

Фізичний механізм формування електричною дугою шорсткості бічної поверхні

Досліджено та описано фізичний механізм формування електричною дугою шорсткості бічної поверхні електрода-заготовки в умовах варіювання кута нахилу твірної бічної поверхні електрода-інструмента.

електрична дуга, гідродинамічний потік, шорсткість бічної поверхні електрода-заготовки, кут нахилу твірної бічної поверхні електрода-інструмента, фрактографії бічних поверхонь

Різноманітні деталі машинобудування характеризуються наявністю отворів та порожнин. Бічна поверхня їх може мати циліндричну, конічну, пірамідальну та фасонну форму. Для обробки отворів та порожнин з не циліндричною бічною поверхнею, а також будь-якою за формою поверхнею деталі із важкооброблюваного матеріалу, широко застосовуються методи електроерозійної обробки. Одним із самих продуктивних методів електроерозійної обробки є спосіб розмірної обробки електричною дугою (РОД), який відомий за роботами [1, 2]. В залежності від кута нахилу твірної бічної поверхні електрода-інструмента, даним способом можливо реалізувати три принципи схеми формоутворення бічної поверхні електрода-заготовки (табл. 1).

При реалізації схеми 1, коли $\alpha < 0^\circ$, при зближенні електродів спостерігається горіння електричної дуги між бічною поверхнею електрода-інструмента та бічною поверхнею електрода-заготовки. Внаслідок цього шорсткість бічної поверхні електрода-заготовки, за інших рівних умов, є максимально можливою, так як являє собою результат накладання одиничних лунок, що утворюються від горіння цієї дуги, а величина шорсткості залежить, як відомо [3], від глибини лунок і визначається силою технологічного струму та швидкістю потоку в міжелектродному зазорі. Але оскільки швидкість потоку в радіальному напрямку міжелектродного зазору змінюється, отримана бічна поверхня електрода-заготовки характеризується нерівномірною шорсткістю.

За даними роботи [3] вважається, що при реалізації процесу РОД за схемою 2, коли $\alpha = 0^\circ$, електрична дуга горить лише в торцевому зазорі, а тому прямо не впливає на формування шорсткості бічної поверхні електрода-заготовки. Можливі електричні розряди в бічному міжелектродному зазорі пояснюються випадковим попаданням в нього з робочою рідиною електропровідних часток, які їх ініціюють. Однак таке уявлення про фізичний механізм формування шорсткості не може пояснити інтенсивного зносу периферійної частини електрода-інструмента з утворенням характерного радіусу округлення. Відмічається, що шорсткість бічної поверхні електрода-заготовки, що отримана за інших рівних умов за схемою 2, менша шорсткості бічної поверхні електрода-заготовки, що отримана за схемою 1.

Таблиця 1 - Типові технологічні схеми формоутворення бічної поверхні електрода-заготовки способом РОД

Схема	1	2	3
Кут нахилу бічної поверхні електрода-інструмента α , град	< 0	0	> 0
Кут нахилу бічної поверхні електрода-заготовки β , град	> 0	0	> 0
Примітка: 1 - електрод-інструмент, 2 - електрод-заготовка, 3 - електрична дуга, 4 - бічна поверхня електрода-заготовки, 5 - твірна бічної поверхні електрода-інструмента			

За результатами досліджень робіт [3, 4], при реалізації процесу РОД за схемою 3 спостерігається рівномірна шорсткість бічної поверхні, але пояснення фізичного механізму її формування не наводиться.

Таким чином, метою роботи є дослідження фізичного механізму формування шорсткості бічної поверхні електрода-заготовки в різних умовах РОД.

Оскільки технологічні схеми формоутворення бічної поверхні електрода-заготовки, що представлені в таблиці 1, відрізняються кутом нахилу бічної поверхні електрода-інструмента α , задачею дослідження є побудова математичної моделі шорсткості бічної поверхні електрода-заготовки, як залежності перш за все від α , з урахуванням як факторів сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини на вході потоку в міжелектродний зазор $P_{ст}$. Останній характеризує гідродинамічний режим обробки. Діапазон варіювання факторів та результати дослідження наведено в таблиці 2.

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

Фактори		I , А	$P_{ст}$, МПа	α , град	R_a , мкм		
Основний рівень		100	0,8	30			
Інтервал варіювання		50	0,2	30			
Верхній рівень		150	1,0	60			
Нижній рівень		50	0,6	0			
Код		x_1	x_2	x_3	y_1		
Номер досліду	1	Порядок реалізації	6	+	+	+	9,5
	2		2	-	+	+	4,8
	3		5	+	-	+	10,2
	4		1	-	-	+	7,6
	5		7	+	+	-	11,0
	6		8	-	+	-	6,0
	7		3	+	-	-	12,5
	8		4	-	-	-	7,0
Досліди у центрі плану		1	0	0	0	8,6	
		2	0	0	0	8,7	
		3	0	0	0	8,5	
		4	0	0	0	8,7	

В якості матеріалу електродів-інструментів та електродів-заготовок використовувалася сталь 45. Обробку здійснювали на зворотній полярності (електрод-

заготовка – «мінус»). Робоча рідина – органічне середовище. За результатами дослідження отримана наступна математична модель шорсткості Ra бічної поверхні електрода-заготовки після РОД:

$$y_1 = 8,575 + 2,225x_1 - 0,75x_2 - 4,4x_3$$

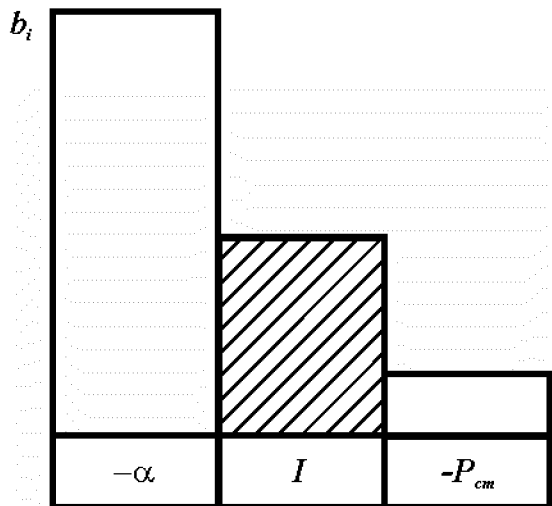


Рисунок 1 - Ступінь впливу факторів на шорсткість обробленої бічної поверхні Ra

Із математичної моделі шорсткості бічної поверхні електрода-заготовки після РОД виходить, що остання залежить, головним чином, від кута нахилу твірної бічної поверхні електрода-інструмента α (рис. 1), причому, із підвищенням α шорсткість зменшується. Таким чином, фактор α треба розглядати як головний, керуючий. Вплив сили струму I на Ra приблизно в 2 рази менший. Шорсткість поверхні – результат накладання одиночних лунок або «доріжок» від горіння розрядів. Відомо, що більшої сили струму відповідає більший діаметр лунки. Отже, більшої сили струму відповідає більша шорсткість поверхні після РОД. Залежність $Ra = f(\alpha, I)$ представлена на рис. 2. Ще менший вплив на шорсткість поверхні

виявляє статичний тиск робочої рідини на вході потоку в міжелектродний зазор P_{cm} , із підвищенням якого Ra зменшується. Даний керуючий фактор є особливістю процесу РОД, порівняно з електроімпульсною обробкою, що розширює її технологічні можливості.

Для пояснення фізичного механізму залежності шорсткості бічної поверхні матриці прес-форми після РОД від кута нахилу твірної бічної поверхні електрода-інструмента α звернемо увагу на послідовність формування бічної поверхні при кутах $\alpha = 0^\circ$ та $\alpha = 60^\circ$, що були об'єктом дослідження даної роботи.

При куті $\alpha = 0^\circ$ (табл. 3, а) збудженню електричної дуги на периферії електрода-інструмента в діелектричному середовищі, як показано в роботі [5], передують контакт останнього із заготовкою. Внаслідок цього спостерігається інтенсивне нерівномірне контактне нагрівання поверхонь. Навколо місця контакту утворюється та зростає газова порожнина як продукт термічного руйнування робочої рідини. Аналогічне фізичне явище щодо утворення газової порожнини, як показав К. К. Хренов [6, с. 157-159], спостерігається при електрозварюванні під водою. Г. І. Лесков у роботі [7, с. 9] вказує на термічний механізм збудження зварювальної дуги після короткого замикання електродів, коли їх зіткнення в початковій фазі здійснюють під невеликим тиском. Крім того, Г. М. Мещеряковим в роботі [8], яка стосується електроерозійної обробки в умовах змінного струму, методом швидкісної кінозйомки (4000 кадрів/с) виявлено, що «...існує значна нерівномірність в нагріванні на самих перших стадіях,

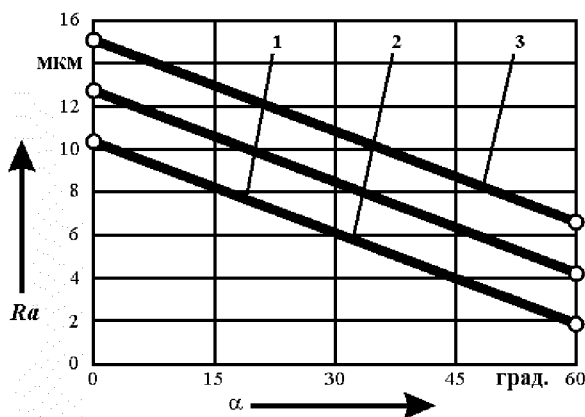
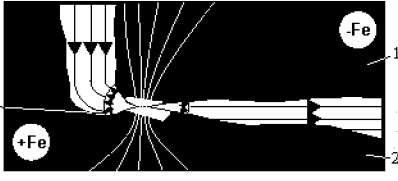
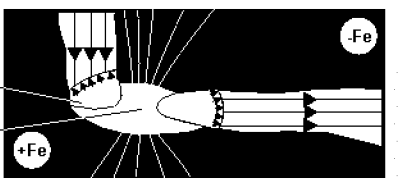
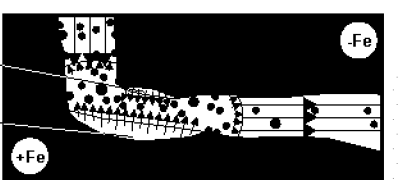
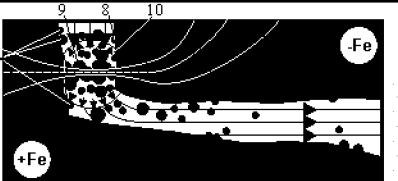
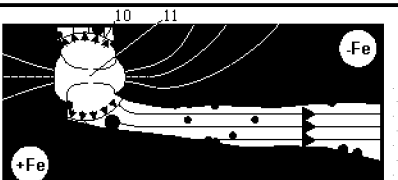



Рисунок 2 - Залежність шорсткості бічної поверхні Ra від α та I : 1 - $I = 50$ А; 2 - $I = 100$ А; 3 - $I = 150$ А

причому тепло виділяється головним чином на аноді. Це спостерігалось в експериментах з усіма комбінаціями металів Fe, Al, Cu, Pb, Sn, навіть коли контакти були з одного і того ж металу, за винятком Pb-Pb та Cu-Cu. Таким чином, матеріали електродів при РОД, також як і при електроімпульсній обробки, відповідають за уніполярність ерозії. Далі, після деякої експозиції електричного поля, відбувається

Таблиця 3 - Послідовність формування шорсткості бічної поверхні електрода-заготовки при куті нахилу твірної бічної поверхні електрода-інструмента $\alpha=0^{\circ}$

Позначення	Схема процесу	Пояснення до схеми
а		Контакт електродів 1, 2. Нерівномірне нагрівання місця стику. Початок утворення газової порожнини 3.
б		Збудження дуги 4. Розширення газової порожнини 3. Початок викиду розплаву із лунок.
в		Загасання дуги 4. Розширення газової порожнини 3. Закипання та викидання розплаву із лунок 5, 6.
г		Конденсація та приварювання часток 7, 8 до бічних поверхонь електродів 1, 2. Утворення електропровідних містків 9 в бічному зазорі. Нерівномірне нагрівання місця стику. Початок утворення газової порожнини 10.
д		Збудження дуги 11. Розширення газової порожнини 10. Початок викиду розплаву із лунок.
ж		Загасання дуги 11. Розширення газової порожнини 10. Закипання та викидання розплаву та утворення лунок 12, 13 на бічних поверхнях електродів 1, 3. Приварювання часток 14, 15 до бічних поверхонь.

суттєве підвищення температури в зоні контакту електродів, збудження електричної дуги та початок викиду розплаву із лунки (табл. 3, б). Після розриву електричного контакту дуга гасне, але газова порожнина за інерцією продовжує розширятися, що приводить до зниження тиску в ній. Під впливом цього залишок розплаву у лунках закипає та вибухоподібно викидається за їх межі (табл. , в). Частина розплаву, що викидається за потоком, або приварюються до поверхні протилежного електрода, або конденсуються в металеві кульки та вилучаються потоком із зони обробки. Друга частина

розплаву, що викидається проти потоку, або теж приварюється до поверхні протилежного електрода, або під дією потоку конденсується та з часом повертається в бічному міжелектродному зазорі, щоб рухатися за потоком. Наявність в обмеженому двома паралельними стінками бічному зазорі продуктів ерозії, що рухаються за потоком (перша дуга) та проти потоку (друга дуга), сприяє утворенню електропровідних містків (табл. 3, г), які є каталізатором збудження електричних дуг в ньому (табл. 3, д). Наслідком горіння таких дуг є утворення на бічних поверхнях електродів відносно глибоких лунок (табл. 3, ж), що збільшують шорсткість бічної поверхні. Утворення дуг в бічному міжелектродному зазорі підтверджується експериментально наявністю лунок на бічній поверхні електрода-інструмента при куті нахилу твірної $\alpha = 0^\circ$, а концентрація таких лунок у місці повороту потоку на 90° приводе до інтенсивного зносу кромки електрода-інструмента, тобто до утворення її радіусного округлення.

При куті $\alpha = 60^\circ$ перші три стадії горіння електричної дуги на периферії електрода-інструмента (табл. 4, а, б, в) відбуваються аналогічно першим трьом стадіям при куті $\alpha = 0^\circ$ (табл. 3, а, б, в). Але далі частка розплаву, що викидається із лунки проти потоку, попадає в широкий простір між бічними поверхнями А та В електродів (табл. 4, в), де швидкість потоку значно менша швидкості потоку в бічному зазорі з паралельними стінками (табл. 3, г). Тому час знаходження частки розплаву у даній зоні значно більший.

Таблиця 4 - Послідовність формування шорсткості бічної поверхні електрода-заготовки при куті нахилу твірної бічної поверхні

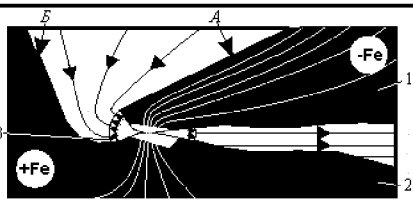


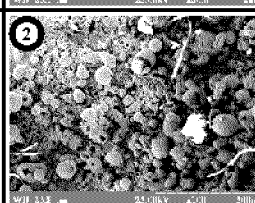
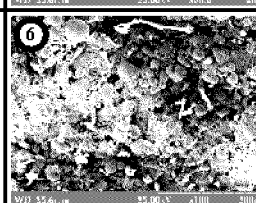
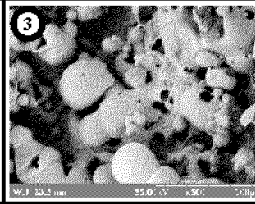
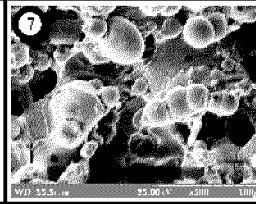
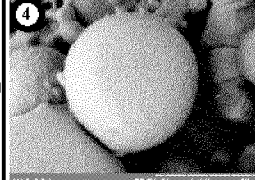
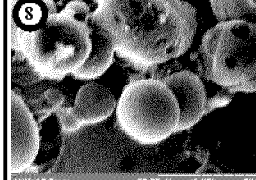
Позначення	Схема процесу		
а		Контактне на утворення	
	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	
б			Збудованої розплаву
в			Загазованості кінця 5, 6.
г			Контактне на утворення дуги
д			Після процесу в н

Рисунок 3 – Фрактографії бічних поверхень після РОД при $\alpha=0^\circ$ (1-4) та $\alpha=60^\circ$ (5-8)

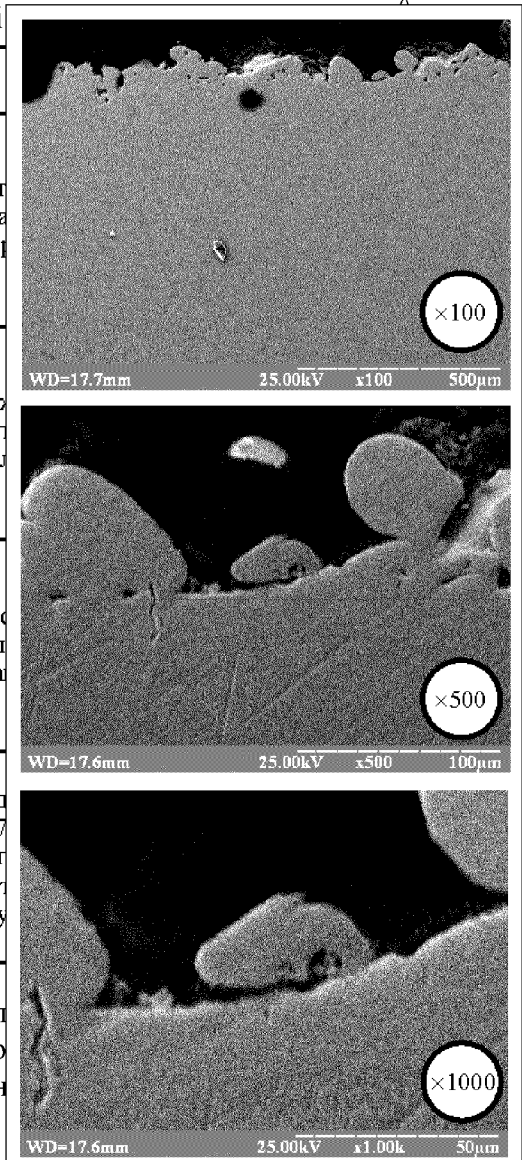


Рисунок 4 - Фрактографії мікроструктури бічної поверхні електрода-заготовки після РОД при $\alpha = 60^\circ$

електричної дуги, практично дорівнює нулю. Останнє підтверджується тим, що на поверхні *A* електрода-інструмента слідів дуги не виявлено. Таким чином, при $\alpha = 60^\circ$ поверхня *B* утворюється тільки за рахунок горіння дуги на периферійній частині електрода-інструмента між торцевими поверхнями електродів, а при $\alpha = 0^\circ$ - за рахунок послідовного горіння дуг: між торцевими поверхнями електродів та між бічними поверхнями електродів. В останньому випадку створюються умови для приварювання крупних продуктів ерозії до обробленої поверхні, що також підвищує шорсткість і підтверджується фрактографіями цієї поверхні при збільшенні $\times 30$, $\times 100$, $\times 500$ та $\times 1000$ (рис. 3) та фрактографіями її мікроструктури (рис. 4.). За сукупністю цих умов шорсткість бічної поверхні електрода-заготовки після РОД, що формується при $\alpha = 60^\circ$, значно менша та більш рівномірна ніж шорсткість бічної поверхні при $\alpha = 0^\circ$.

В умовах експерименту шорсткість бічної поверхні електрода-заготовки змінювалася у межах від *Ra*4,8 до *Ra*12,5 мкм.

Список літератури

1. А. с. 368965 СССР. М. кл. В 23 Р 1/02. Способ электрофизической обработки металлов / В. И. Носуленко (СССР). - № 1223593/25-8; Заявл. 04.03.68; Не подлежит опубли. в откр. печати.
2. Носуленко В. И., Мещеряков Г. Н. Размерная обработка металлов электрической дугой // Электронная обработка материалов. - 1981. - № 1. - С. 19-23.
3. Боков В. М. Розмірне формо-утворення поверхонь електричною дугою. - Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2002. - 300 с.
4. Боков В. М. Принцип розмірного формоутворення електричною дугою кінцевих поверхонь // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Вип. 32. - Кіровоград: КДТУ, 2002. - С. 99-105.
5. Боков В. М. Фізичний процес електроерозії при розмірній обробці дугою // Вісник Інженерної академії України. Вип. 2. - Київ: ТОВ «Поліпром», 2002. - С. 22-29.
6. Хренов К. К. Сварка, резка и пайка металлов. - М.: Машиностроение, 1973. - 408 с.
7. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга. - М.: Машиностроение, 1970. - 335 с.
8. Electro-physical Processes in Electric Pulse Metal Cutting from the View of Efficiency and Electrode Wear / G. N. Meshcheriakov. - Process and Metal Transfer of the CIRP Vol 18, 1970, p. 491-499.

В. Боков, М. Попова

Физический механизм формирования электрической дугой шероховатости боковой поверхности

Исследован и описан физический механизм формирования электрической дугой шероховатости боковой поверхности электрода-заготовки в условиях варьирования угла наклона образующей боковой поверхности электрода-инструмента.

V. Bokov, M. Popova

Physical mechanism of lateral surface roughness forming by means of electric arc

Physical mechanism of lateral surface roughness forming of electrode-billet in the conditions of inclination variation of lateral surface generatrix of electrode-instrument is studied and described.

Одержано 11.02.11