

УДК 621.9.048.4

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2025.55.50-62>

**О. Ф. Сіса**, доц., канд. техн. наук, **В. М. Боков**, проф., канд. техн. наук, **В. Я. Мірзак**, доц., канд. техн. наук, **Д.С. Тупаленко**, здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, **О. С. Довжук**, здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти *Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*  
e-mail: [sisaoleh@gmail.com](mailto:sisaoleh@gmail.com)

## Технологія групового виготовлення квадратних зразків із ливарної високоміцної сталі 110Г13Л для фізико-механічних випробувань

Запропоновано прогресивну технологію групового виготовлення квадратних зразків із ливарної високоміцної сталі 110Г13Л для фізико-механічних випробувань за рахунок використання для одночасного їх формоутворення способу розмірної обробки електричною дугою в поперечному гідравлічному потоці робочої рідини в умовах прямого прокачування рідини крізь технологічні отвори 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 групової РОД зразків, порівняно з послідовною електроімпульсною обробкою, дозволяє збільшити продуктивність обробки у 12 – 15 разів.

**сталь 110Г13Л, електрична дуга, гідродинамічний потік, технологічна схема групового формоутворення квадратних зразків, технологічні характеристики**

**Постановка проблеми.** Відомо, що робочі елементи гірничодобувного та збагачувального обладнання являють собою зносостійкі вироби, що працюють під високими питомими знакозмінними навантаженнями, а тому виготовляються із високо-марганцевої аустенітної ливарної сталі 110Г13Л. Дана сталь, як відомо [1, 2, 3], характеризується тим, що її висока зносостійкість поєднується з високим значенням міцності, пластичності та ударної в'язкості. Але оскільки зносостійкість виробу залежить від якості відливу, до кожного виробу завод-виробник додає зразок  $20 \times 20 \times 100$  мм із цієї ж сталі для фізико-механічних випробувань.

Виготовлення стрижневих зразків із ливарної сталі 110Г13Л пов'язано з певними технічними складностями. Заготовкою для виготовлення стрижневих зразків є відливок.

Механічне розрізування відливу може здійснюється твердосплавним інструментом спочатку на пластини товщиною 20 мм, а далі кожну пластину розрізують на стрижневі зразки шириною теж 20 мм. В процесі різання твердосплавний інструмент взаємодіє з в'язкою та твердою сталлю 110Г13Л, внаслідок чого виникають велике тертя сталі об інструмент та великі зусилля різання. Крім того, кожен зуб твердосплавної відрізної дискової фрези працює на удар, що приводить до руйнування твердого сплаву. Фреза виходить із ладу та потребує подальшого ремонту або заміни. Не випадково дану сталь відносять до важкооброблюваних різанням матеріалів [4].

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 [5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ефективність застосування будь-якого способу електроерозійної обробки в першу чергу визначається продуктивністю обробки.

При реалізації електроіскрової обробки [5] 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 [6, 7] 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 ( $\gamma_l < 1\%$ ).

При реалізації способу розмірна обробка електричною дугою (РОД) [7, 8, 9], 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, яка при технологічному струмі 800 А складає 25 000  $\text{мм}^3/\text{хв}$  [6, 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 [10] показано, що 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.

Якщо використати спосіб РОД для одночасного формування групи квадратних стрижнів (наприклад, чотирьох) із ливарної сталі 110Г13Л, то ефективність обробки значно підвищиться за рахунок зменшення кількості налагоджень до одиниці.

Однак, процес РОД групи квадратних стрижнів, до якого відносяться зразки із ливарної сталі 110Г13Л, не був об'єктом дослідження, а тому невідомі: технологічна схема формоутворення, що забезпечує оптимальний гідродинамічний режим робочої рідини на усіх етапах їх обробки; ефективні електричний та гідродинамічний режими керування технологічними характеристиками обробки, що стримує його технологічні можливості.

**Постановка завдання.** Як бачимо, для того, щоб мати можливість керувати процесом РОД групи 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 групи квадратних стрижнів із ливарної сталі 110Г13Л.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- запропонувати нову технологічну схему формоутворення способом РОД групи квадратних стрижнів;

- отримати математичні моделі продуктивності обробки  $M$ , питомої продуктивності обробки  $M_a$ , питомої витрати електроенергії  $a$ , шорсткості обробленої поверхні

$Ra$ , бічного міжелектродного зазора  $\delta$  та відносного лінійного зносу електрода-інструмента  $\gamma_n$ .

**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 на електроді-інструменті. В роботі застосовувалося багатофакторне планування експерименту, зокрема план  $2^{4+1}$ , який передбачає проведення 8 основних дослідів та 4 дослідів 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 групи квадратних стрижнів

Фактори		$I$ , А	$P_{ст}$ , МПа	$F$ , мм <sup>2</sup>	$h$ , мм	Технологічні характеристики							
Основний рівень ( $X_{i0}$ )		200	1,2	3821	12,5	$M$ , мм <sup>3</sup> /хв	$M_{ав}$ , мм <sup>3</sup> /А·хв	$a$ , кВт·год кг	$Ra$ , мкм	$\delta$ , мм	$\gamma_n$ , %		
Інтервал варіювання ( $\Delta X_i$ )		100	0,4	1859	7,5								
Верхній рівень ( $x_i = +1$ )		300	1,6	5680	20								
Нижній рівень ( $x_i = -1$ )		100	0,8	1962	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	+	+	+	+	5750	19,17	2,29	16	0,175	1,66
	2		2	-	+	+	-	1190	11,90	4,81	6,3	0,10	1,20
	3		7	+	-	+	-	6514	21,71	2,64	25	0,10	1,85
	4		1	-	-	+	+	1555	15,55	3,69	9,7	0,20	1,28
	5		3	+	+	-	-	6482	21,61	2,65	19,5	0,075	1,50
	6		4	-	+	-	+	2764	27,64	2,10	8	0,15	1,70
	7		6	+	-	-	+	8142	27,14	2,11	30	0,19	1,12
	8		5	-	-	-	-	2178	21,78	2,54	10	0,10	1,55
Досліди у центрі плану		1	0	0	0	0	3991	19,95	2,87	16	0,135	1,45	
		2	0	0	0	0	4322	21,61	2,65	17	0,135	1,48	
		3	0	0	0	0	4297	21,48	2,66	15	0,135	1,40	
		4	0	0	0	0	4312	21,56	2,65	22	0,136	1,41	

Джерело: розроблено авторами

Інші параметри процесу РОД групи 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 групи 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 одночасного формоутворення чотирьох квадратних стержневих зразків способом РОД пояснюється за допомогою креслення експериментального пристрою (рис. 2).

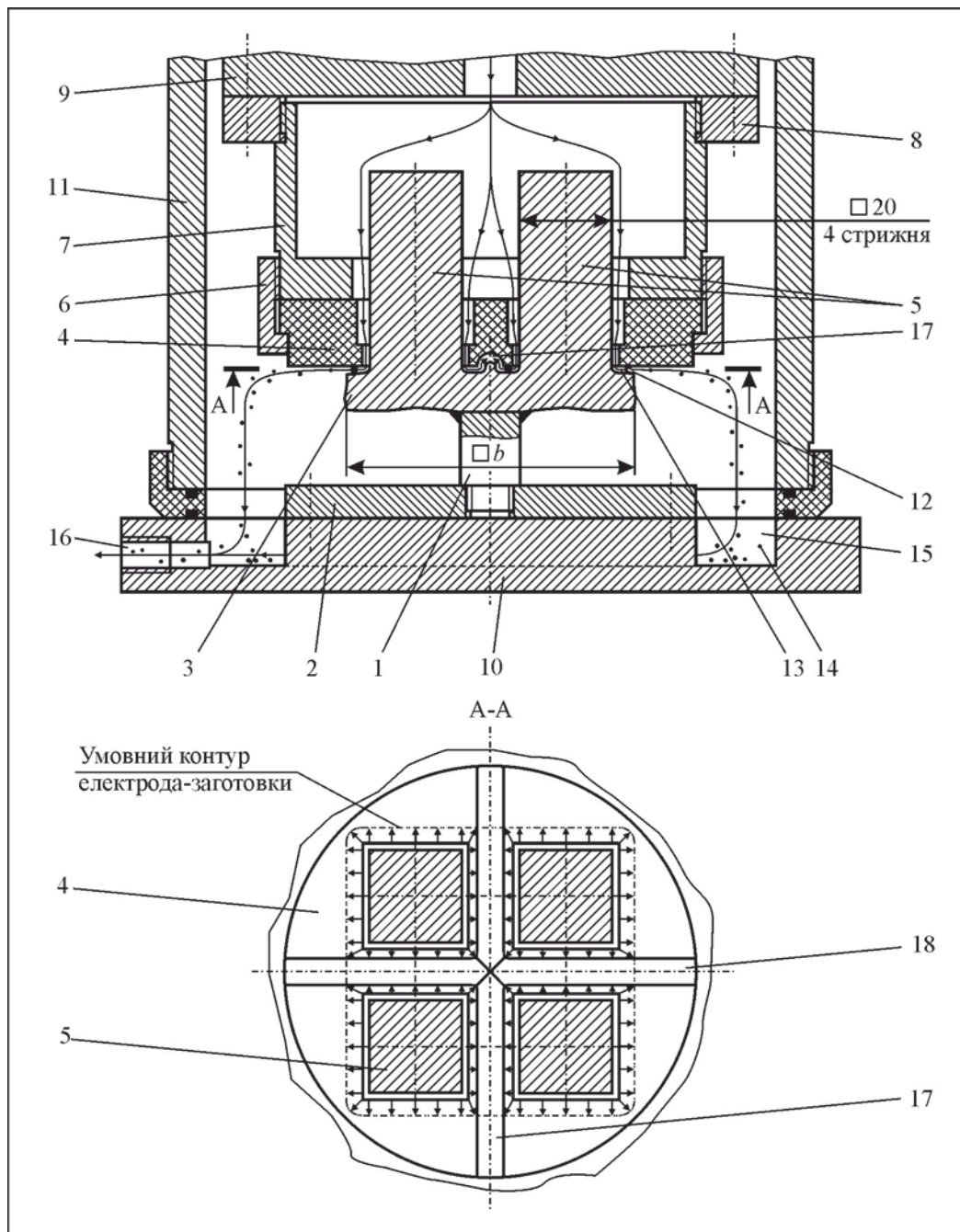


Рисунок 2 – Креслення експериментального пристрою

Джерело: розроблено авторами

Пристрій включає в себе основні деталі:

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

- електрод-інструмент 4 круглої зовнішньої форми з чотирма квадратними отворами для одночасного формоутворення чотирьох квадратних зразків-стрижнів 5, який кріпиться накидною гайкою 6 на електродотримачі 7;
- тримач 8 для закріплення електродотримача 7 разом з електродом-інструментом 4 на шпindelній плиті 9 верстата;
- плита 10 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 9 піднімають вгору за допомогою гідроприводу (на рис 2 не показано). На шпindelній плиті 9 закріплюють тримач 8 разом з електродотримачем 6 та електродом-інструментом 4 (рухома частина), а на плиті 10 закріплюють фланець 2 разом зі стрижнем 1 та електродом-заготовкою 3, з урахуванням центрування останніх. Далі опускають камеру 11 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 9. Реалізується пряме прокачування. Вмикають технологічний струм та ведуть обробку електрода-заготовки 3 з одночасним формоутворенням чотирьох квадратних зразків-стрижнів 5. При цьому електрична дуга 12 горить в торцевому міжелектродному зазорі 13 в потужному гідродинамічному потоці робочої рідини, а продукти ерозії 14, що утворюються при РОД, інтенсивно уносяться із зони обробки спочатку у кільцеву порожнину 15 у плиті 9, і далі вилучаються із неї разом з відпрацьованою робочою рідиною через отвір 16 у фільтр та в бак станції робочої рідини верстата (на рис. 2 не показано).

Проблемним питанням одночасного формоутворення чотирьох квадратних зразків-стрижнів є утворення в початковій фазі обробки в геометричному центрі торцевого міжелектродного зазора «застійної» зони, де, завдяки зустрічним потокам, швидкість робочої рідини різко зменшується, а в деяких точках досягає нульового рівня. В цій зоні горять не стиснуті електричні дуги, які за технологічними властивостями ближче до зварювальних, а тому не можуть вести розмірну обробку. Внаслідок цього в торцевому зазорі на ділянках, що відповідають застійним зонам, накопичуються продукти ерозії, виникають короткі замикання, підвищується шорсткість обробленої поверхні, а продуктивність обробки суттєво зменшується. Процес дестабілізується і може зовсім припинитися.

З метою усунення вказаного недоліку, технологічна схема одночасного формоутворення чотирьох квадратних стрижнів, що пропонується, передбачає наявність на торцевій поверхні електрода-інструмента двох взаємно перпендикулярних щілин 17, 18, через які вилучається робоча рідина разом з продуктами ерозії із торцевого міжелектродного зазора без утворення «застійної» зони в початковій фазі обробки, так як зустрічних потоків немає. Після заглиблення обробки на величину більшою глибини щілин, гідродинамічний режим стабілізується, а невелика (локальна) «застійна» зона, що утворюється в центрі між стрижнями вище площини обробки, практично вже не впливає ні на стабільність, ні на якість обробленої поверхні.

Слід відмітити, що варіювання площі обробки  $F$  здійснювалося за рахунок зміни розміру  $b$  квадратного електрода-заготовки 4. Так, площі обробки  $F_{\max} = 5680 \text{ мм}^2$  відповідає  $b_{\max} = 185 \text{ мм}$ ;  $F_{\text{сер}} = 3821 \text{ мм}^2 - b_{\text{сер}} = 73 \text{ мм}$ ;  $F_{\min} = 1962 \text{ мм}^2 - b_{\min} = 60 \text{ мм}$ .

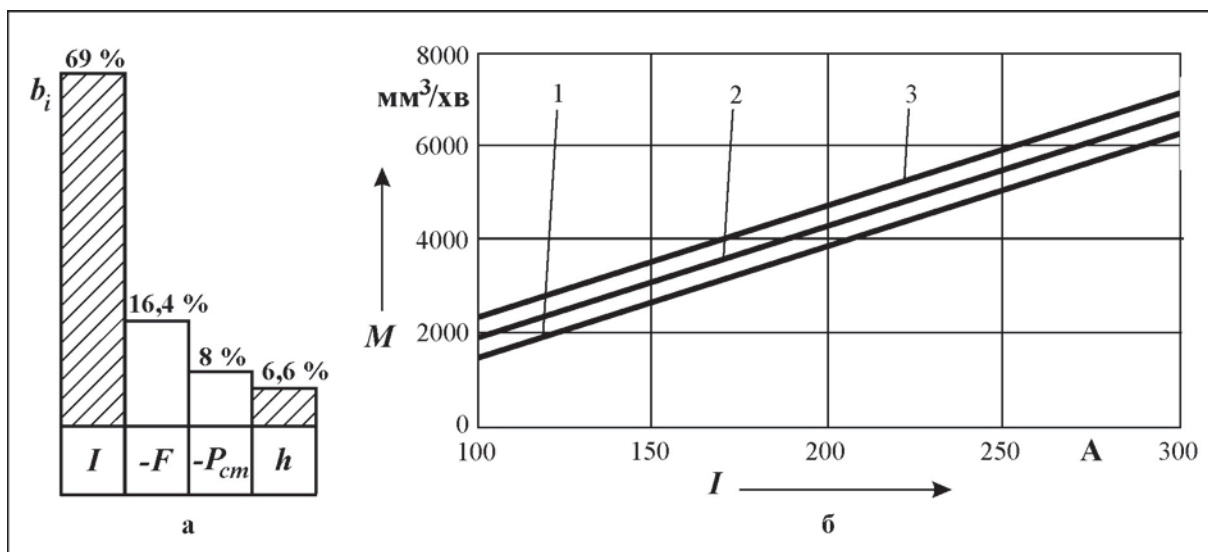
**Виклад основного матеріалу.** При будівництві математичних моделей технологічних характеристик процесу одночасної РОД чотирьох квадратних стрижневих зразків із ливарної сталі 110Г13Л виходили із того, що значення факторів у кодовому ( $x_i$ ) та натуральному ( $X_i$ ) масштабах зв'язані співвідношеннями:

$$x_1 = \frac{X_1 - 200}{100}; \quad (1) \quad x_2 = \frac{X_2 - 1,2}{0,4}; \quad (2) \quad x_3 = \frac{X_3 - 3821}{1859}; \quad (3) \quad x_4 = \frac{X_4 - 12,5}{7,5}. \quad (4)$$

Отримано математичну модель продуктивності обробки  $M$  (5)

$$y_1 = 4322 + 2400x_1 - 275x_2 - 570x_3 - 231x_4. \quad (5)$$

Як бачимо (рис. 3, а), найбільш впливає на продуктивність обробки  $M$  сила технологічного струму  $I$ : ступінь впливу складає 69 %. Із підвищенням силу струму продуктивність підвищується. Останнє підтверджує теплову природу процесу РОД. Саме тому, силу струму можна розглядати як головний керуючий фактор.



$$1 - F = 5680 \text{ мм}^2; \quad 2 - F = 3821 \text{ мм}^2; \quad 3 - F = 1962 \text{ мм}^2$$

Рисунок 3 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність продуктивності обробки  $M$  від  $I$  та  $F$  ( $P_{cm} = 1,2 \text{ МПа}$ ;  $h = 12,5 \text{ мм}$ ) (б)

Джерело: розроблено авторами

Вплив на продуктивність площі обробки  $F$  приблизно у чотири рази менший та складає 16,4 %. Із підвищенням  $F$  збільшується імовірність вторинного диспергування продуктів ерозії в торцевому міжелектродному зазорі, саме тому продуктивність обробки зменшується.

Вплив на продуктивність обробки  $M$  статичного тиску робочої рідини на вході в міжелектродний зазор  $P_{cm}$  складає 8 % та теж негативний: із підвищенням  $P_{cm}$  об'єм одиночної лунки, а отже продуктивність обробки, зменшуються.

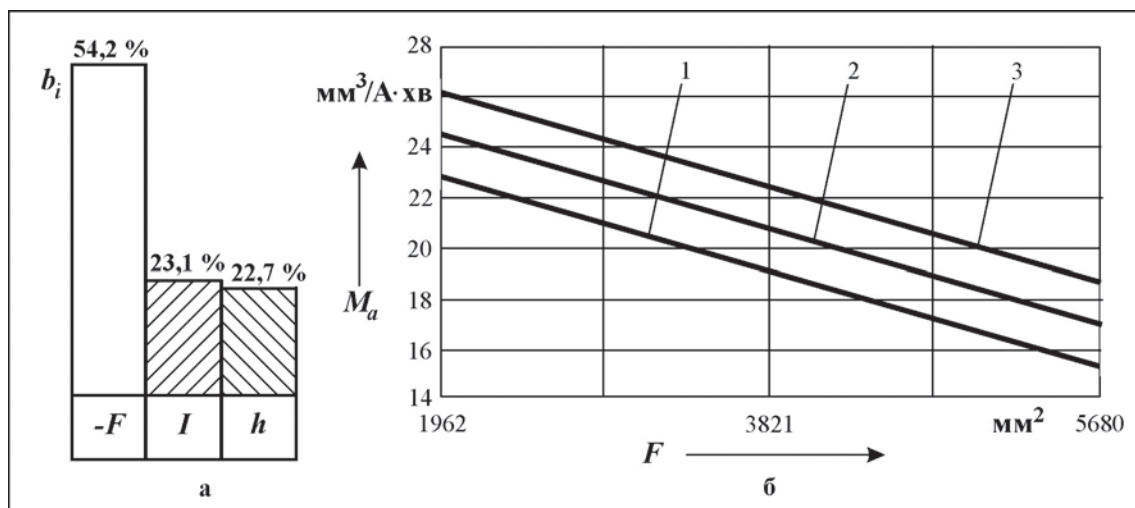
Вплив на продуктивність обробки висоти пояска на електроді-інструменті  $h$  позитивний та складає 6,6 %. Із підвищенням  $h$  підвищується гідравлічний опір течії робочої рідини в міжелектродному зазорі, внаслідок чого швидкість рідини та її вплив на електричну дугу зменшуються, а продуктивність зростає.

На рис. 3, б представлена графічна залежність продуктивності обробки  $M$  від сили технологічного струму  $I$  та площі обробки  $F$ . В рамках експерименту продуктивність обробки групи стрижневих зразків змінювалася у межах від 1190  $\text{мм}^3/\text{хв}$  до 8142  $\text{мм}^3/\text{хв}$ , що перевищує продуктивність електроімпульсної обробки у 12-15 разів.

Отримано математичну модель питомої продуктивності обробки  $M_a$  (6):

$$y_2 = 20,81 + 1,59x_1 - 3,73x_3 + 1,56x_4. \quad (6)$$

Як бачимо, на питому продуктивність обробки  $M_a$  значно впливає площа обробки  $F$ . Із підвищенням площі обробки питома продуктивність зменшується. Вплив складає 54,2 % (рис. 4, а). Саме тому, площу обробки  $F$  можна розглядати як головний керуючий фактор. Суттєва залежність питомої продуктивності обробки від площі обробки пояснюється тим, що з її підвищенням підвищується довжина траси евакуації продуктів ерозії із зони обробки та збільшується імовірність вторинного диспергування продуктів ерозії в ній. А цей процес потребує енергії, що негативно впливає на питому продуктивність обробки.



1 –  $I = 100$  А; 2 –  $I = 200$  А; 3 –  $I = 300$  А

Рисунок 4 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність питомої продуктивності обробки  $M_a$  від  $F$  та  $I$  ( $h = 12,5$  мм) (б)

Джерело: розроблено авторами

Вплив на питому продуктивність обробки  $M_a$  сили струму  $I$  та висоти пояса на електроді-інструменті  $h$  приблизно однаковий і складає, відповідно, 23,1 % та 22,7 %. менший, але суттєвий, і складає 24,9 %. З їх збільшенням питома продуктивність обробки збільшується.

Виявлено, що статичний тиск робочої рідини  $P_{cm}$  у вибраному діапазоні варіювання факторів на питому продуктивність обробки не впливає. Найменш впливає на питому продуктивність обробки  $M_a$  сила технологічного струму. Тому фактор  $P_{cm}$  вилучено із моделі (6).

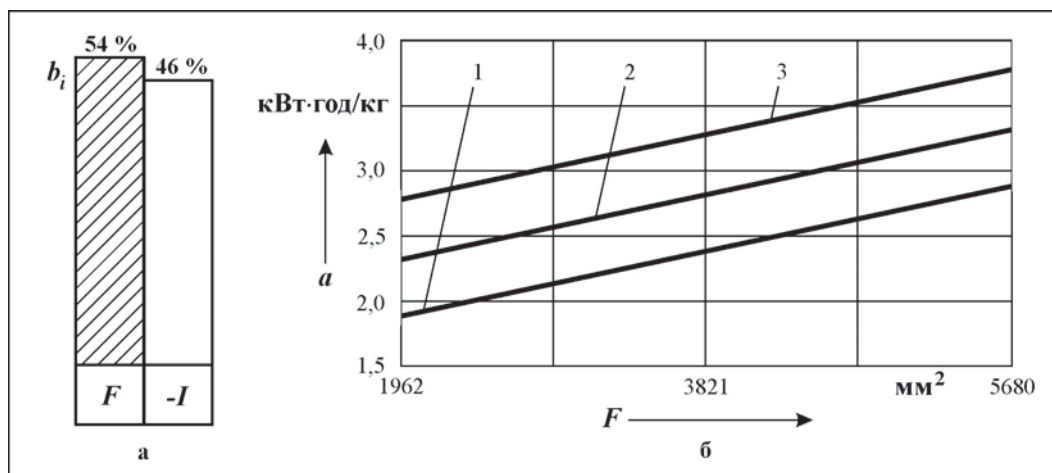
На рис. 4, б, представлена графічна залежність питомої продуктивності обробки  $M_a$  від двох найбільш впливових факторів: площі обробки  $F$  та сили струму  $I$ . В рамках експерименту питома продуктивність обробки групи стрижневих зразків змінювалася у межах від 15,55  $\text{мм}^3/\text{А}\cdot\text{хв}$  до 27,64  $\text{мм}^3/\text{А}\cdot\text{хв}$ , що перевищує питому продуктивність електроімпульсної обробки у 1,5–2 рази.

Отримано математичну модель питомої витрати електроенергії  $a$  (7):

$$y_3 = 2,85 - 0,431x_1 + 0,504x_3. \quad (7)$$

Як бачимо, на питому витрату електроенергії суттєво впливають два фактори: площа обробки  $F$  (ступінь впливу 54 %) та сила струму  $I$  (ступінь впливу 46 %). Із підвищенням площі обробки питома витрата електроенергії збільшується, а із підвищенням сили струму – зменшується. (рис. 5,а). Але за головний керуючий фактор

треба вибрати силу струму, так як керувати площею обробки незручно, а в більшості випадків неможливо: її треба тільки враховувати.



1 –  $I = 300$  А; 2 –  $I = 200$  А; 3 –  $I = 100$  А

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

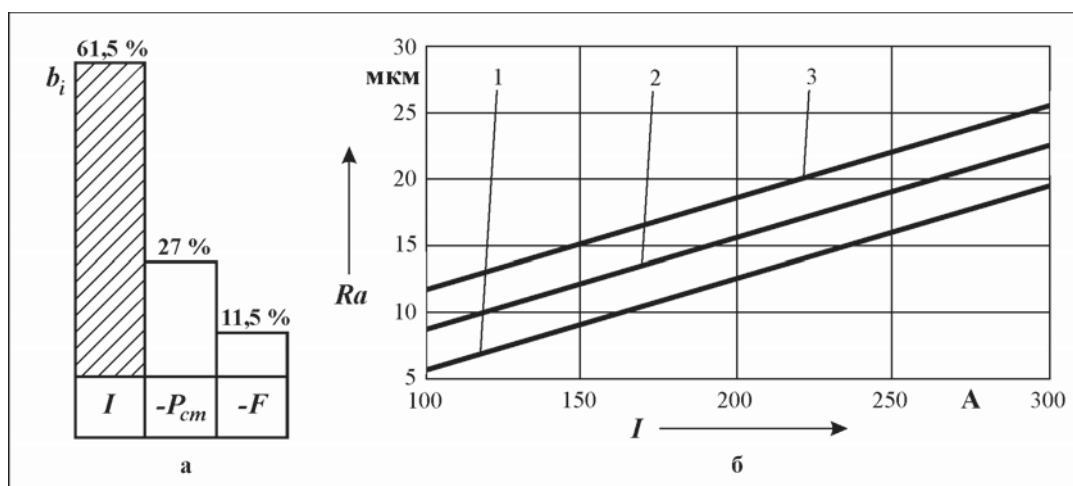
Джерело: розроблено авторами

На рис. 5, б, представлена графічна залежність питомої витрати електроенергії  $a$  від площі обробки  $F$  та сили струму  $I$ . В рамках експерименту питома витрата електроенергії обробки групи стрижневих зразків змінювалася у межах від 2,10 кВт·год/кг до 4,81 кВт·год/кг, що не перевищує питому витрату електроенергії електроімпульсної обробки.

Отримано математичну модель шорсткості обробленої поверхні  $Ra$  (8):

$$y_4 = 15,56 + 7,06x_1 - 3,11x_2 - 1,31x_3. \quad (8)$$

Як бачимо (рис. 6, а), найбільш впливає на шорсткість обробленої поверхні  $Ra$  сила технологічного струму  $I$ : ступінь впливу складає 61,5 %.



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  $P_{cm}$  ( $F = 1916$  мм<sup>2</sup>) (б)

Джерело: розроблено авторами

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 [8, 9]. 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 27 %. 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  $P_{cm}$ .

Ступінь впливу на шорсткість обробленої бічної поверхні зразка площі обробки  $F$  ще менша і складає 11,5 %.

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 групової РОД змінювалася у межах від  $Ra$  6,3 мкм до  $Ra$  30 мкм. Оскільки отримані зразки для металографічних досліджень подальше оброблюються (розрізаються, шліфуються та поліруються), отримана після РОД шорсткість є задовільною.

Отримано математичну модель бічного міжелектродного зазора  $\delta$  (9):

$$y_5 = 0,1362 + 0,0509x_4. \quad (9)$$

Як бачимо, в умовах експерименту фактори  $I$ ,  $P_{cm}$  та  $F$  не впливають на  $\delta$ . Бічний міжелектродний зазор повністю (ступінь впливу 100 %) визначається висотою пояска на електроді-інструменті  $h$  (рис. 7). Із підвищенням  $h$  зазор  $\delta$  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 [10], відповідає більша довжина стовпа дуги, а отже більший міжелектродний зазор.

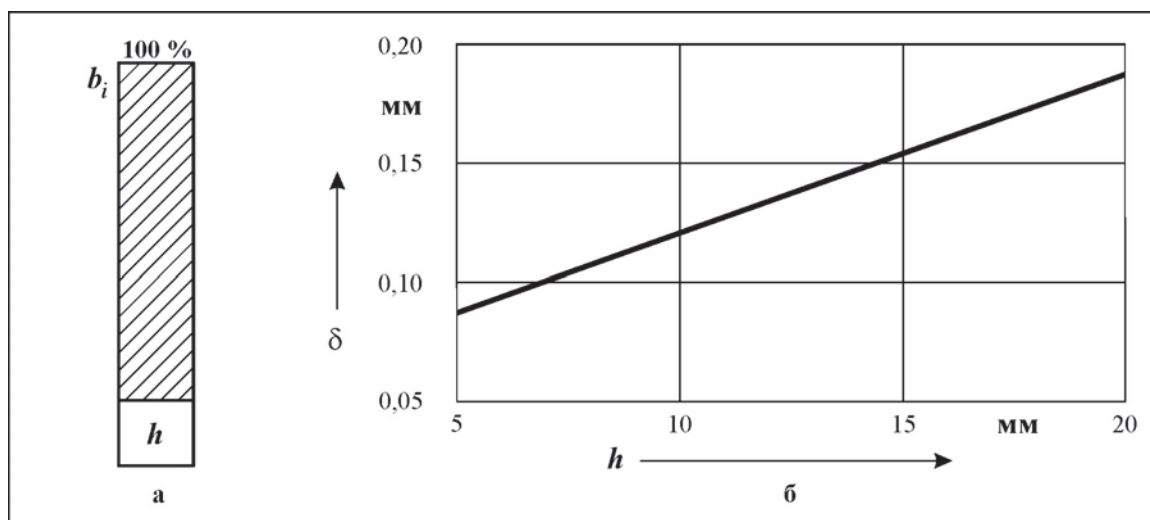


Рисунок 7 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність бічного міжелектродного зазора  $\delta$  від висоти пояска на електроді-інструменті  $h$  (б)

Джерело: розроблено авторами

В рамках експерименту бічний міжелектродний зазор при РОД зразка змінювався у межах від 0,10 мм до 0,175 мм. Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні електродів-інструментів для реалізації процесу РОД групи квадратних зразків із ливарної сталі 110Г13Л.

Приклад групи стрижневих квадратних зразків, що отримані способом РОД з однієї заготовки шляхом одночасного формоутворення, показано на рис. 8.

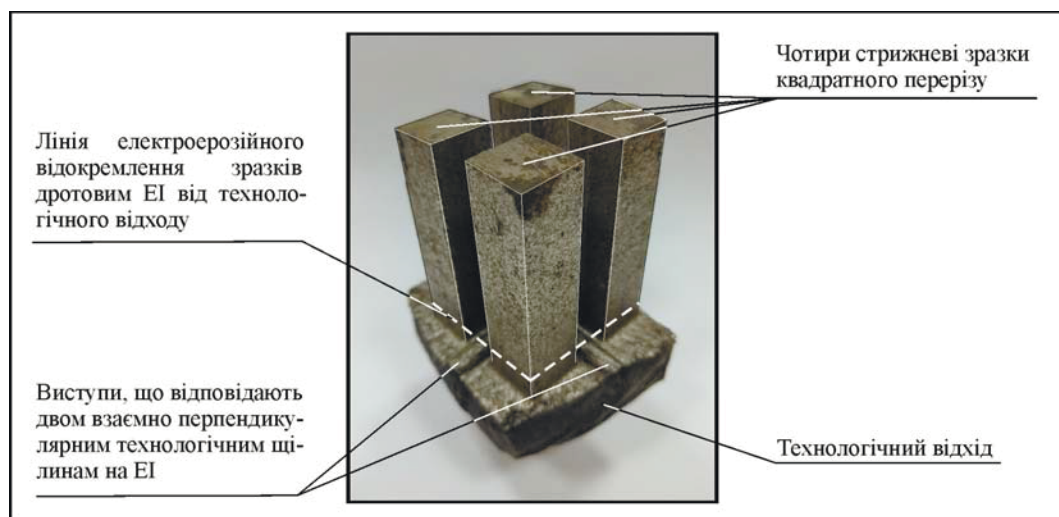


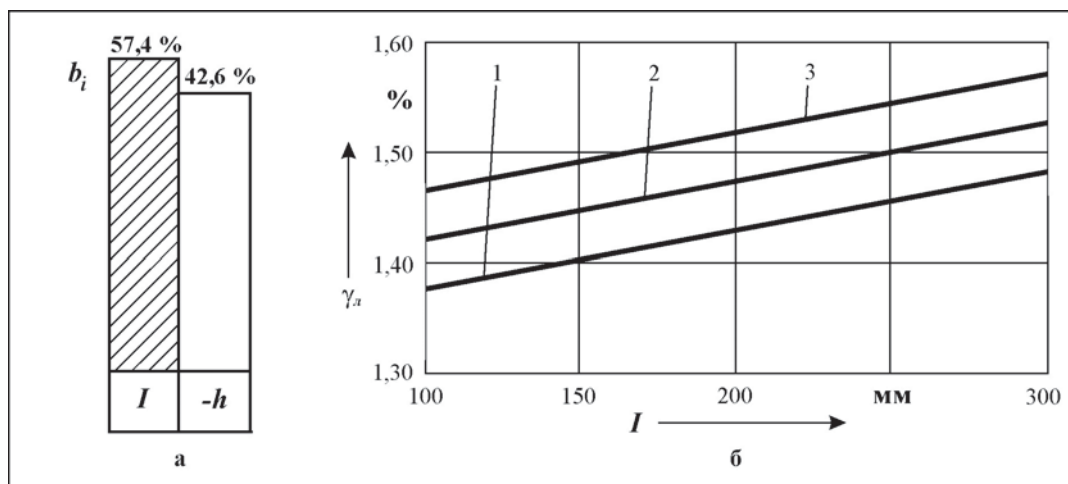
Рисунок 8 – Чотири стрижневі зразки із ливарної сталі 110Г13Л після РОД

Джерело: розроблено авторами

Отримано математичну модель відносного лінійного зносу графітового електрода-інструмента  $\gamma_L$  (10):

$$y_5 = 1,48 + 0,0565x_1 - 0,042x_4. \quad (10)$$

За результатами досліджень, ступінь впливу на знос  $\gamma_L$  сили струму  $I$  складає 57,4 % (рис. 9). Отже, фактор  $I$  є головним, керуючим.



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

Рисунок 9 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність відносного лінійного зносу графітового електрода-інструмента  $\gamma$  від  $I$  та  $h$  (б)

Джерело: розроблено авторами

Вплив величини пояска  $h$  на електроді-інструменті на відносний лінійний знос графітового електрода-інструмента також вагомий та складає 42,5 %. Виявлено, що інші фактори (статичний тиск робочої рідини на вході в між електродний зазор  $P_{cm}$  та площа обробки  $F$ ) на знос не впливають.

В рамках експерименту відносний лінійний знос електрода-інструмента змінювався у вузькому діапазоні, а саме в межах від 1,12 % до 1,85 %. Результати дослідження можуть бути використані при оптимізації режиму процесу РОД квадратних зразків із ливарної сталі 110Г13Л.

Отримані моделі технологічних характеристик дозволили оптимізувати режим РОД групи (чотири) 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 <sup>2</sup>	$h$ , мм	$M$ , мм <sup>3</sup> /хв	$M_a$ , мм <sup>3</sup> /А·хв	$a$ , кВт·год/кг	$Ra$ , мкм	$\delta$ , мм	$\gamma_p$ , %
300	0,8	1962	5	8142	27,14	2,11	30	0,10	1,12

Джерело: розроблено авторами

Як бачимо, найбільша продуктивність РОД зразків  $M$  складає 8142 мм<sup>3</sup>/хв, що відповідає швидкості обробки  $V = 4,1$  мм/хв. В той же час, швидкість електроімпульсної обробки, принаймні, на порядок нижча. Таким чином, спосіб РОД дозволяє одночасно обробити чотири квадратних зразка  $20 \times 20$  мм, висотою 100 мм із ливарної сталі 110Г13Л за 24,4 хв.

**Висновки.** Запропоновано прогресивну технологію групового виготовлення квадратних зразків із ливарної високоміцної сталі 110Г13Л для фізико-механічних 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 групової РОД зразків, порівняно з послідовною електроімпульсною обробкою, дозволяє збільшити продуктивність обробки у 12 – 15 разів.

## Список літератури

1. Бугай Л. А. Зниження трудомісткості механічної обробки продукції з високомарганцевих сталей. *Гірничий вісник: зб. наук. праць. Кривий Ріг*, 2023. Вип.111. С. 83–89.
2. Сіса О. Ф., Носуленко В. І. Альтернативний спосіб обробки високоміцних зносостійких матеріалів. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. Кременчук: КДПУ, 2005. Вип.6. С. 136–138.
3. Узлов К. І. 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, *Теорія і практика металургії: заг. держ. наук. журн. Дніпро*, 2018. №3–5. С. 56–59.
4. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П.Мазур та ін.; під заг. ред. М.П.Мазура. 2-е вид. перероб. і доп. Львів : Новий світ 2000, 2001. С.422.
5. 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.* 2023,7, 204. <https://doi.org/10.3390/jmmp7060204>.

6. 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.
7. 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, 3(1), pp. 96–125. <https://doi.org/10.3390/alloys3010006>.
8. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою. Кіровоград : Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2002. 300 с.
9. Боков В. М., Сіса О. Ф. Оброблюваність матеріалів електричною дугою . Кіровоград : Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2013. 172 с.
10. 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 labor intensity of mechanical processing of products from high-manganese steels. *Hirnychu visnyk*, 111, 83–89 [in Ukrainian].
2. Sisa, O. F. & Nosulenko, V. I. (2005). Alternative method of processing high-strength wear-resistant materials. *Visnyk Kremenchuts'koho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu*, 6, 136–138 [in Ukrainian].
3. Uzlov, K. I., Movchan, O. M., Chernysh, T. O. & Sapunov, Yu. M. (2018). Analysis of regulatory requirements for VM-steel and development of a method for microstructural control of its grain boundary characteristics. *Teoriya i praktyka metalurhiyi*, 3–5, 56–59 [in Ukrainian].
4. Mazur, M. P., Vnukov, Yu. M., Dobroskok, V. L., Zaloga, V. O., Novosyolov, Yu. K., Yakubov, F. Ya., & M.P. Mazur (Ed.) (2000). Fundamentals of the theory of cutting materials. (2th ed.). Lviv: Novyy svit 2000 [in Ukrainian].
5. 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].
6. 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].
7. 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].
8. Bokov, V. M. (2002). *Rozmirne formoutvorennia poverkhon elektrychnoiu duhoiu [Dimensional shaping of surfaces by an electric arc]*. Kirovohrad: Polihrafichno-vydavnychiy tsentr TOV «Imeks LTD» [in Ukrainian].
9. 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].
10. Nosulenko, V. I. (1999). Rozmirna obrobka metaliv elektrychnoiu duhoiu [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., **Victor Bokov**, Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Mirzak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Denys Tupalenko**, postgraduate, **Olexandr Dovzhuk**, postgraduate  
*Central Ukraine National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### Technology of Group Production of Square Samples from High-Strength Casting Steel 110G13L for Physical and Mechanical Tests

The working elements of mining and enrichment equipment are wear-resistant products that operate under high specific alternating loads, and therefore are made of high-manganese austenitic casting steel 110G13L. But since the wear resistance of the product depends on the quality of the casting, the manufacturer adds  $20 \times 20 \times 100$  mm samples of the same steel to each product for physical and mechanical tests.

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

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. During the machining 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 machining 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 machining process. If the DMA method is used to simultaneously form a group of square rods (for example, four) from 110G13L cast steel, the machining efficiency will significantly increase by reducing the number of setups to one. However, the process of DMA of square rods, to which samples from cast steel 110G13L 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 relationships between the factors determining the processing mode and the initial technological characteristics.

The purpose of the study is to build mathematical models of the technological characteristics of the DMA process of a group of square rods made of 110G13L cast steel.

The paper proposes a new technological scheme for forming a group of square rods by the method of DMA, which provides pumping of the working fluid in the end interelectrode gap without the formation of a "stagnant" zone, which allows stabilizing the processing process. Mathematical models of the process of group DMA of samples have been obtained, 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 the technology of group DMA of rod samples, compared with sequential electric pulse processing, allows increasing the processing productivity by 12-15 times.

**steel 110G13L, electric arc, hydrodynamic flow, technological scheme of group forming of square samples, technological characteristics**

*Одержано (Received) 05.12.2025*

*Прорецензовано (Reviewed) 17.12.2025*

*Прийнято до друку (Approved) 23.12.2025*