the relationship between the factors determining the processing mode and the initial technological characteristics.

The aim of the research is to build mathematical models of the technological characteristics of the DMA process of square rods made of 110G13L cast steel.

The work obtained mathematical models of the DMA process of these samples, which allow controlling the processing productivity, specific processing productivity, specific electricity consumption, roughness of the processed surface, as well as the lateral interelectrode gap and relative linear wear of the graphite electrode-tool. It is shown that the use of DMA technology of samples, compared with their electric pulse processing, allows increasing the processing productivity by 8-10 times.

steel 110G13L, electric arc, hydrodynamic flow, technological equipment, technological characteristics

Одержано (Received) 16.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 25.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024