

## Список літератури

1. Гутаревич Ю.Ф. Екологія та автомобільний транспорт : Навчальний посібник [Текст] / Гутаревич Ю.Ф., Зеркалов Д.З., Говорун А.Г. — К. : Арістей, 2006. – 292 с.
2. Коробкин В.И. Экология : учебник для студентов бакалаврской ступени многоуровневого высшего профессионального образования [Текст] / Коробкин В.И., Передельский Л.В. – Изд. 18-е, доп и перераб. – Ростов н/Д : Феникс, 2012. – 601 с.
3. Джигерей В.С. Екологія та охорона навколишнього природного середовища [Текст] : Навчальний посібник / В.С. Джигерей. – 4-те вид., випр. 1 доп. – К.: Товариство «Знання», КОО, 2006. – 319 с.
4. Павлова Е.М. Экология транспорта : Учебник для вузов [Текст] / Е.М. Павлова. – М. : Транспорт, 2010. – 368 с.

**Oleg Bevz, Assos. Prof., PhD tech. sci., Sergiy Magopec, Assos. Prof., PhD tech. sci., Olexandr Matvienko, Assos. Prof., PhD tech. sci.**

*Kirovohrad national technical university, Kirovohrad, Ukraine*

### **Influence on the environment of busses БАЗ-22154 during exploitation on the different kinds of fuel**

Research directed on determination of question – as far as effective is the use of alternative types of fuel in the plan of improvement of atmosphere of city of Kirovohrada and leadthrough of estimation of ecological danger of bus during work on the different kinds of fuel.

During translation of bus on the compressed natural gas which an engine ecologically is little adjusted to, allows to reduce the ecological danger of the considered car in 1,8 times, and on the condensated oil gas in 1,1 times as compared to a base fuel.

Replacement of petroleum motor fuels gas is ecologically and economic justified. It is thus needed to consider the use of natural gas which is ecologically safe the most perspective direction.

**motor transport, contamination of air, ecological safety**

Одержано 28.10.15

**УДК 621.9.048.4**

**В.М. Боков, проф., канд. техн. наук**

*Кіровоградський національний технічний університет, м. Кіровоград, Україна,  
bokov\_vm@mail.ru*

## Електродугове фрезерування

Запропоновано та досліджено спосіб електродугового фрезерування, зокрема пазів. Обґрунтовано технологічну схему формоутворення. Отримано математичні моделі технологічних характеристик, які дозволяють керувати процесом та прогнозувати його.

**електрична дуга, гідродинамічний режим, графітовий електрод-інструмент складеної конструкції, додатковий потік, технологічні характеристики, математичні моделі**

**В. М. Боков, проф., канд. техн. наук**

*Кіровоградський національний технічний університет, г.Кіровоград, Україна*

**Электродуговое фрезерование**

Предложен и исследован способ электродугового фрезерования, в частности пазов. Обоснована технологическая схема формообразования. Получены математические модели технологических характеристик, которые позволяют управлять процессом и прогнозировать его.

**электрическая дуга, гидродинамический режим, графитовый электрод-инструмент сборной конструкции, дополнительный поток, технологические характеристики, математические модели**

© В.М. Боков, 2015

**Постановка проблеми.** В сучасному сільськогосподарському машинобудуванні для виготовлення порожнин кувальних штампів та прес-форм способом розмірної обробки дугою (РОД) застосовуються складні та дорогі індивідуальні (не універсальні) технологічні пристрої та спеціальні копіювально-прошивні верстати, що не завжди економічно задовольняє підприємство.

Створення універсальної технології та верстатів з ЧПК для автоматичного фрезерування порожнин з використанням простих за формою графітових електродів-інструментів (ЕІ) та універсальних верстатів, за думкою автора, може вирішити цю проблему.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Фактично, мова йде про створення універсального електроерозійного центра, що «фрезерує» порожнини за програмою.

В 1980 році одна із Японських фірм створила та експонувала його на виставці в Москві. Але в життя такий верстат не пішов. Головний недолік його – надто низька продуктивність обробки, так як процес супроводжується великими паузами (шпаруватість імпульсів завжди більше 1).

Відомо [1, 2], що при реалізації процесу розмірної обробки електричною дугою (РОД) пауз немає, а отже спостерігається найбільш можлива продуктивність обробки. Однак, даний спосіб обробки не використовувався для обробки порожнин за принципом фрезерування і не був об'єктом дослідження.

Дана робота – початок цього напрямку дослідження.

**Постановка завдання.** Мета дослідження – обґрунтування технологічної схеми формоутворення пазів електричною дугою та прогнозування технологічних характеристик електродугового фрезерування.

Поставлена мета реалізується шляхом вирішення наступних задач: аналіз технологічних схем формоутворення на предмет можливого використання для електродугового фрезерування пазів; експериментальне дослідження, математичне моделювання та аналіз технологічних характеристик електродугового фрезерування пазів.

**Виклад основного матеріалу.** З методичної точки зору, обґрунтування вибору певної технологічної схеми формоутворення пазів електричною дугою пов'язано з можливістю забезпечення протягом усього періоду фрезерування оптимального гідродинамічного режиму прокачування робочої рідини крізь міжелектродний зазор (МЕЗ), при якому в кожній точці зазору, де може бути збуджена дуга, швидкість потоку не повинна бути нижче певного критичного рівня, що відповідає розмірній обробці. Дана умова виключає можливість утворення великої різниці у швидкостях прокачування рідини на різних ділянках МЕЗ та можливість утворення «застійних» зон, де швидкість потоку наближається до нуля, що пов'язано з наявністю в МЕЗ зустрічних потоків. Крім того, для реалізації процесу електродугового фрезерування пазів без застосування герметичної камери запропоновано використання прямого способу прокачування робочої рідини крізь торцевий МЕЗ. Це суттєво спрощує конструкцію верстата за рахунок зменшення його металоємності та дозволить, в подальшому, автоматизувати процес фрезерування за рахунок використання систем з ЧПК.

Методика експериментального дослідження технологічних характеристик електродугового фрезерування передбачала вибір факторів, що впливають на процес електродугового фрезерування пазів. На підставі апріорної інформації були відібрані три фактора: сила технологічного струму  $I(X_1)$ , А; статичний тиск робочої рідини на вході потоку в МЕЗ  $P_{cm}(X_2)$ ; довжина пазу  $L(X_3)$  для моделювання впливу висоти буртика на графітовому електроді-інструменті (ЕІ).

Інші параметри процесу було зафіксовано на постійному рівні: напруга на електродах  $U = 30$  В; розміри перерізу пазу  $10 \times 25$  мм; робоча рідина – органічне

середовище; полярність обробки – зворотна; матеріал ЕІ – графіт МПГ-7; матеріал електрода-заготовки (ЕЗ) – сталь 45.

Усі вибрані фактори задовольняють умовам керованості та операціональності.

Досліджувалися такі технологічні характеристики електродугового фрезерування пазів, як продуктивність обробки  $M$ , питома продуктивність обробки  $M_a$ , середня швидкість обробки  $V$ , питома витрата електроенергії  $a$ , бічний міжелектродний зазор на виході потоку із торцевого МЕЗ  $\delta_b$  (вих) та відносний лінійний знос графітового ЕІ  $\gamma_l$ .

Для математичного моделювання технологічних характеристик електродугового фрезерування пазів реалізувався повний трифакторний експеримент [3]. Значення факторів на основному, верхньому та нижньому рівнях, а також результати дослідження технологічних характеристик наведено в матриці планування експерименту (табл. 1).

Таблиця 1 – Матриця планування експерименту (план  $2^3$ )

Фактори			$I$ , А	$P_{ем}$ , МПа	$L$ , мм	$M$ , мм <sup>3</sup> /хв	$M_a$ , мм <sup>3</sup> /А·хв	$V$ , мм/хв	$a$ , кВт·год кг	$\delta_b$ (вих), мм	$\gamma_l$ , %	
Основний рівень			75	0,6	5							
Інтервал варіювання			25	0,2	3							
Верхній рівень			100	0,8	8							
Нижній рівень			50	0,4	2							
Код			$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	
Номер досліду	1	Порядок реалізації	6	+	+	+	333	3,33	1,33	19,10	0,25	0,62
	2		2	-	+	+	167	3,34	0,65	19,58	0,15	1,25
	3		5	+	-	+	278	2,78	1,10	22,93	0,26	0,25
	4		1	-	-	+	154	3,08	0,60	20,93	0,16	1,12
	5		7	+	+	-	340	3,40	1,36	18,85	0,27	0,51
	6		8	-	+	-	175	3,50	0,70	18,33	0,16	1,10
	7		3	+	-	-	299	2,99	1,20	21,41	0,27	0,20
	8		4	-	-	-	155	3,10	0,62	20,64	0,17	0,10
Досліди у центрі плану		1	0	0	0	250	3,00	1,00	19,13	0,22	0,71	
		2	0	0	0	225	3,07	0,90	21,24	0,21	0,75	
		3	0	0	0	230	3,04	0,92	20,78	0,23	0,60	
		4	0	0	0	228	3,11	0,93	20,97	0,21	0,65	

Джерело: розроблено автором з використанням [3]

Для експериментальних досліджень спроектовано та виготовлено експериментальний пристрій (рис. 1). Пристрій включає в себе рухомий у вертикальному напрямку графітовий електрод-інструмент 1 та нерухому електрод-заготовку 2. ЕІ закріплено на шпинделі електроерозійного верстата «Дуга-8Г», що реалізує процес РОД, за допомогою тримача 3, а ЕЗ – на плиті 4 за допомогою тримача 5.

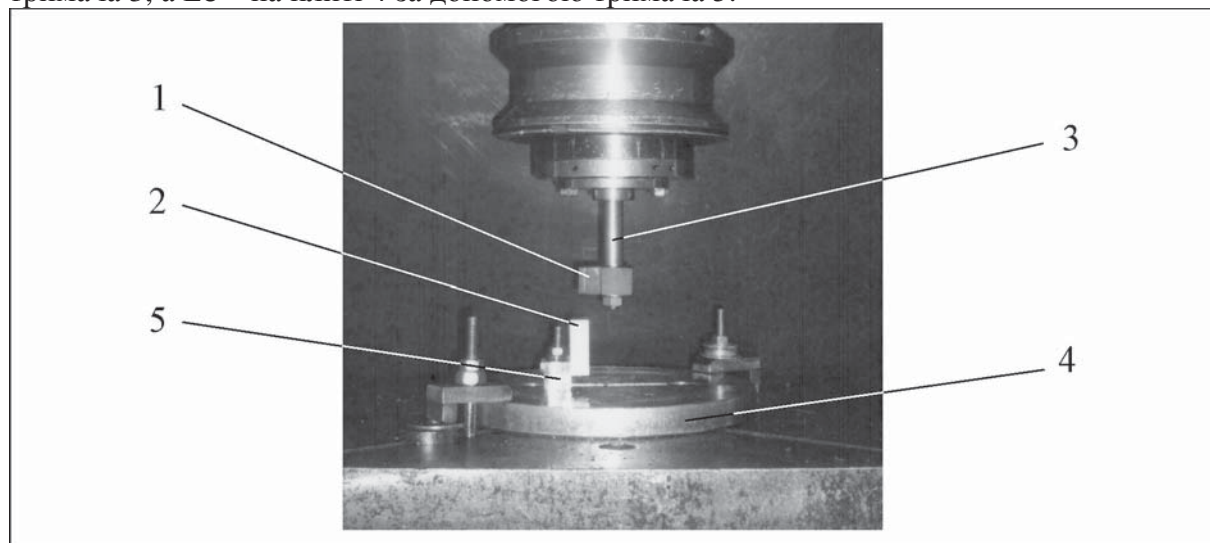
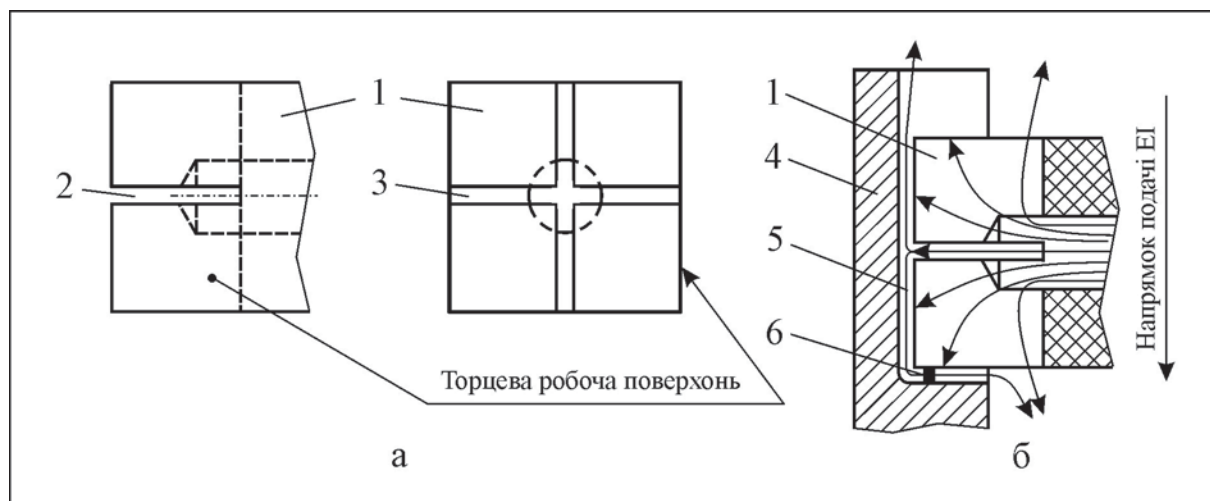


Рисунок 1 – Експериментальний пристрій

Джерело: розроблено автором

В роботі експериментально випробувано дві технологічні схеми формо-утворення пазу:

- схема 1 включала в себе використання графітового ЕІ 1 із поперечним щілинним каналом 2 на торцевій (робочій) поверхні ЕІ та хрестоподібними щілинними каналами 3 на бічній (не робочій) поверхні ЕІ (рис. 2).



а – схема розташування щілин на ЕІ; б – технологічна схема формоутворення; 1 – ЕІ; 2 – поперечна щілина; 3 – хрестоподібна щілина; 4 – ЕЗ; 5 – потік рідини; 6 – дуга

Рисунок 2 – Формоутворення пазу за схемою 1

*Джерело: розроблено автором*

Фрезерування пазу перерізом  $25 \times 10$  мм на глибину 13,5 мм здійснювали при наступному режимі обробки: сила струму  $I = 30 \dots 50$  А; напруга на електродах  $U = 40$  В; тиск робочої рідини на вході в міжелектродний зазор  $P = 1,3$  МПа; полярність обробки – пряма (ЕЗ – «плюс»); спосіб прокачування робочої рідини – зворотній крізь хрестоподібну щілину; матеріал ЕІ – електроерозійний графіт МПГ-7; матеріал ЕЗ – сталь 45.

Залежність зміни глибини обробки  $h$  в часі  $t$  представлено на рис. 3. Як бачимо, процес починався при малій силі струму ( $I = 30$  А) і здійснювався до глибини 0,9 мм. Він характеризується неусталеністю, а отже низькою швидкістю фрезерування ( $V = 0,3$  мм/хв). Останнє пов'язано з незадовільними умовами обробки, а саме з непаралельністю торцевих поверхонь електродів в початковий момент обробки та незадовільним гідродинамічним режимом рідини в зоні обробки, так як приблизно 80-87 % рідини вилучається із ЕІ поза зону обробки. Після усунення непаралельності торцевих поверхонь електродів процес трохи стабілізувався. Тому силу струму підвищили до 50 А. В процесі виконання експерименту було помічено, що при досяганні глибини 9,5 мм, яка відповідає рівню розташування поперечної щілини в ЕІ, швидкість обробки зростає до 0,9 мм/хв. без подальшого підвищення сили струму. Але процес фрезерування паза продовжувався на глибину лише до 13,5 мм та закінчився коротким замиканням.

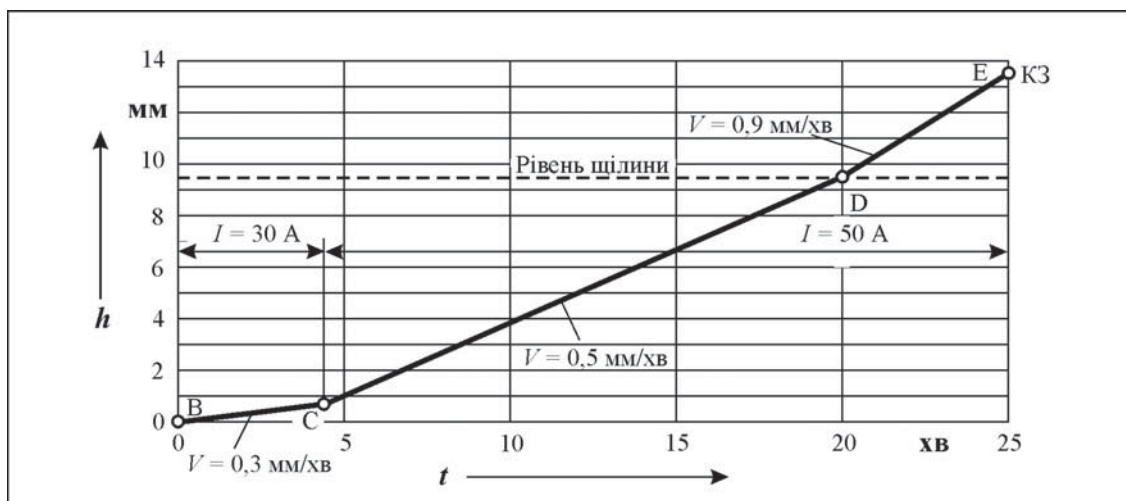
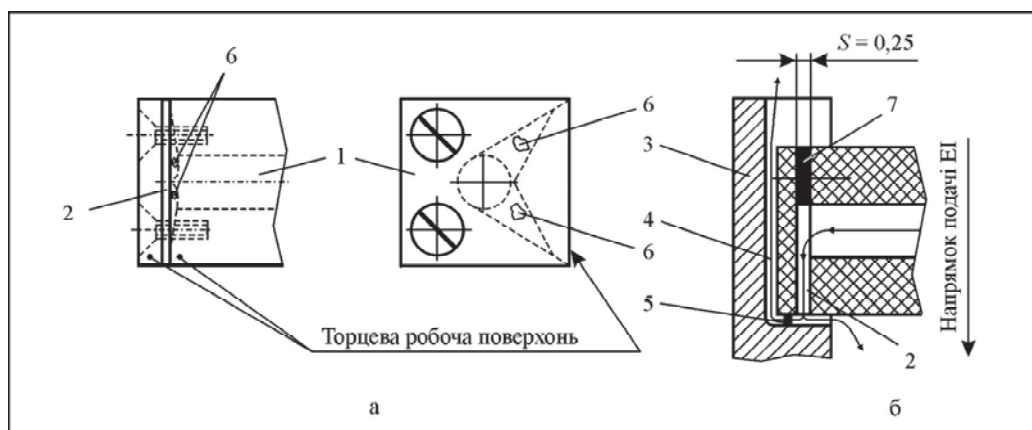


Рисунок 3 – Графічна залежність глибини електродугового фрезерування паза  $h$  від часу обробки  $t$   
 Джерело: розроблено автором



а – схема розташування поздовжньої щілини; б – технологічна схема формоутворення паза;  
 1 – складений ЕІ; 2 – поздовжня щілина; 3 – ЕЗ; 4 – потік рідини; 5 – дуга; 6 – кишеня; 7 – прокладка

Рисунок 4 – Формоутворення паза за схемою 2

Джерело: розроблено автором

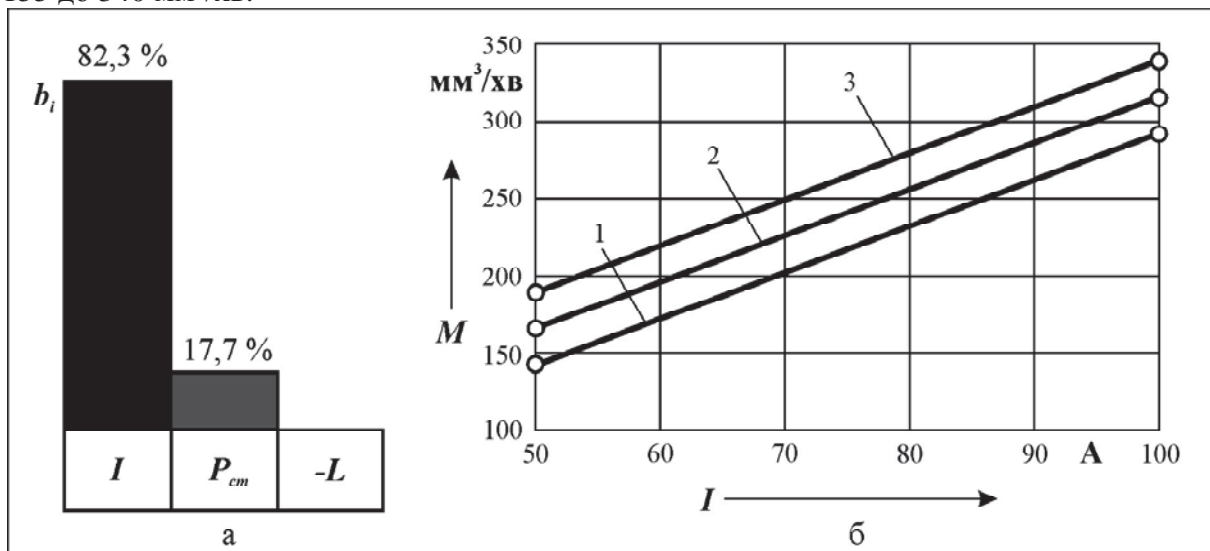
Отримані математичні моделі технологічних характеристик електродугового фрезерування пазів зведено до табл. 2.

Таблиця 2 – Математичні моделі технологічних характеристик електродугового фрезерування пазів

Назва характеристики	Математична модель
Продуктивність обробки, мм <sup>3</sup> /хв	$M = 238 + 74,87x_1 + 16,12x_2$ (1)
Питома продуктивність обробки, мм <sup>3</sup> /А·хв	$M_a = 3,19 + 0,202x_2$ (2)
Середня швидкість обробки, мм/хв	$V = 0,94 + 0,302x_1 + 0,065x_2$ (3)
Питома витрата електроенергії, кВт·год·кг <sup>-1</sup>	$a = 20,53 - 1,23x_2$ (4)
Бічний міжелектродний зазор на виході потоку із торцевого МЕЗ, мм	$\delta_{\sigma(\text{вих})} = 0,22 + 0,0512x_1$ (5)
Відносний лінійний знос графітового ЕІ, %	$\gamma_{\text{л}} = 0,64 - 0,249x_1 + 0,226x_2 + 0,166x_3$ (6)
Де: $x_1 = \frac{X_1 - 75}{25}$ ; $x_2 = \frac{X_2 - 0,6}{0,2}$ ; $x_3 = \frac{X_3 - 5}{3}$	

Джерело: встановлено автором

Встановлено, що продуктивність обробки пазів  $M$  [див. модель (1)] визначається, в першу чергу, силою технологічного струму  $I$  (82,3 %), яку треба визнати головним керуючим фактором. Із підвищенням  $I$  вона збільшується (рис. 5). Останнє свідчить про теплову природу руйнування матеріалу при електродуговому фрезеруванні пазів. Вплив статичного тиску потоку на вході в МЕЗ значно менший (17,7 %), але має істотне значення. Із підвищенням  $P_{cm}$  продуктивність обробки збільшується, що пояснюється підвищенням усталеності процесу обробки при інтенсифікації вилучення продуктів ерозії із зони обробки. Виявлено, що довжина пазу  $L$  на продуктивність обробки не впливає. В межах експерименту продуктивність обробки пазів змінювалася у межах від 155 до 340  $\text{мм}^3/\text{хв}$ .



1 –  $P_{cm} = 0,4$  МПа; 2 –  $P_{cm} = 0,6$  МПа; 3 –  $P_{cm} = 0,8$  МПа

Рисунок 5 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність продуктивності обробки  $M$  від  $I$  та  $P_{cm}$  (б)  
Джерело: встановлено автором

Із математичної моделі (2) виходить, що на питому продуктивність обробки пазів  $M_a$  впливає лише один фактор – статичний тиск робочої рідини на вході потоку в МЕЗ  $P_{cm}$ , із підвищенням якого  $M_a$  збільшується (рис. 6). Інші фактори мають лише «шумовий» ефект, а тому вилучені із моделі. В межах експерименту питома продуктивність обробки пазів змінювалася у межах від 2,78 до 3,40  $\text{мм}^3/\text{А}\cdot\text{хв}$ .

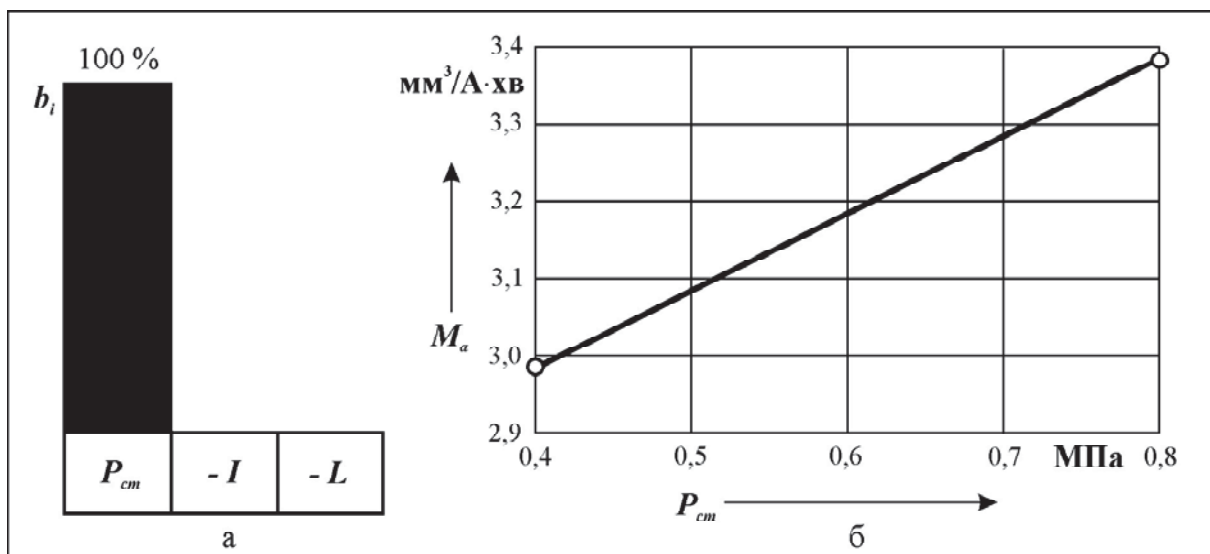


Рисунок 6 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність питомої продуктивності обробки  $M_a$  від  $P_{cm}$  (б)  
Джерело: встановлено автором

Конкретний за площею та формою паз характеризується певною середньою швидкістю обробки (електродугового фрезерування)  $V$  – зручним для технологічних розрахунків показником (3), що, власне, теж характеризує продуктивність обробки. Саме тому, вплив факторів на  $V$  аналогічний впливу факторів на продуктивність обробки, що підтверджується рисунком 7. В межах експерименту середня швидкість обробки пазів змінювалася у межах від 0,60 до 1,36 мм/хв.

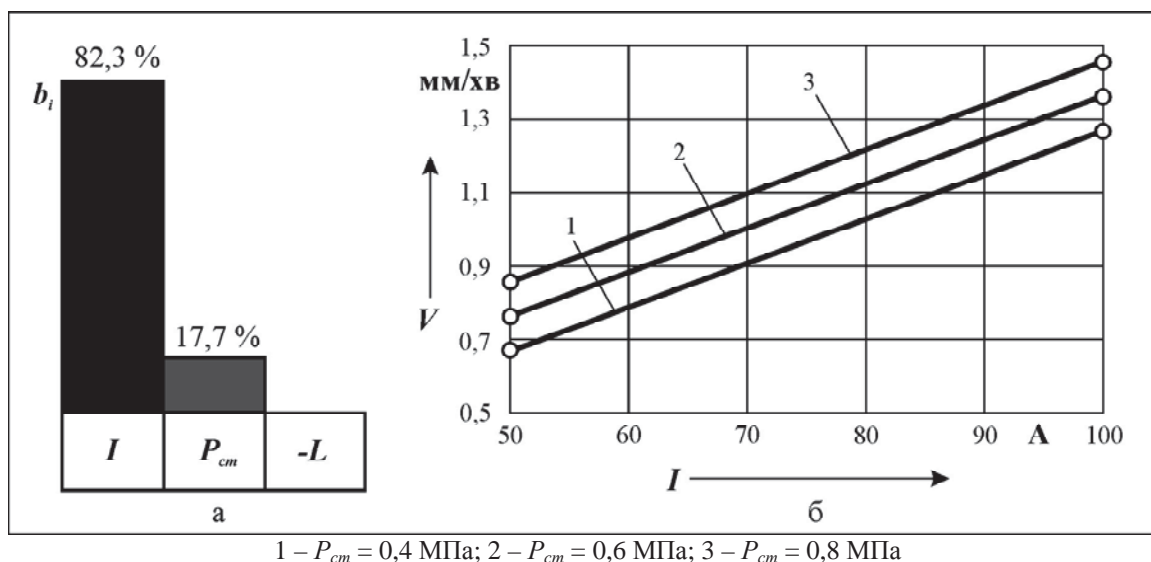


Рисунок 7 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність середньої швидкості обробки  $V$  від  $I$  та  $P_{cm}$  (б)  
Джерело: встановлено автором

Із математичної моделі (4) виходить, що на питому витрату електроенергії  $a$  впливає лише статичний тиск робочої рідини на вході потоку в МЕЗ  $P_{cm}$ , із підвищенням якого  $a$  зменшується (рис. 8). Фізичний ефект зменшення питомої витрати електроенергії пов'язаний із зниженням частки продуктів ерозії, що руйнуються за рахунок вторинного диспергування, яке викликано інтенсифікацією вилучення продуктів ерозії із зони обробки при підвищенні швидкості прокачування. В межах експерименту питома витрата електроенергії при обробці пазів змінювалася у межах від 18,33 до 22,93 кВт·год·кг<sup>-1</sup>.

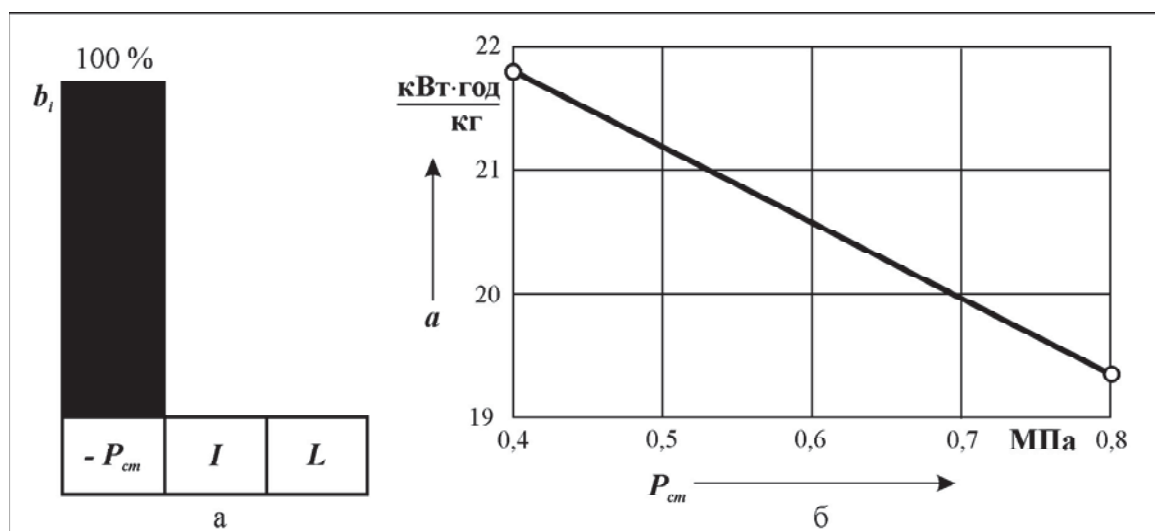


Рисунок 8 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність питомої витрати електроенергії  $a$  від  $P_{cm}$  (б)  
Джерело: встановлено автором

Із математичної моделі (5) виходить, що бічний міжелектродний зазор на виході потоку із торцевого МЕЗ  $\delta_{\delta} (вих.)$  визначається лише силою технологічного струму  $I$ , із підвищенням якої  $\delta_{\delta} (вих.)$  збільшується (рис. 9). Незалежність впливу інших факторів дозволяє підтримувати зазор на певному рівні за рахунок стабілізації сили струму та прогнозувати його. В межах експерименту бічний міжелектродний зазор на виході потоку із торцевого МЕЗ при формоутворенні пазів змінювався у межах від 0,15 до 0,27 мм, що цілком задовільно для їх чорнового електрофрезерування.

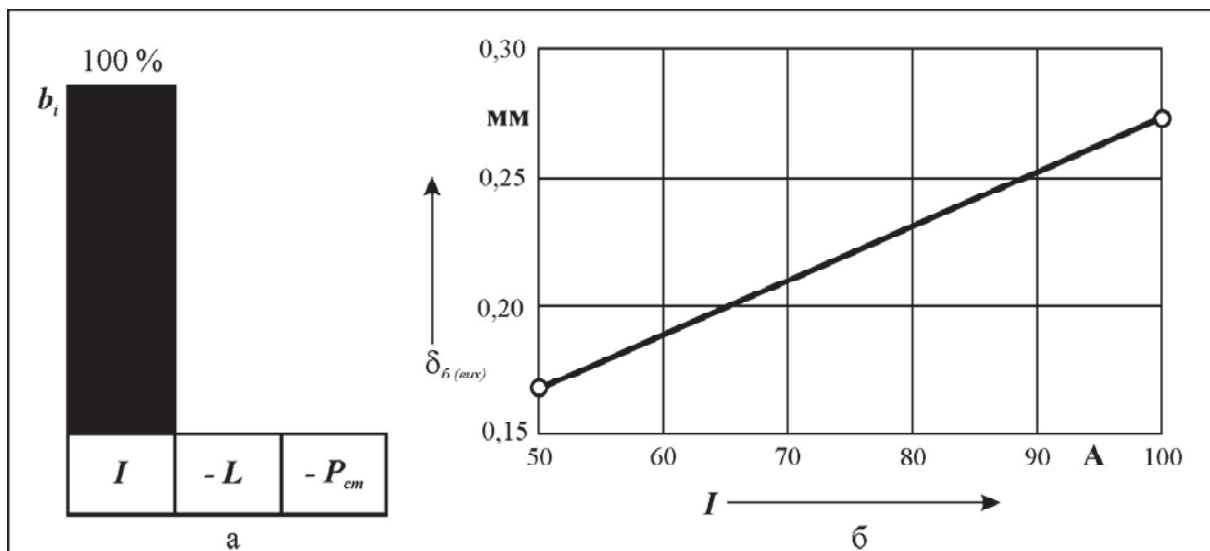


Рисунок 9 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність бічного міжелектродного зазору на виході потоку в торцевий МЕЗ  $\delta_{\delta} (вих.)$  від  $I$  (б)

Джерело: встановлено автором

Відносний лінійний знос графітового ЕІ  $\gamma_L$  – технологічна характеристика, від якої залежить економічна доцільність способу електродугового фрезерування пазів та точність їх обробки. Із математичної моделі (6) виходить, що на відносний лінійний знос графітового ЕІ впливають в достатній мірі усі три фактора (рис. 10).

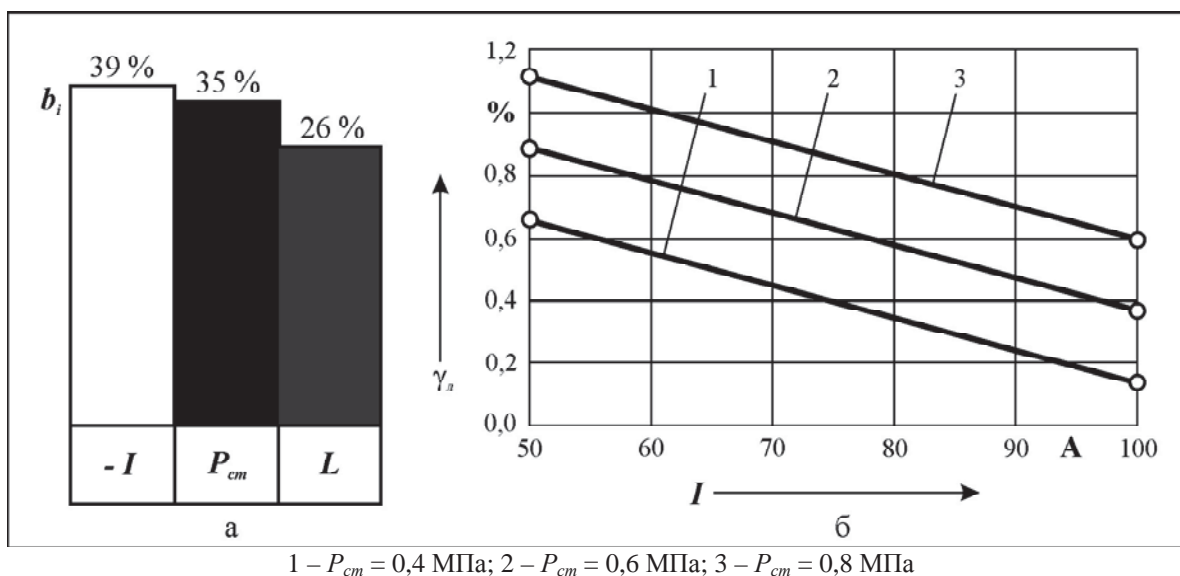


Рисунок 10 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність відносного лінійного зносу графітового ЕІ  $\gamma_L$  від  $I$  та  $P_{cm}$  [ $L = 5$  мм] (б)

Джерело: встановлено автором



Найбільший вплив (39 %) чинить сила струму  $I$ , із підвищенням якої знос зменшується. Тому є можливим реалізувати високопродуктивне та малозносне електродугове фрезерування, де сила струму буде головним керуючим фактором. Це з позитивного боку характеризує даний процес обробки. Трохи менше (35 %) впливає на знос статичний тиск потоку на вході в торцевий МЕЗ  $P_{cm}$ , причому із зменшенням  $P_{cm}$  знос зменшується. Ще меншу (26 %), але суттєву ступінь впливу на знос чинить довжина пазу  $L$ , що моделює вплив висоти буртика на графітовому ЕІ. Із зменшенням величини  $L$  знос зменшується. Варіювання факторами в рамках експерименту дозволяють керувати відносним лінійним зносом графітового ЕІ в межах від 0,25 до 1,25 %, що підтверджує доцільність процесу електродугового фрезерування пазів.

**Висновки.** Запропоновано спосіб обробки порожнин, зокрема пазів, за принципом електродугового фрезерування. Виконано експериментальне обґрунтування технологічної схеми формоутворення пазів електричною дугою з використанням графітового ЕІ складеної конструкції. Отримано математичні моделі технологічних характеристик електродугового фрезерування пазів, які дозволяють прогнозувати продуктивність, питому продуктивність та швидкість обробки, питому витрату електроенергії, бічний міжелектродний зазор та відносний знос графітового ЕІ.

## Список літератури

1. Носуленко В. И. Размерная обработка металлов электрической дугой [Текст] / В. И. Носуленко, Н. Г. Мещеряков // Электронная обработка материалов. – 1981. - № 1. – С. 19-23.
2. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою [Текст] / Віктор Боков – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс-ЛТД», 2002. – 300 с.
3. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов [Текст] / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.

**Viktor Bokov, Prof., PhD tech. sci.**

*Kirovohrad National Technical University*

### **Electric-arc milling**

The objective of the work is reasoning of technological pattern for shaping grooves by electric arc and prognostication for technological properties of electric-arc milling.

The work shows the results of electric-arc groove milling research:

- analysis and research of different technological patterns of shaping grooves;
- designing of graphite electrode tool of composite structure which ensures working liquid pumping through a narrow parallel-plate duct;
- mathematical modeling of technological properties of electric-arc milling.

Conclusions. There has been offered a method of cavity working, grooves in particular, by electric-arc milling. There was given experimental reasoning for technological pattern of groove shaping by electric arc with use of graphite electrode tool of composite structure. There have been received mathematical models of technological properties of groove electric-arc milling which enable to control and forecast them. **electric-arc, hydrodynamic regime, graphite electrode tool of composite structure, additional current, technological properties, mathematical models**

Одержано 19.06.2015