

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КАФЕДРА ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ ТА СПЕЦТЕХНОЛОГІЙ

## **ТЕХНОЛОГІЯ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ**

Методичні рекомендації до практичних занять для здобувачів  
другого (магістерського) рівня вищої освіти освітньо-професійної  
програми «Прикладна механіка» спеціальності  
131 «Прикладна механіка»

Кропивницький  
ЦНТУ  
2020

Технологія фізико-технічної обробки матеріалів : методичні рекомендації до практичних занять для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти освітньої програми «Прикладна механіка» спеціальності 131 «Прикладна механіка» всіх форм навчання / [уклад. : В. Боков, О. Сіса, В. Мірзак] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. обробки металів тиском та спецтехнологій. – Кропивницький : ЦНТУ, 2020. – 68 с.

Затверджено на засіданні кафедри  
обробки металів тиском та спецтехнологій.  
Протокол № 6 від 23.12.2020

Укладачі: Віктор Боков, канд. техн. наук, доцент, професор  
кафедри обробки металів тиском та спецтехнологій;  
Олег Сіса, канд. техн. наук, доцент кафедри обробки  
металів тиском та спецтехнологій;  
Володимир Мірзак, канд. техн. наук, старший  
викладач кафедри обробки металів тиском та  
спецтехнологій.

Рецензент: В. Носуленко, доктор техн. наук., професор, професор  
кафедри обробки металів тиском та спецтехнологій

Методичні рекомендації до практичних занять здобувачів освіти спеціальності 131 «Прикладна механіка» розроблені у відповідності до освітньо-професійної програми підготовки магістрів та робочої програми дисципліни «Технологія фізико-технічної обробки матеріалів» для усіх форм навчання.

Здобувачі освіти денної і заочної форм навчання (дисципліна читається на 1 курсі магістратури у 2 семестрі та на 2 курсі у 3 семестрі), у відповідності до даних методичних рекомендацій, самостійно виконують практичні завдання за даною дисципліною.

Зміст практичних завдань та засоби контролю, у відповідності до структури викладання дисципліни «Технологія фізико-технічної обробки матеріалів», наведено на сайті дистанційної освіти ЦНТУ

<http://moodle.kntu.kr.ua/login/index.php>

© Технологія фізико-технічної обробки  
матеріалів

/Укладачі: В. Мірзак, В. Боков,  
О. Сіса, 2020

© ЦНТУ, м. Кропивницький

## Завдання № 1

**РОЗРАХУНОК ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ  
ЕЛЕКТРОДІВ-ІНСТРУМЕНТІВ ПРИ  
ЕЛЕКТРОІМПУЛЬСНІЙ ОБРОБЦІ**

Розрахувати геометричні параметри електрода-інструмента для електроімпульсного прошивання квадратного робочого отвору в розділовій матриці. Розробити робоче креслення електрода-інструмента та складальне креслення технологічного пристрою для позиціонування заготовки матриці відносно електрода-інструмента. Вихідні дані: таблиця 1.1, рис. 1.1 – 1.3.

Таблиця 1.1

Вихідні дані до завдання 1

Варіант	Розмір отвору $A$ , мм	Бічний зазор $S$ , мм	Найбільша висота мікронерівностей після ЕІМО $H_a$ , мм	Глибина дефектного шару після ЕІМО $T_a$ , мм	Неперпендикулярність осей ЕЗ та ЕІ $\rho$ , мм	Похибка встановлення ЕЗ відносно ЕІ $\epsilon$ , мм	Матеріал електрода-інструмента
1	6	0,05	0,01	0,01	0,02	0,01	Графіт
2	10	0,06	0,01	0,01	0,02	0,01	Графіт
3	16	0,07	0,01	0,01	0,02	0,01	Графіт
4	20	0,08	0,01	0,01	0,02	0,01	Графіт
5	25	0,09	0,01	0,01	0,02	0,01	Графіт
6	6,5	0,09	0,02	0,02	0,02	0,01	Мідь
7	10,5	0,08	0,02	0,02	0,02	0,01	Мідь
8	16,5	0,07	0,02	0,02	0,02	0,01	Мідь
9	20,5	0,06	0,02	0,02	0,02	0,01	Мідь
10	25,5	0,05	0,02	0,02	0,02	0,01	Мідь
11	7	0,05	0,03	0,03	0,02	0,01	Латунь
12	11	0,06	0,03	0,03	0,02	0,01	Латунь
13	17	0,07	0,03	0,03	0,02	0,01	Латунь
14	21	0,08	0,03	0,03	0,02	0,01	Латунь
15	26	0,09	0,03	0,03	0,02	0,01	Латунь
16	7,5	0,09	0,04	0,04	0,02	0,01	Сталь
17	11,5	0,08	0,04	0,04	0,02	0,01	Сталь
18	17,5	0,07	0,04	0,04	0,02	0,01	Сталь
19	21,5	0,06	0,04	0,04	0,02	0,01	Сталь
20	26,5	0,05	0,04	0,04	0,02	0,01	Сталь

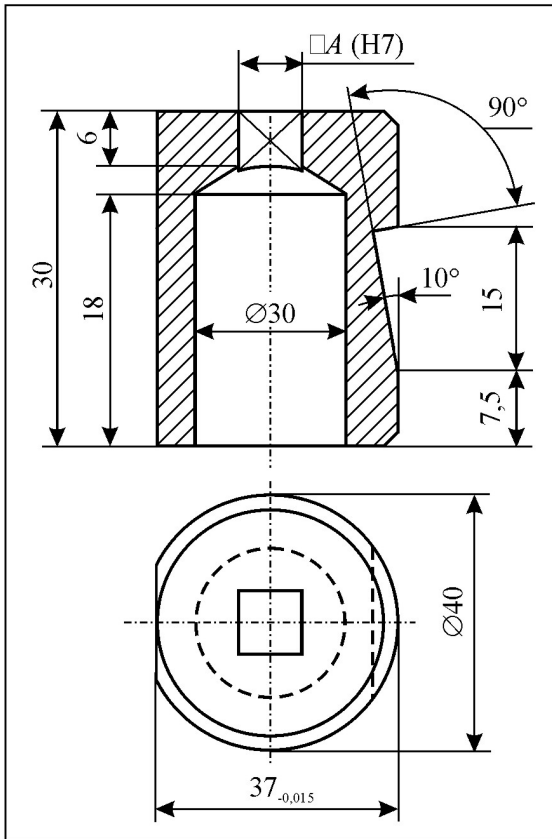


Рис. 1.1. Матриця

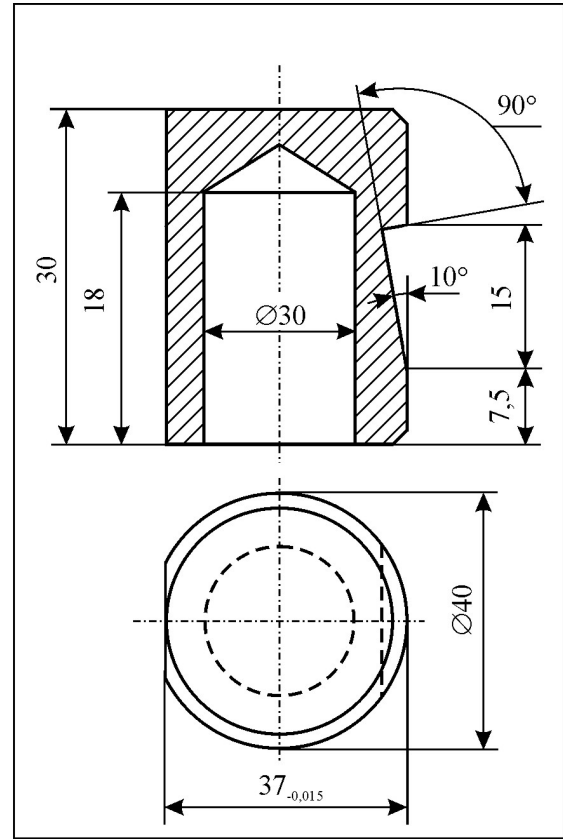


Рис. 1.2. Заготовка матриці

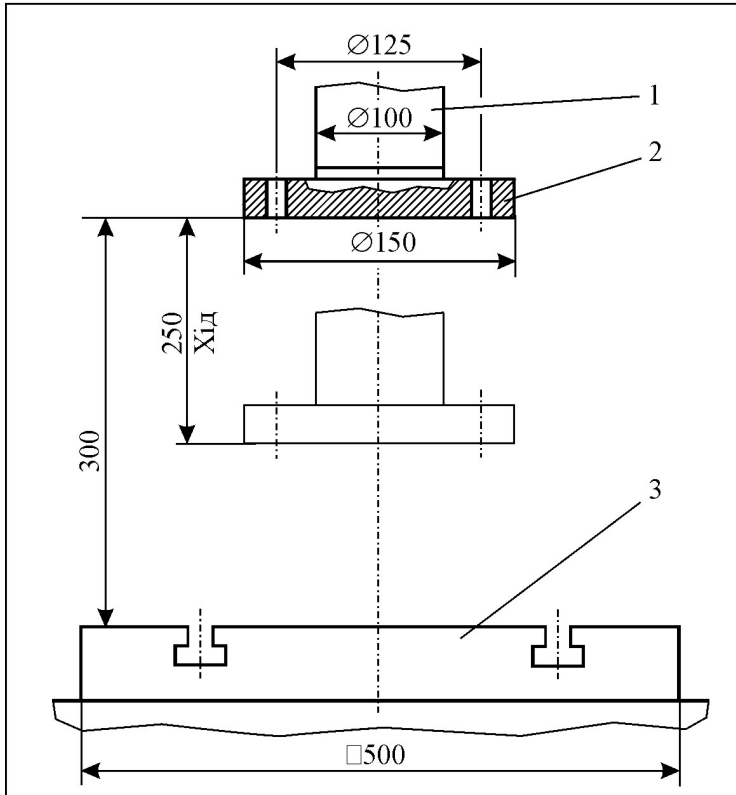


Рис. 1.3. Робоча зона електроерозійного верстата:

- 1 - шпиндель;
- 2 - плита шпинделя;
- 3 - плита стола

## Загальні відомості

За даними роботи [1, с. 101] відомо, що профіль робочої частини ЕІ при прошиванні отвору методом електроімпульсної обробки являє собою дзеркальне відображення оброблюваної поверхні з розмірами, які зменшені на величину бічного міжелектродного зазору та припуску на подальшу обробку. Номінальний робочий розмір ЕІ визначається за формулою

$$B = A - 2 \cdot (S + z_b),$$

де  $A$  – розмір отвору за кресленням, мм;

$S$  – бічний міжелектродний зазор, мм;

$z_b$  – мінімальний припуск на бік для подальшої обробки.

Сума  $(S + z_b)$  являє собою величину корекції ЕІ.

$$z_b = H_a + T_a + \rho_a + \varepsilon_b,$$

де  $H_a$  – найбільша висота поверхневих мікронерівностей;

$T_a$  – глибина дефектного шару після ЕІМО, мм

$\rho_a$  – неперпендикулярність осей ЕЗ та ЕІ, мм.

Методична інформація щодо проектування ЕІ та технологічного пристрою знаходиться в роботі [2].

## Зміст звіту

1. Навести розрахунок номінального робочого розміру ЕІ.

2. Розробити робоче креслення електрода-інструмента з урахуванням способу його кріплення в технологічному пристрою.

3. Розробити складальне креслення технологічного пристрою для позиціонування заготовки матриці відносно електрода-інструмента з урахування геометричних параметрів робочої зони верстата.

### **Контрольні питання**

Суть електроімпульсного прошивання отворів (електрокінематична схема). Матеріали для виготовлення електродів-інструментів для ЕІМО. Принцип позиціонування електродів (елементі кріплення).

## Завдання № 2

## ВИВЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРИЙОМІВ ПРОЦЕСУ РОД ФАСОННИХ ПОРОЖНИН КУВАЛЬНИХ ШТАМПІВ

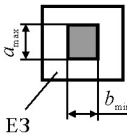
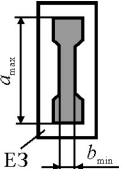
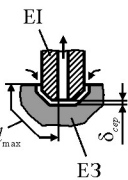
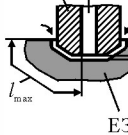
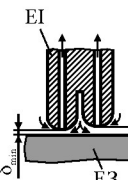
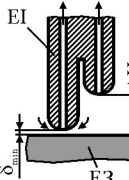
Вивчити та описати технологічні прийоми процесу РОД кувальних штамів: малогабаритних порожнин простої форми при використанні способу однозонного прокачування; великогабаритних порожнин та порожнин складної форми при використанні способу багатозонного прокачування; порожнин складного рельєфу при використанні способу багатозонного зворотного прокачування; принцип позиціонування електродів.

### Загальні відомості

**Обробка малогабаритних порожнин простої форми при використанні способу однозонного зворотного прокачування.** За даними роботи [3, с. 114], РОД малогабаритних порожнин простої форми в плані доцільно здійснювати при використанні способу однозонного зворотного прокачування робочої рідини через торцевий міжелектродний

Таблиця 2.1

### Класифікатор фасонних порожнин стасовно до процесу РОД

Класифікаційні ознаки	Складність форми в плані		Габаритні розміри порожнини		Складність рельєфу донної поверхні	
	Порожнини простої форми в плані	Порожнини складної форми в плані	Малогабаритні порожнини	Великогабаритні порожнини	Порожнини простого рельєфу	Порожнини складного рельєфу
Різновиди фасонних порожнин						
Схема, що пояснює	E3	E3	E3	E3	E3	E3
Критерії оцінки	$1 \leq \frac{a_{\max}}{b_{\min}} \leq 1,5$	$\frac{a_{\max}}{b_{\min}} > 1,5$	$\frac{l_{\max}}{\delta_{\text{sep}}} \leq 800$	$\frac{l_{\max}}{\delta_{\text{sep}}} > 800$	$\Delta H_i \leq 10 \delta_{\min}$	$\Delta H_i > 10 \delta_{\min}$

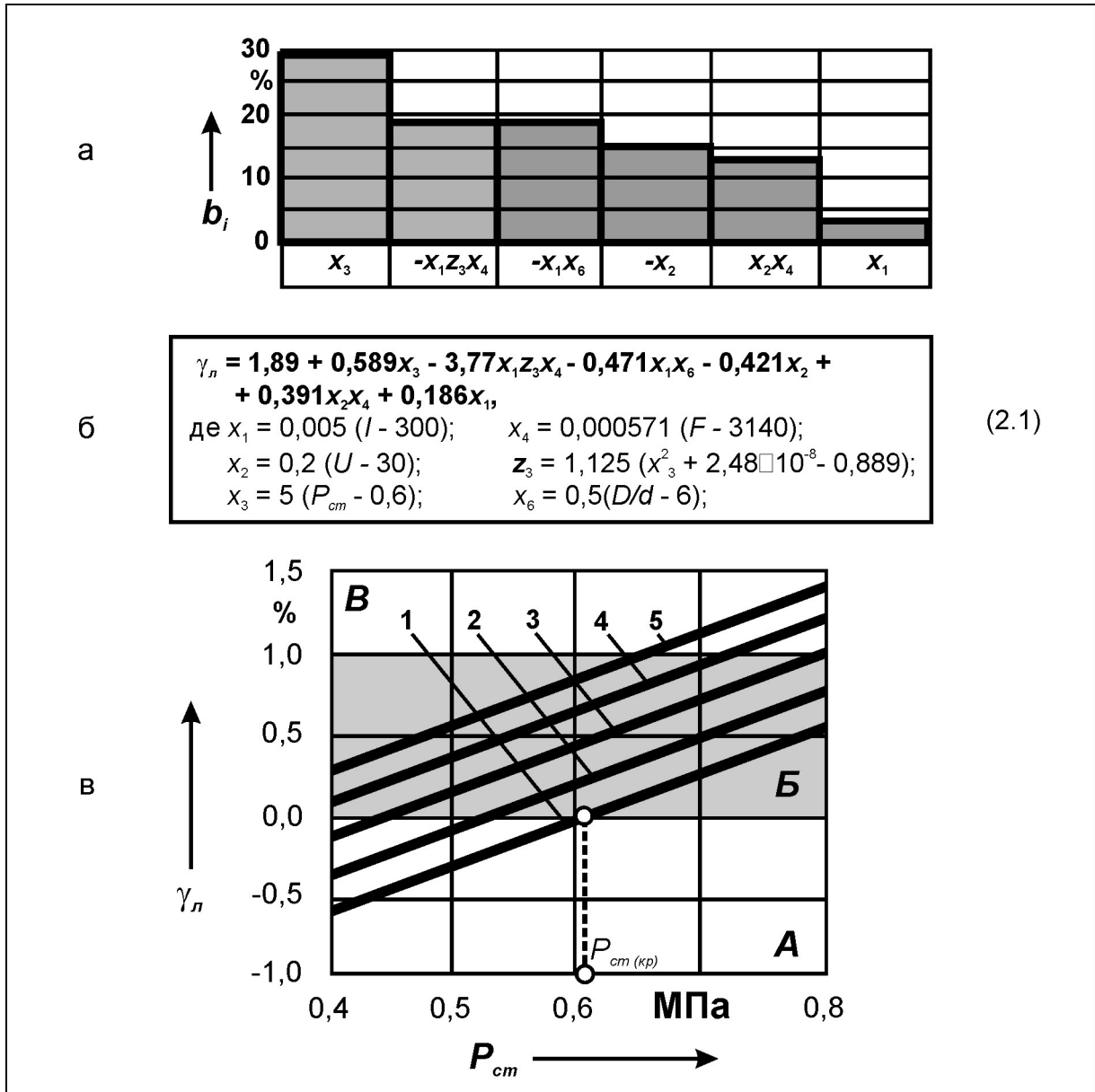
зазор, оскільки критерій  $1 \leq a_{\max}/b_{\min} \leq 1,5$ , а критерій при  $l_{\max}/\delta_{сер} \leq 800$  (табл. 2.1). В більш простому випадку в якості цільової функції оптимізації тут слід використати відносний лінійний знос EI – найважливіший параметр, що з економічної точки зору визначає область застосування процесу РОД фасонних порожнин. Задача полягає в знаходженні значень змінних факторів, що задають режим обробки ( $I, U, P_{cm}$ ) та геометричний параметр EI ( $D/d$ ), при яких відносний лінійний знос EI менше або дорівнює допустимому ( $\gamma_l \leq \gamma_{l(дон)}$ ).

З урахуванням багатофакторності цільової функції, скористуємося методом крутого сходження за градієнтом [3]. Розглянемо послідовність реалізації даного метода в межах можливої зміни параметра оптимізації  $\gamma_l$  при умові варіювання змінних факторів у вибраному діапазоні, де гіпотеза про адекватність моделі  $\gamma_l$  не відкидається. Припустимо, що кресленням деталі, яка обробляється, задані площа порожнини у плані  $F$  та глибина порожнини  $h$ , а єдиним обмеженням є умова  $\gamma_l \leq \gamma_{l(дон)}$ . Зафіксуємо змінні фактори  $I, U, P_{cm}$  та  $D/d$  на основному рівні і проведемо уявний дослід 0, в наслідок якого розрахуємо параметр  $\gamma_l$ , шляхом використання його математичної моделі (рис. 2.1, вираз 2.1). При призначенні умов подальших дослідів для фактора  $P_{cm}$ , що найбільш впливає на шуканий параметр, вибираємо крок, що дорівнює  $\Delta_3$ , а кроки  $\Delta_1, \Delta_2$  та  $\Delta_3$  для факторів  $X_1, X_2$  та  $X_3$  встановимо із пропорцій:

$$\frac{\bar{b}_3 \cdot \Delta X_3}{\bar{b}_1 \cdot \Delta X_1} = \frac{\Delta_3}{\Delta_1}; \quad \Delta_1 = \frac{\bar{b}_1 \cdot \Delta X_1 \cdot \Delta_3}{\bar{b}_3 \cdot \Delta X_3};$$

$$\frac{\bar{b}_3 \cdot \Delta X_3}{\bar{b}_2 \cdot \Delta X_2} = \frac{\Delta_3}{\Delta_2}; \quad \Delta_2 = \frac{\bar{b}_2 \cdot \Delta X_2 \cdot \Delta_3}{\bar{b}_3 \cdot \Delta X_3};$$

$$\frac{\bar{b}_3 \cdot \Delta X_3}{\bar{b}_6 \cdot \Delta X_6} = \frac{\Delta_3}{\Delta_6}; \quad \Delta_6 = \frac{\bar{b}_6 \cdot \Delta X_6 \cdot \Delta_3}{\bar{b}_3 \cdot \Delta X_3}$$



Напрямок руху за градієнтом визначаємо виходячи із результату нульового досліду: у даному випадку потребується знайти як можна менше значення відносного лінійного зносу EI, тому знаки кроків вибираємо зворотними знакам коефіцієнтам регресії, що їм відповідають, у виразі 2.1 (рис. 2.1).

В таблиці 2.2 в якості прикладу показано порядок реалізації дослідів метода крутого сходження за градієнтом при умові  $\gamma_l \leq \gamma_l(\text{дон})$ .

Таблиця 2.2

**Оптимізація режиму обробки фасонної малогабаритної порожнини методом крутого сходження за градієнтом при умові  $\gamma_l \leq \gamma_l(\text{дон})$**

Фактори	$I, A$ $X_1$	$U, B$ $X_2$	$P_{cm}, \text{МПа}$ $X_3$	$F, \text{мм}^2$ $X_4$	$h, \text{мм}$ $X_5$	$D/d$ $X_6$	$\gamma_l, \%$ $y$
$b_i$	0,19	-0,42	0,59	-	-	0,47	
$b_i \Delta X_i$	38	-2,1	0,12	-	-	0,94	
Розрахунковий крок	-15,83	0,875	-0,05	-	-	-0,39	
Крок після округлення	-16	0,9	-0,05	-	-	-0,4	
$X_{i0}$ (Дослід 0)	300	30,0	0,60	3140	12,5	6,0	1,89
Дослід 1	284	30,9	0,55	3140	12,5	5,6	1,56
Дослід 2	268	31,8	0,50	3140	12,5	5,2	1,22
<b>Дослід 3</b>	<b>252</b>	<b>32,7</b>	<b>0,45</b>	<b>3140</b>	<b>12,5</b>	<b>4,8</b>	<b>0,89</b>
Дослід 4	236	33,6	0,40	3140	12,5	4,4	0,56
Дослід 5	220	34,5	0,35	3140	12,5	4,0	0,23

Примітка:  $F = 3140 \text{ мм}^2$ ;  $h = 12,5 \text{ мм}$ ;  $\gamma_l(\text{дон}) \leq 1\%$

Задовільний відносний лінійний знос EI отримано в дослідях 3, 4, але при реалізації досліду 3 треба чекати більшу продуктивність обробки порівняно з дослідом 4, так як продуктивність визначається, насамперед, силою струму (рис. 2.2). Таким чином, оптимальні параметри режиму РОД заданої фасонної малогабаритної порожнини досягаються при  $I = 252 \text{ А}$ ;  $U = 33,7 \text{ В}$  та  $P_{cm} = 0,45 \text{ МПа}$ , коли процес реалізується при відносному діаметрі технологічного каналу в EI  $D/d = 4,8$ .

Після оптимізації режиму обробки розраховуються інші технологічні характеристики процесу РОД, наприклад  $\delta_6$ ,  $d_6/d + h_6/h$ ,  $Ra$ ,  $H$ ,  $M$ ,  $M_a$  та  $a$ , для чого використовують їх математичні моделі.

Розглянемо задачу щодо оптимізації режиму обробки цієї ж порожнини, коли, крім обмежень за зносом EI, пред'являються вимоги

щодо забезпечення максимально можливої продуктивності обробки. Як видно із рис. 2.2, продуктивність обробки фасонних порожнин залежить головним чином від сили струму.

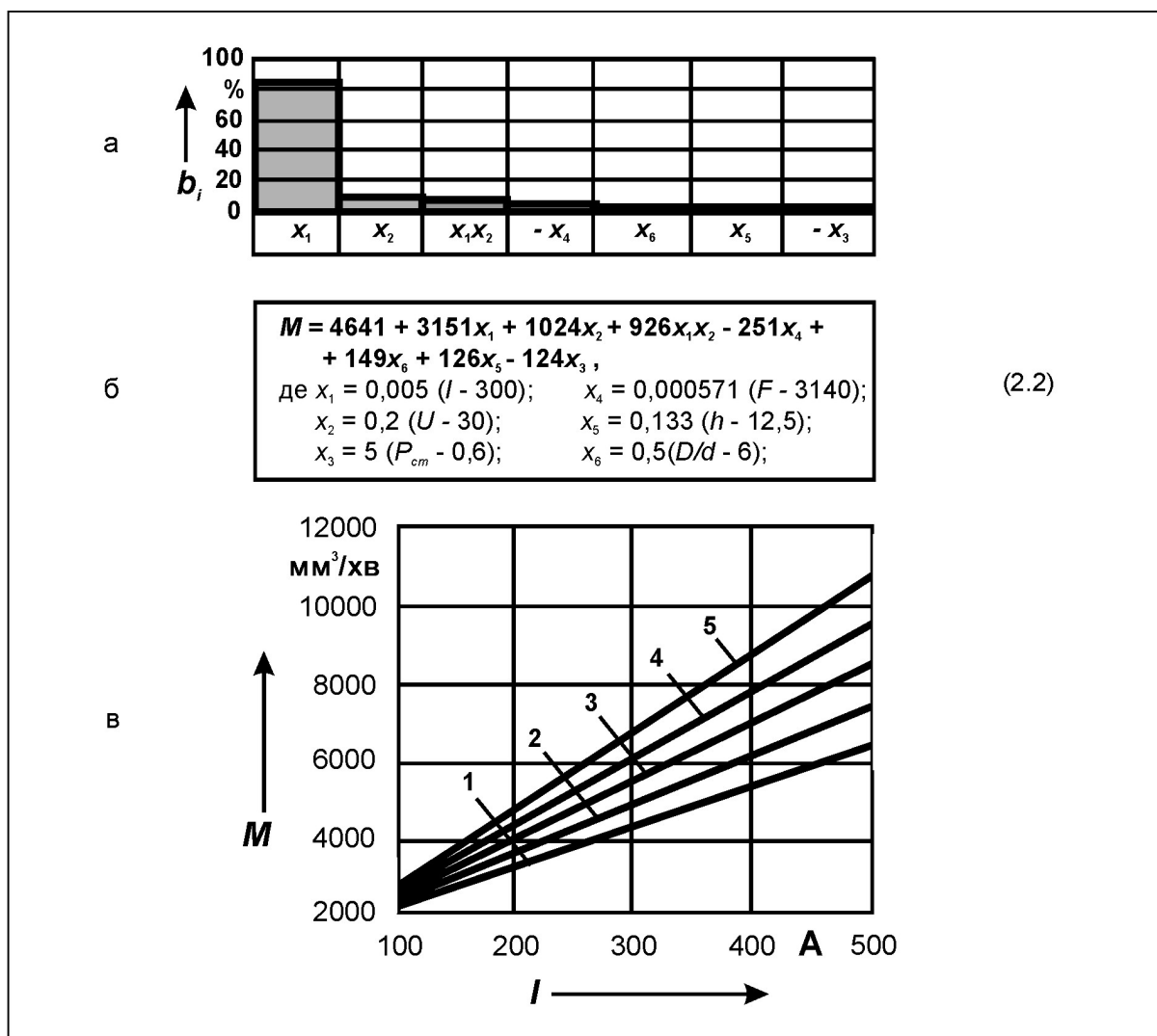


Рис. 2.2. Ступінь впливу факторів на продуктивність обробки  $M$  (а), математична модель  $M$  (б) та залежність (в)  $M$  від  $I$  та  $U$  ( $P_{cm} = 0,4$  МПа;  $F = 1256 \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>;  $h = 20 \times 10^{-3}$  мм; ЕЗ - сталь 45; ЕІ - графіт МПГ7; полярність зворотна; робоча рідина - органічне середовище): 1 -  $U = 25$  В; 2 -  $U = 27,5$  В; 3 -  $U = 30$  В; 4 -  $U = 32,5$  В; 5 -  $U = 35$  В

Тому, для досягнення максимальної продуктивності обробки, зафіксуємо значення сили струму в досліді на верхньому рівні (в даному випадку  $I_{max} = 500$  А) та повторимо процедуру крутого сходження, використовуючи модель  $\gamma_L$ . Результати реалізації дослідів зведені в

таблицю 2.3. Задовільний відносний лінійний знос EI при максимальній продуктивності обробки отримано в дослідах 4-6. Однак параметри  $P_{cm}$  та  $D/d$  в дослідах 5 і 6 виходять за межі допустимого діапазону їх варіювання, що може впливати на вірогідність отриманого результату. Отже, гарантовано оптимальний режим обробки досягається в досліді 4.

Якщо у рамках допустимого діапазону варіювання факторів початкові обмеження не задовольняються, необхідно зменшити силу технологічного струму на деякий крок та повторити процедуру крутого сходження.

Таблиця 2.3

**Оптимізація режиму обробки фасонної малогабаритної порожнини методом крутого сходження за градієнтом при умові  $\gamma_l \leq \gamma_{l(дон)}$  та**

$$M = M_{\max}$$

Фактори	$I, A$ $X_1$	$U, B$ $X_2$	$P_{cm}, \text{МПа}$ $X_3$	$F, \text{мм}^2$ $X_4$	$h, \text{мм}$ $X_5$	$D/d$ $X_6$	$\gamma_l, \%$ $y$
$b_i$	-	-0,42	0,59	-	-	0,47	
$b_i \Delta X_i$	-	-2,1	0,12	-	-	0,94	
Розрахунковий крок	-	0,875	-0,05	-	-	-0,39	
Крок після округлення	-	0,9	-0,05	-	-	-0,4	
$X_{i0}$ (Дослід 0)	500	30,0	0,60	3140	12,5	6,0	2,08
Дослід 1	500	30,9	0,55	3140	12,5	5,6	1,76
Дослід 2	500	31,8	0,50	3140	12,5	5,2	1,44
Дослід 3	500	32,7	0,45	3140	12,5	4,8	1,13
<b>Дослід 4</b>	<b>500</b>	<b>33,6</b>	<b>0,40</b>	<b>3140</b>	<b>12,5</b>	<b>4,4</b>	<b>0,81</b>
Дослід 5	500	34,5	0,35	3140	12,5	4,0	0,49
Дослід 6	500	35,4	0,30	3140	12,5	3,6	0,19

Примітка:  $F = 3140 \text{ мм}^2$ ;  $h = 12,5 \text{ мм}$ ;  $\gamma_{l(дон)} \leq 1\%$

Розглянемо більш складну задачу щодо оптимізації режиму обробки малогабаритної порожнини простої форми в плані, коли разом із обмеженням по зносу EI ( $\gamma_l \leq \gamma_{l(дон)}$ ) висуваються вимоги до якості обробленої поверхні, зокрема до допустимої величині шорсткості донної поверхні порожнини ( $Ra \leq Ra_{(дон)}$ ) при рівномірному її розподілу та рівномірному зносі торцевої поверхні EI. З метою аналітичного розв'язання даної задачі скористуємося системою рівнянь 2.3, що складена із отриманих математичних моделей відносного лінійного зносу EI  $\gamma_l$ ,

шорсткості донної поверхні порожнини на вході потоку в торцевий МЕЗ  $Ra$  та коефіцієнта відносної швидкості потоку на виході із торцевого МЕЗ  $V_{вих}/V_{вх}$ , прийняв параметр  $V_{вих}/V_{вх} = 1 \dots 1,5$ :

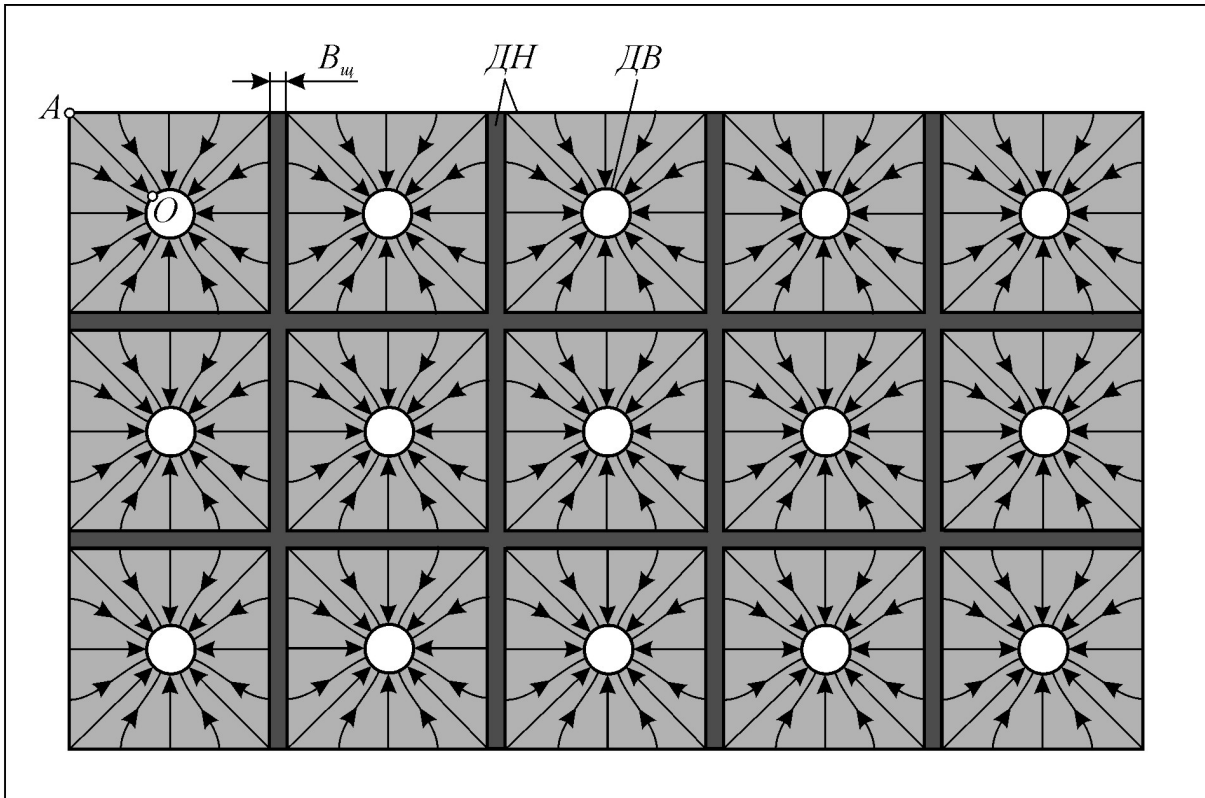
$$\left. \begin{aligned} \gamma_{ш} &= 1,89 + 0,589x_3 - 3,77x_1z_3x_4 - 0,471x_1x_6 - 0,421x_2 + 0,391x_2x_4 + 0,186x_1 \\ Ra &= 43,6 - 11,1x_3 + 9,37x_4 + 9,12x_5 + 6,37x_1 + 3,37x_2 \\ V_{вих}/V_{вх} &= 1,83 - 0,26x_1 - 0,09x_2 + 0,11x_3 + 0,27x_4 - 0,18x_5 + 0,73x_6 \end{aligned} \right\} (2.3)$$

Отже, ми маємо систему із трьох рівнянь, в якій чотири невідомих фактори:  $I$ ,  $U$ ,  $P_{ст}$  та  $D/d$ . Для забезпечення замкнутості системи зафіксуємо параметр  $U$  на постійному рівні, приймаючи до уваги ту обставину, що ступінь впливу напруги на дузі на параметри  $Ra$  та  $V_{вих}/V_{вх}$  – незначна, а реальний діапазон варіювання напруги – досить вузький:  $U = 30 \pm 5$  В. Тепер система рівнянь може бути розв’язана відносно кожного із невідомих факторів.

**Обробка великогабаритних порожнин та порожнин складної форми при використанні способу багатозонного зворотного прокачування.** РОД великогабаритних порожнин та порожнин складної форми в плані, зокрема порожнин кувальних штампів, із використанням способу однозонного зворотного прокачування робочої рідини через торцевий МЕЗ малоефективна, а іноді зовсім не можлива, так як цей спосіб прокачування не забезпечує одночасно усталеності процесу за критерієм  $l_{max}/\delta_{сер}$  та рівномірного розподілу швидкостей потоку в торцевому МЕЗ, що обмежується критерієм  $a_{max}/b_{min}$ .

З метою підвищення ефективності процесу РОД великогабаритних порожнин та порожнин складної форми в плані, запропоновано та розроблено новий спосіб електрофізичної обробки [4], в основу якого покладено спосіб багатозонного зворотного прокачування робочої рідини через торцевий МЕЗ. Спосіб реалізується шляхом виконання

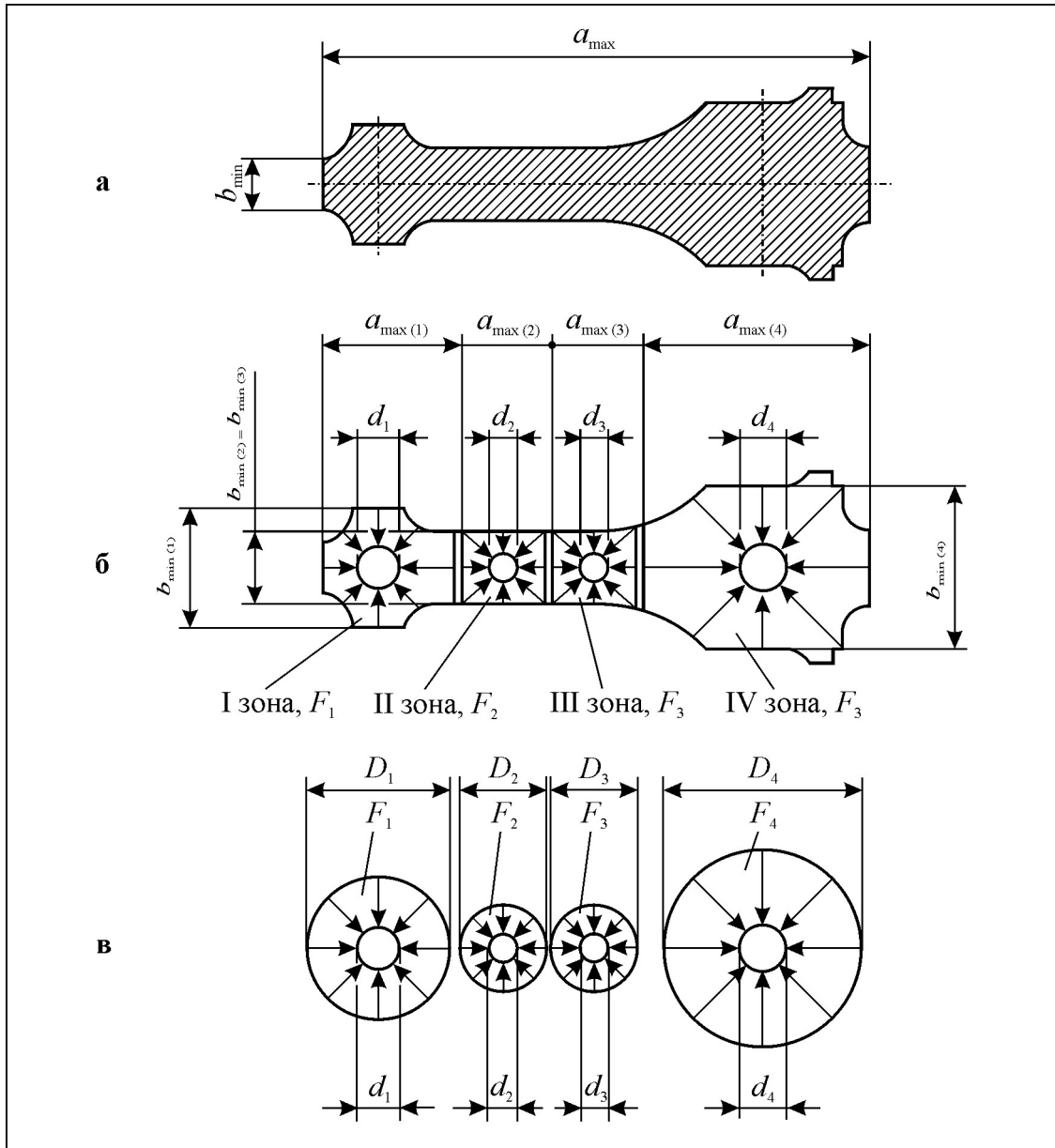
щілиноподібних надрізів на торцевій поверхні ЕІ в напрямку подачі (рис. 2.3), які використовуються для підведення (нагнітання) робочої рідини в торцевий МЕЗ, а також для поділу торцевого МЕЗ в гідравлічному плані на  $n$ -у кількість одиничних зон (гідродинамічних модулів).



**Рис. 2.3. Спосіб багатозонного зворотного прокачування робочої рідини через торцевий МЕЗ: ДН - ділянка нагнітання рідини в торцевий МЕЗ; ДВ - ділянка видалення рідини із торцевого МЕЗ**

Розрахунок кількості одиничних зон прокачування та їх геометричних параметрів (рис. 2.4, а, б) визначається забезпеченням в кожній зоні критерію усталеності процесу РОД за геометричним фактором  $l_{\max (i)}/\delta_{сер (i)} \leq 800$  та пов'язаний із задоволенням в кожній зоні співвідношення  $1 < a_{\max (i)}/b_{\min (i)} \leq 1,5$ .

Виконання вимог цих критеріїв виключає утворення застійних зон в торцевому МЕЗ, так як у межах одиничної зони прокачування реалізується спосіб однозонного зворотного прокачування робочої рідини через торцевий МЕЗ



**Рис. 2.4.** До розрахунку кількості та геометричних параметрів одиничних зон при РОД фасонної порожнини вставки кувального штампа на деталь “Шатун” із використанням способу многозонного прокачування робочої рідини серед торцевий МЕЗ: а - форма порожнини в плані, що задана кресленням; б - схема способу багатозонного прокачування; в - схема зведених до кола одиничних зон (еквівалентна розрахункова схема)

Остання особливість технічного рішення, що пропонується, дозволяє використати описану вище методику, яку розроблену стосовно до малогабаритних порожнин простої форми, для оптимізації геометрії ЕІ і режиму обробки великогабаритних порожнин та порожнин складної

форми в плані. При цьому оптимальний режим обробки за факторами  $I$ ,  $U$  та  $P_{ст}$ , наприклад при умові  $\gamma_l \leq \gamma_{l(дон)}$ , необхідно встановлювати за такою зведеною (по площі) до кола одиничною зоною (рис. 2.4, в), де критерій  $l_{max(i)}/\delta_{сер(i)}$  має максимально можливе значення. Ця зона, яка володіє максимальною площею  $F_i$ , дуже впливає на збільшення відносного лінійного зносу  $EI$ . Останнє підтверджується виразом 2.1. Тоді при встановленому режимі обробки та вибраних параметрах  $D_i/d_i$  гарантується виконання умови  $\gamma_l \leq \gamma_{l(дон)}$  в інших зонах.

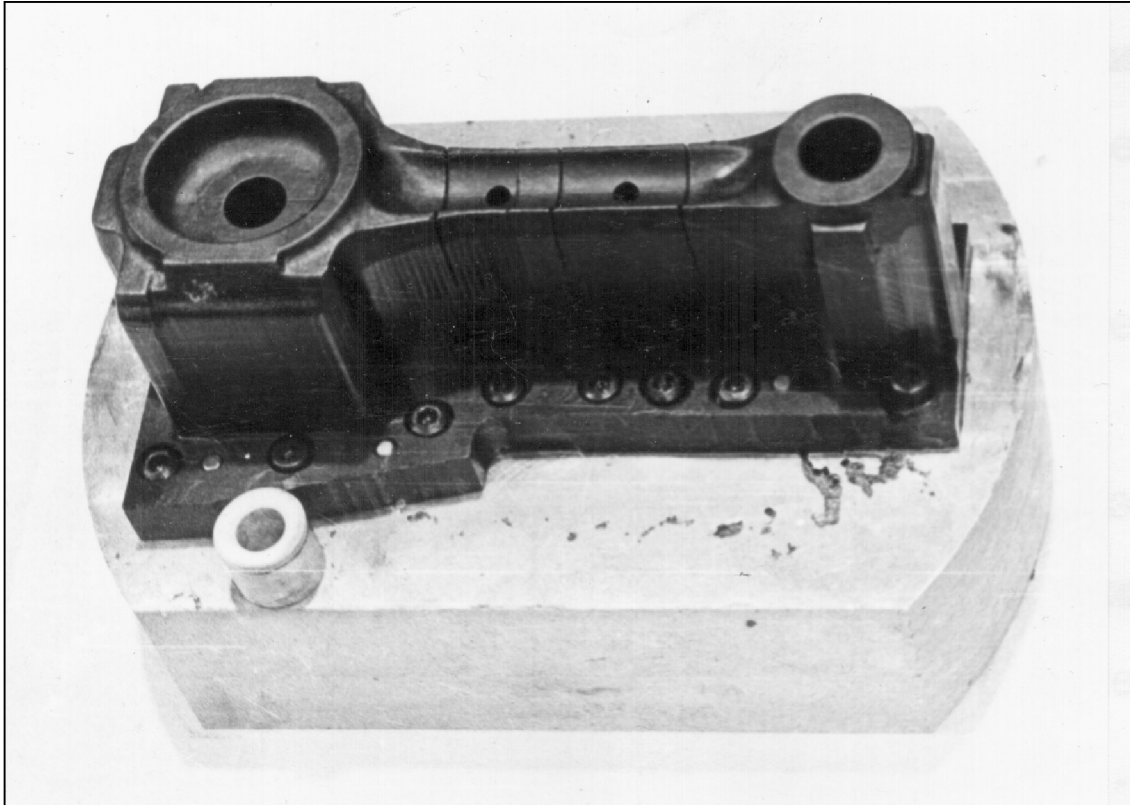
У випадку, коли площі зведених до кола одиничних зон приблизно рівні, вдається реалізувати процес РОД фасонної порожнини при наближеній до постійної швидкості потоку в торцевому МЕЗ, тобто виконати умову (2.4)

$$1,0 < V_{вих}/V_{вх} < 1,5 \quad (2.4)$$

Це дозволяє керувати точністю обробки за рахунок рівномірного лінійного зносу торцевої поверхні  $EI$  та якістю обробленої поверхні за рахунок рівномірного розподілу шорсткості по донній поверхні фасонної великогабаритної порожнини, а також порожнини складної форми в плані.

Нижче наведено методологічний підхід щодо розробки технологічного процесу формоутворення способом РОД фасонної порожнини вставки кувального штампа на деталь «Шатун». Аналіз геометричної форми показує, що дана порожнина є великогабаритною порожниною ( $l_{max}/\delta_{сер} = 190/0,2 = 950 > [l_{max}/\delta_{сер}]_{доп} \leq 800$ ) складної форми в плані ( $a_{max}/b_{min} = 340/48 = 7 > [a_{max}/b_{min}]_{доп} = 1 \dots 1,5$ ) та містить елементи складного рельєфу в області, що відповідає стеблу шатуна ( $\Delta H > 10 \delta_{min}$ ). Це обумовлює застосування багатозонного способу прокачування робочої

рідини через торцевий МЕЗ, для чого, у відповідності з критерієм усталеності процесу РОД за геометричним фактором та з урахуванням критерію  $a_{\max}/b_{\min}$ , поділяють торцевий МЕЗ на чотири зони (див. рис. 2.4) шляхом виконання на ЕІ щілиноподібних надрізів (рис. 2.5).



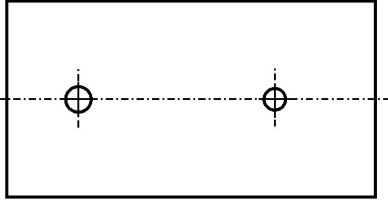
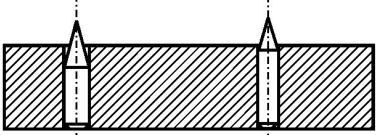
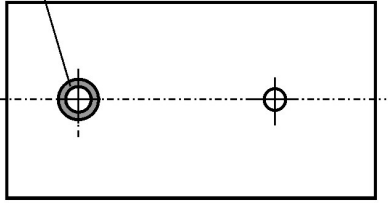
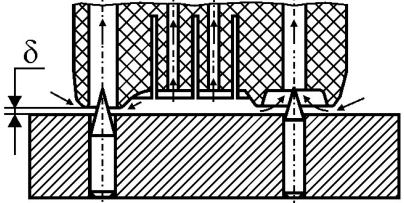
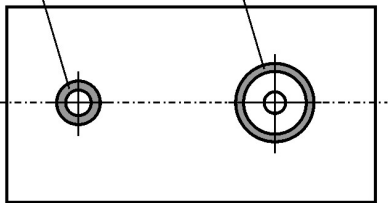
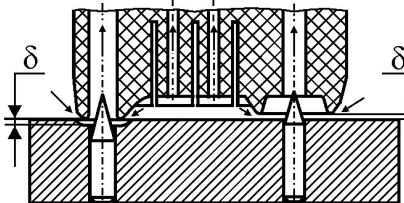
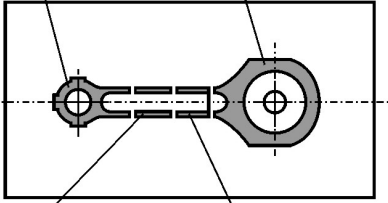
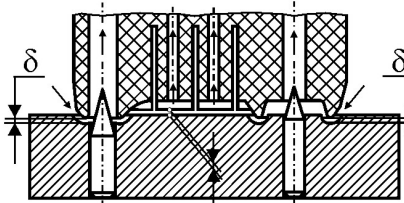
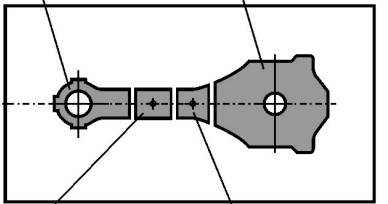
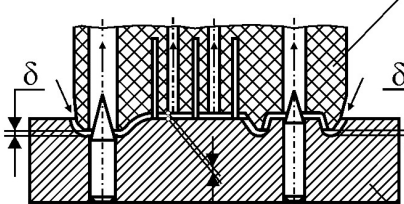
**Рис. 2.5. Електрод-інструмент, що закріплено на електродотримачі для РОД фасонної порожнини вставки кувального штампа на деталь “Шатун”**

При цьому ширину надрізу  $t$  вибираємо із умови не утворення технологічного виступу (перемички) між суміжними зонами:  $t \leq 2 \delta_{n(i)}$ , де  $\delta_{n(i)}$  – торцевий МЕЗ на периферії  $i$ -ої одиничної зони. В центральній частині кожної зони виконуємо технологічний канал в ЕІ, причому, з метою забезпечення процесу обробки без ступінчастого зносу ЕІ діаметри каналів в крайніх зонах приймаємо рівними діаметрам отворів у вставці під виштовхувачі.

Крім того, для запобігання раптового розширення (падіння швидкості) потоку на виході із МЕР та зв'язаним з цим явищем погіршення якості обробки через утворення довгих (зварювальних) дуг, в отвори вставки під виштовхувачі вмонтовані конуси, що формують, які виконують функцію дифузорів. З метою зменшення електроерозійного зносу конусу виготовляють із вуглеграфітового матеріалу марки МПГ-7.

Наявність складного рельєфу з опуклою поверхнею в середньої частині порожнини утрудняє забезпечення рівномірного потоку в МЕР протягом періоду обробки. Для компенсування підвищеної витрати робочої рідини у відкриті середні технологічні канали в ЕІ, що має місце в початковій стадії процесу обробки, використаємо насос із підвищеною витратною характеристикою ( $Q = 600$  л/хв.). Морфологія процесу формоутворення фасонної порожнини вставки кувального штампа на деталь «Шатун» показана на рис. 2.6.

Розрахунок оптимальних параметрів режиму обробки ( $I$ ,  $U$ ,  $P_{cm}$ ) та геометричних параметрів електродів ( $F_i$ ,  $D_i/d_i$ ) здійснювали у відповідності з методикою, що викладена вище, та уточнювали експериментально у зв'язку з тим, що площа обробки найбільшої зони прокачування робочої рідини в торцевому МЕР суттєво виходить за рамки допустимої, що не гарантує адекватність моделей відносного лінійного зносу ЕІ  $\gamma_l$  та шорсткості донної поверхні порожнини  $Ra$  на вході потоку в торцевий МЕР. При цьому виходили із того, що основний об'єм металу порожнини ( $h_{max} = 23$  мм) видаляється при чорновій (попередній) обробки. Обробку здійснювали при наступних умовах:  $\gamma_l \leq \gamma_{l(don)} = 1$  % та  $M = M_{max}$ . Дана задача розв'язувалася методом крутого сходження за градієнтом, що викладено вище. Далі тим ж електродом-інструментом здійснювалася чистова (кінцева) обробка (припуск  $\Delta h = 0,5$  мм) при умові  $Ra \leq Ra_{(don)} = 6,3$  мкм. Дана задача розв'язувалася аналогічно першій.

Етапи робіт		Електроерозійні сліди на ЕЗ (вид у плані)	Осьовий переріз
№ п. п.	Найменування		
0	Вихідна заготовка		
1	Початок формування I зони		
2	Початок формування IV зони		
3	Початок формування II та III зони		
4	Закінчення обробки		

**Рис. 2.6.** Морфологія процесу формування фасонної порожнини вставки кувального штампа на деталь “Шатун”

Вибрані режими та отримані технологічні характеристики процесу РОД фасонної порожнини вставки кувального штампа на деталь «Шатун» зведено в таблицю 2.4

Таблиця 2.4

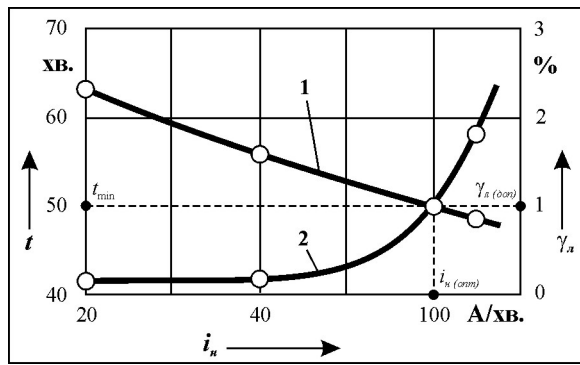
**Режим та технологічні характеристики процесу РОД фасонної порожнини вставки кувального штампа на деталь «Шатун»**

Вид обробки	Режим обробки			Технологічні характеристики				
	$I$ , А	$U$ , В	$P_{ст}$ , МПа	$\gamma_l$ , %	$Ra$ , мкм	$M$ , мм <sup>3</sup> /хв.	$M_a$ , мм <sup>3</sup> /А·хв.	$a$ , кВт·год/кг
Чорнова	450	35	0,4	0,2...0,8	-	11 850	26,3	2,84
Чистова	50	35	1,2	-	3,2...15,6	936	18,7	3,93

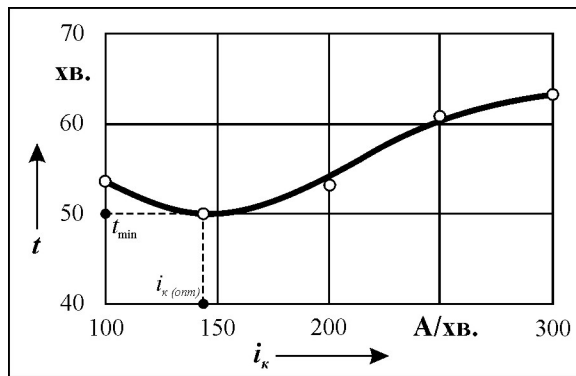
В наслідок експериментального дослідження впливу інтенсивності зміни сили технологічного струму в початковій фазі процесу та при переході від чорнового до чистового режиму на час обробки порожнини встановлено наступні закономірності:

- виявлено існування оптимальної інтенсивності збільшення сили струму  $i_n (onm)$  в початковій фазі процесу (рис. 2.7), нижче якої час обробки порожнини  $t$  збільшується, а вище якої відносний лінійний знос  $EI$  неприпустимо зростає ( $\gamma_l > \gamma_l (don)$ ). Підвищення зносу  $EI$ , як видно, пов'язано з його термічним руйнуванням від миттєвого збільшення густини струму вище допустимої величини в перерізі  $EI$  поблизу торцевої поверхні, що відповідає малій площі робочого контакту  $EI$  з  $E3$  (див. рис. 2.6), що підтверджується роботою [5, с. 66];

- виявлено існування екстремальної залежності часу обробки порожнини  $t$  до заданої шорсткості ( $Ra \leq Ra_{(don)}$ ) від інтенсивності зниження сили струму  $i_k$  при переході від чорнового до чистового режиму (рис. 2.8). Найменший час зафіксовано при  $i_k = i_k (onm)$ . Можна припустити, що вказаний вище режим близький до такого теоретичного режиму, при якому глибина одиначної лунки (сліду) дорівнює найбільшій висоті профілю на попередньому переході, що іде із роботи [6, с. 129].



**Рис. 2.7.** Залежності часу обробки порожнини  $t$  (1) та відносного лінійного зносу ЕІ  $\gamma_L$  (2) від інтенсивності підвищення сили технологічного струму  $i_n$  в початковій фазі процесу РОД порожнини вставки кувального штампу на деталь “Шатун”



**Рис. 2.8.** Залежність часу обробки порожнини  $t$  від інтенсивності пониження сили технологічного струму  $i_k$  при переході від чорнового до чистового режиму процесу РОД порожнини вставки кувального штампу на деталь “Шатун”

Методика кількісної оптимізації перехідного режиму від чорнової до чистової РОД порожнин кувальних штамів базується на наступних міркуваннях. Характерним геометричним елементом порожнин кувальних штамів є штампувальні уклони, що зменшують зусилля вилучення з них штаповок. Вони змінюються у межах від  $3^\circ$  до  $11^\circ$ . Саме тому, розглядаючи порожнину кувального штампу як об’єкт РОД, звернемо увагу на те, що принципово внутрішня поверхня порожнини, яка обробляється, може складатися із однієї (наприклад, сферичної поверхні) або декількох торцевих поверхонь (наприклад, із торцевих поверхонь 1, 2, 3, що показано на рис. 2.9), тобто завжди не має бічних зовнішньої та внутрішньої поверхонь, паралельних напрямку подачі ЕІ. Дані геометричні особливості поверхонь порожнин кувальних штамів, що обробляються, дозволяють здійснювати їх попередню високопродуктивну чорнову та

подальшу чистову РОД із застосуванням лише одного ЕІ і тим самим інтенсифікувати процес обробки.

В загальному випадку припуск на чистову обробку  $\Pi_{\text{чист}}$  складається із мінімального припуску  $z_{\text{min}}$  та величини  $\Delta z$ , що ураховує можливі неточності розрахунків, що викликані колюванням режиму обробки та фізичних властивостей електродів

$$\Pi_{\text{чист}} = z_{\text{min}} + \Delta z. \quad (2.5)$$

Звичайно приймають  $\Delta z = (0,02 \dots 0,1) \cdot 10^{-3}$  м.

Проблемним питання є оптимізація перехідного режиму від чорнової до чистої РОД. Так, якщо за мінімальний припуск на чистову РОД  $z_{\text{min}}$  прийняти середню висоту мікронерівностей профілю після чорнової РОД  $Rz_0$ , то задача зводиться до визначення такого режиму обробки, при якому припуск  $z_{\text{min}}$  буде зруйновано за мінімально можливий час, а шорсткість обробленої поверхні порожнини досягне заданого ( $Rz_n$ ) рівня (рис. 2.9).

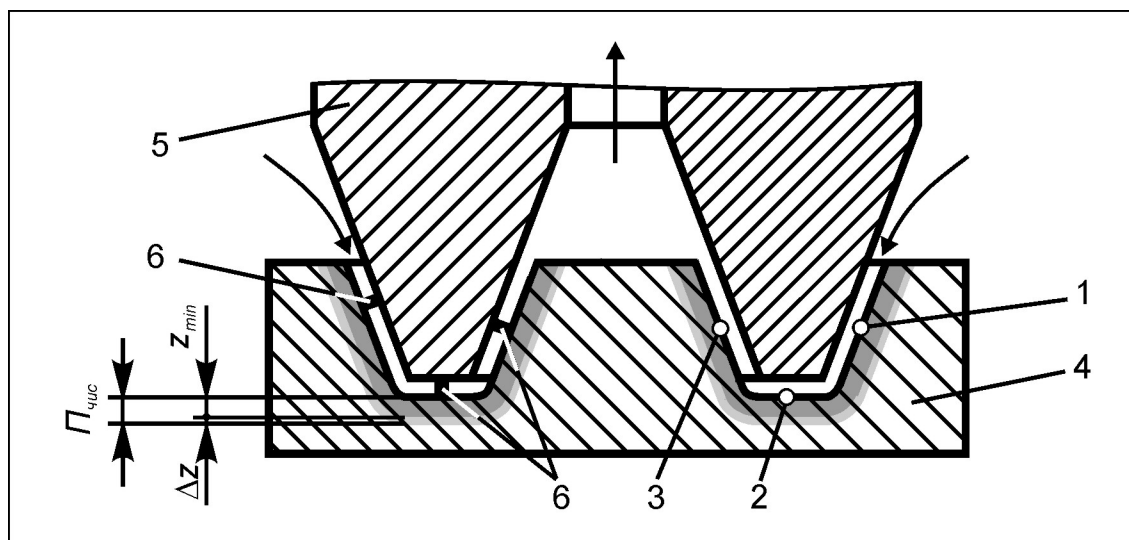


Рис. 2.9. Схема взаємного розташування електродів після завершення чорнової РОД порожнини кувального штампу перед подальшим зніманням припуску  $\Pi_{\text{чист}}$  під чистову обробку: 1, 2, 3 - торцеві поверхні ЕЗ, що обробляються; 4 - ЕЗ; 5 - ЕІ; 6 - електрична дуга

В роботі Фотєєва М. К. [6, с. 129, 130] запропоновано принцип рішення аналогічної задачі для електроімпульсної обробки. Відповідно з даним принципом подальший (після чорнового) перехідний режим обробки змінюють послідовно та дискретно із умови утворення нової  $n$ -поверхні елементарними лунками, глибина яких  $h_n$  дорівнює висоті мікронерівностей  $Rz_{n-1}$  на попередньому режимі обробки, тобто, коли виконується умова

$$h_n = Rz_{n-1}, \quad (2.6)$$

де співвідношення параметрів  $n$ -переходу  $h_n$  та  $Rz_n$

$$k = \frac{h_n}{Rz_n} \quad (2.7)$$

отримало назву коефіцієнта пропорційності, який приймається в розрахунках постійним для всіх режимів. Але наведена в тієї ж роботі формула для визначення мінімальної кількості  $n$  переходів зміни режиму не підтверджується експериментом, бо при її виведенні не врахований один з переходів. Саме тому, розраховане за даною формулою значення параметра  $n$  є завищеним.

Для аналітичного визначення кількості переходів  $n$ , що забезпечують знімання припуску  $z_{min}$  при чистовій РОД, з урахуванням вказаного вище принципу та виразу (4.18), запишемо наступні співвідношення для перехідних режимів з чорнової до чистової РОД (рис. 4.24):

$$- \text{ I перехід: } Rz_1 = \frac{h_{z(1)}}{k} = \frac{Rz_0}{k}; \quad (2.8)$$

$$- \text{ II перехід: } Rz_2 = \frac{h_{л(2)}}{k} = \frac{Rz_1}{k} = \frac{Rz_0}{k^2}; \quad (2.9)$$

$$- \text{ n-перехід: } Rz_n = \frac{h_{л(n)}}{k} = \frac{Rz_0}{k^n}. \quad (2.10)$$

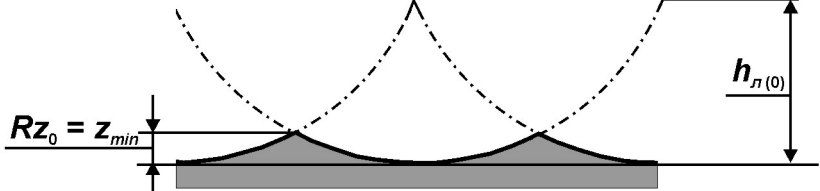

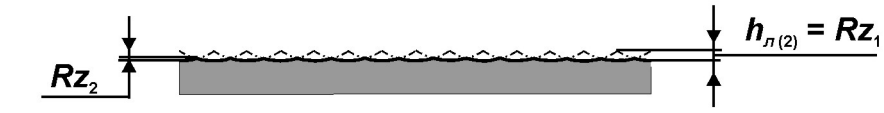

Поверхня після чорної РОД	
Перший перехід	
Другий перехід	
n-перехід	

Рис. 2.10. До розрахунку мінімальної кількості  $n$  перехідних режимів з чорної до чистої РОД при зменшенні шорсткості поверхні, що обробляється, від  $Rz_0$  (чорнова обробка) до  $Rz_n$  (чистова обробка)

Після логарифмування виразу (2.10) та перетворень маємо формулу (2.11) для розрахунку кількості переходів  $n$ , що відповідає найменшому часу РОД перехідного режиму

$$n = \frac{\lg Rz_0 - \lg Rz_n}{\lg k}. \quad (2.11)$$

При перехідному режимі з чорнової до чистої РОД доцільно керувати одним, рідше двома, найбільш впливовими на шорсткість поверхні факторами, наприклад статичним тиском робочої рідини на вході потоку в МЕР або силою технологічного струму. При цьому останні фактори ( $U, F, h, D/d$ ) слід зафіксувати на постійному рівні.

Після визначення кількості переходів  $n$  за виразом (2.11) та рівнів шорсткості поверхні  $Rz_1, Rz_2, \dots, Rz_n$  за формулами (2.9)...(2.10), розраховують чисельні значення вибраного для регулювання шорсткості фактора ( $P_{cm}$  або  $I$ ) для кожного переходу з використанням відповідних математичних моделей шорсткості поверхні після РОД.

Контроль моменту, що відповідає завершенню певного переходу, та призначенню нового режиму обробки, доцільно здійснювати за допомогою годинникового індикатора глибини прошивання (точність –  $0,01 \cdot 10^{-3}$  м). Даний момент характеризується гарантованим завищенням розрахункового мінімального припуску  $z_{min}$  на чистову РОД на  $(0,01 \dots 0,002) \cdot 10^{-3}$  м. При цьому, для забезпечення потрібної точності обробки порожнини кувального штампу, сумарне завищення припуску за  $n$  переходів не повинне перевищувати величини  $\Delta z$  в формулі (2.5).

Вірогідність запропонованої методики кількісної оптимізації перехідного режиму від чорнової до чистої РОД порожнин підтверджується багаточисельними експериментальними перевірками на зразках та при реалізації реальних технологічних процесів, зокрема при РОД порожнин кувальних штампів. Так, при РОД порожнин, площею в плані  $(7 \dots 8) \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup> та глибиною  $25 \cdot 10^{-3}$  м в ЕЗ із сталі 5ХНМ, за рахунок кількісної оптимізації перехідного режиму, порівняно з чистою РОД на одному режимі, досягається зменшення часу перехідного режиму в 8...9 разів (з 40...46 хв. до 4,5...5 хв.) при зменшенні шорсткості поверхні, що

обробляється, з  $Rz_0 = 500$  мкм (чорнова обробка) до  $Rz_n = 6,3$  мкм (чистова обробка).

Графік оптимальної зміни сили технологічного струму та глибини обробки у часі для чорнової і чистової РОД фасонної порожнини вставки кувального штампу на деталь «Шатун» наведено на рис. 2.11. Обробка здійснювалася на електроерозійному копіювально-прошивному верстаті моделі «Дуга-11». Найменший час обробки цієї вставки (рис. 2.12) – 50 хвилин. Показово, що для обробки цієї вставки електроімпульсним методом на базовому підприємстві (м. Мінськ, ВО «Мінський тракторний завод») витрачається 7...9 годин в залежності від ступеня забруднення робочої рідини у ванні верстату.

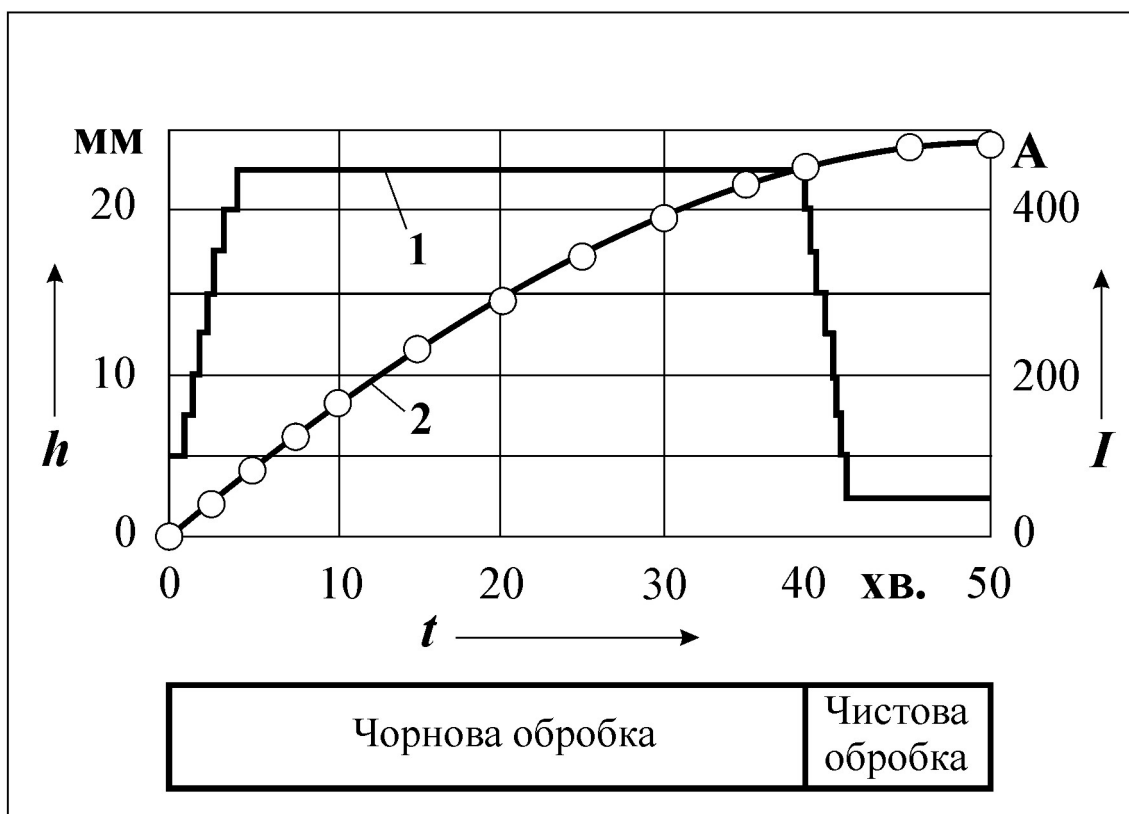
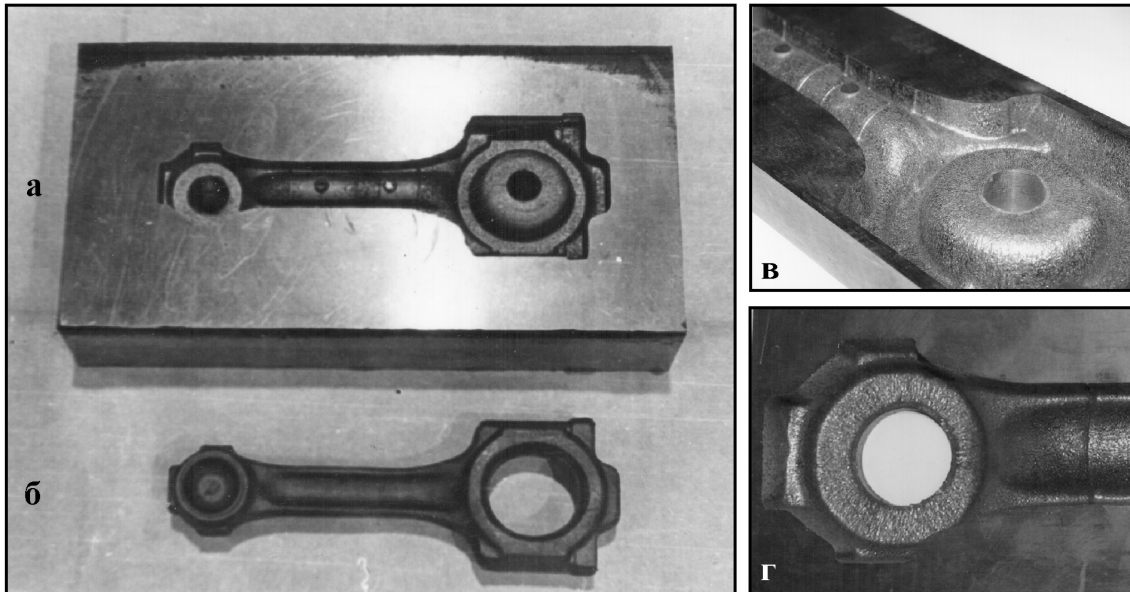


Рис. 2.11. Експериментальний графік оптимальної зміни сили технологічного струму  $I$  (1) та глибини обробки  $h$  (2) у часі  $t$  для чорнової та чистової РОД порожнини вставки кувального штампу на деталь «Шатун»

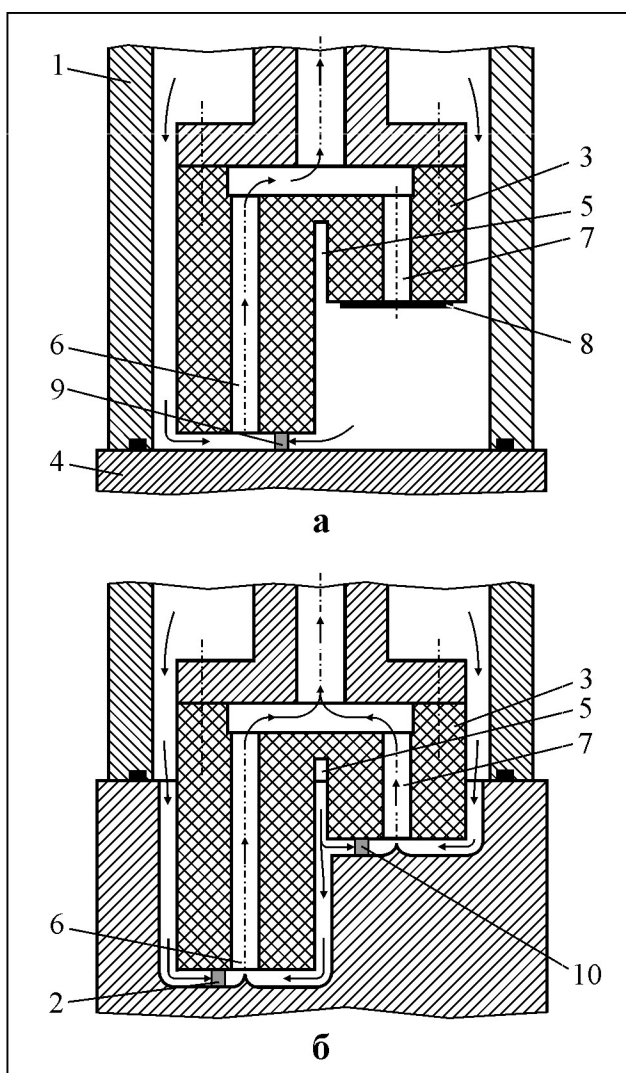


**Рис. 2.12.** Вставка кувального штампа на деталь “Шатун” після РОД: а - загальний вигляд; б - поковка шатуна; в - фрагмент великої головки; г - фрагмент малої головки

Результати дослідження шорсткості обробленої поверхні показали, що в основній частині порожнини (бічні стінки, та перехідні радіусні елементи між бічною стінкою та донною поверхнею) спостерігається шорсткість  $Ra = 3,2...6,3$  мкм; на донній поверхні порожнини, що відповідає головкам шатуна -  $Ra = 6,3...9,4$  мкм; на опуклій частині порожнини, що відповідає місцям сполучення головок шатуна зі стеблом, -  $Ra = 9,4...15,6$  мкм. Такий розподіл шорсткості обробленої поверхні, як показала практика, є оптимальним з точки зору можливості запобігання залипанню поковки, що штампується, у штампі. Останнє підтверджується роботами ЕНІМВ, м. Москва [7] та Фотеева М. К. [6]. Вищевикладене дозволяє, з урахуванням позитивних результатів щодо точності обробки (до 0,1 мм при  $\gamma_n = 0,2...0,8$  %), рекомендувати використання високопродуктивного процесу РОД для остаточної обробки порожнин кувальних штампів без додаткового слюсарного доведення, що скасовує тяжку та шкідливу ручну працю на цій операції та вивільняє робітників.

Промислова експлуатація кувальних штамів на Херсонському комбайновому заводі, що оброблені способом РОД без подальшого слюсарного доведення, також підтверджує вищевикладене та показує двократне збільшення стійкості штамів, що спостерігається за рахунок зміцнення поверхні після РОД та організації її оптимального мікрорельєфу, який здатний утримувати мастило при штампуванні.

**Обробка порожнин складного рельєфу при використанні способу багатозонного зворотного прокачування.** Методичний підхід щодо



**Рис. 2.13.** Схема початкової (а) та кінцевої (б) стадії процесу РОД порожнини складного рельєфу з використанням тонкої пластини

оптимізації режиму обробки та геометричних параметрів ЕІ порожнин складного рельєфу такої же, як до великогабаритних порожнин та порожнин складної форми в плані. Відміна полягає лише в способі організації рівномірного прокачування робочої рідини через торцевий МЕЗ.

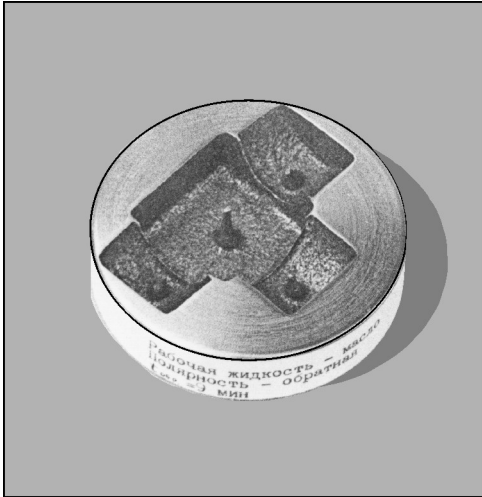
Оскільки ця задача ефективно не вирішується відомими засобами, запропоновано та розроблено спосіб електрофізичної обробки [8], який відрізняється тим, що канали ЕІ, які в початковій стадії процесу обробки не знаходяться в робочому контакті з поверхнею заготовки, що обробляється (тобто де  $\Delta H >$

10  $\delta_{\min}$ , див. табл. 2.1), попередньо закривають електропровідними пластинами.

На рис. 2.13 показано схему початкової (а) та кінцевої (б) стадій процесу РОД порожнини складного рельєфу з плоскою (або опуклою) торцевою поверхнею ЕІ, що має канал 7, який не знаходиться в робочому контакті з поверхнею, що обробляється. Процес обробки даної порожнини здійснюється в герметичній камері 1. Електрична дуга 2, що живиться джерелом постійного струму, горить між ЕІ 3 та ЕЗ 4 в поперечному потоці робочої рідини. При цьому робоча рідина нагнітається в МЕП безпосередньо із герметичної камери 1, а також із щілиноподібного надрізу 5 на ЕІ 3, що розташований між суміжними зонами прокачування робочої рідини в торцевому МЕЗ. Вилучення робочої рідини із зони обробки здійснюється через канали 6, 7. Рівномірне прокачування робочої рідини через торцевий МЕЗ протягом періоду обробки досягається за рахунок попереднього закриття каналу 7 електропровідним матеріалом 8, що володіє низькою електроерозійною стійкістю (наприклад, шляхом заклеювання каналу алюмінієвою фольгою). Це унеможливорює підвищену витрату робочої рідини крізь цей канал в початковій стадії процесу обробки та створює оптимальні гідродинамічні умови горіння дуги 9 в початковій стадії процесу обробки в площині, що обслуговується каналом 6. Відкриття каналу 7 здійснюється в автоматичному режимі шляхом електроерозійного руйнування матеріалу 8 електричною дугою 10 в момент робочого контакту його з ЕЗ 4, що забезпечує рівномірне прокачування робочої рідини в торцевому МЕЗ в кінцевій стадії процесу. В деяких випадках доцільно закривати канали в ЕІ швидкозмінними алюмінієвими ковпачками, які суттєво скорочують час переналадження ЕІ.

Спосіб РОД порожнин складного рельєфу, що пропонується, завдяки стабілізації гідродинамічного режиму робочої рідини в торцевому МЕЗ,

дозволяє стабілізувати технологічні характеристики якості донної поверхні порожнини ( $Ra$ ,  $H$ ), так як останні головним чином залежать від гідродинамічного фактору (див. вирази 3.13, 3.16). Приклад реалізації даного способу показано на рис. 4.12.



**Рис. 2.14. Зразок порожнини складного рельєфу кувально-го штампа на деталь “Трійник” після РОД**

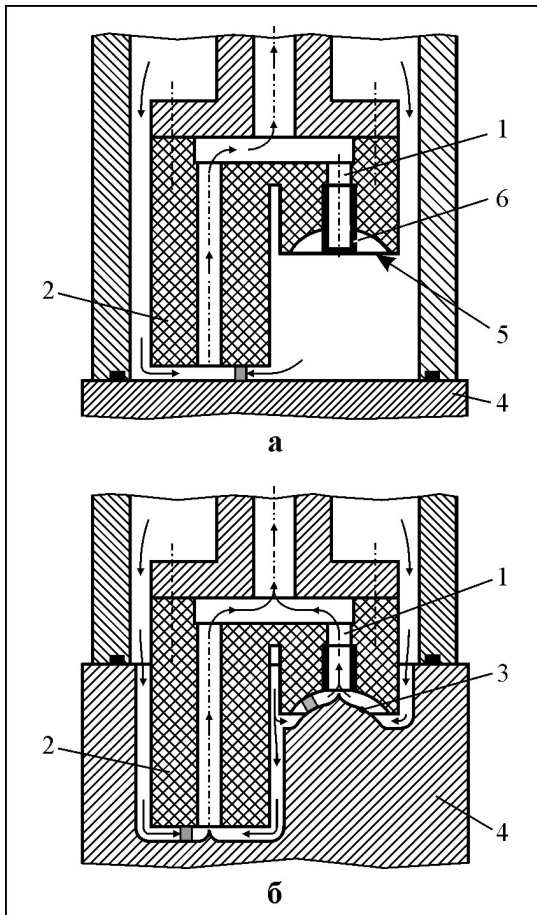
Якщо канали в ЕІ, які не знаходяться в початковій стадії процесу обробки у робочому контакті з ЕЗ, виходять на увігнуту торцеву поверхню ЕІ, то попередньо закриті канали приведуть до дестабілізації процесу в момент початку формування опуклої поверхні ЕЗ, так як воно почнеться раніше, ніж відкриється канал. За даною причиною утворюються довгі (зварювальні) дуги з малою концентрацією енергії в розряді, оскільки локальна швидкість потоку а МЕЗ поблизу розряду в початковий момент формування опуклої поверхні ЕЗ дорівнює нулю. З метою розширення технологічних можливостей процесу РОД порожнин складного рельєфу необхідно використати один із перерахованих нижче прийомів:

- прийом І. Підвищена витрата робочої рідини в відкритих каналах, що відповідають опуклої частині порожнини, компенсується підвищеною витратною характеристикою насосної установки. Даний прийом з економічної точки зору ні є ефективним, так як з його застосуванням собівартість процесу РОД фасонних порожнин зростає. Проте, внаслідок

універсальності та простоти реалізації він знаходить широке застосування для РОД порожнин складного рельєфу;

- прийом II. Технологічні канали в ЕІ, що відповідають опуклої поверхні ЕЗ, в початковій стадії процесу перекривають кранами, а при досяганні глибини обробки, що відповідає початку формування опуклої поверхні, крани відкривають. Цей прийом незручний тим, що потребує від оператора підвищеної уваги. Так, якщо оператор не відкриє своєчасно крани, початок формування опуклої поверхні буде здійснюватися практично при нульовій швидкості потоку в МЕР, внаслідок чого процес дестабілізується. Якщо оператор відкриє крани раніше потрібного часу, то це може привести до різкого зменшення швидкості потоку в зоні робочого контакту ЕІ з ЕЗ, так як потік за законом найменшого гідравлічного опору спрямовується переважно у відкриті канали. Це приведе до дестабілізації процесу та до різкого погіршення якості поверхонь порожнини, що обробляється;

- прийом III (рис. 2.15). Технологічні канали 1 в ЕІ 2, що відповідають опуклої поверхні 3 ЕЗ 4, попередньо подовжують до горизонтальної поверхні 5, яка відповідає початку формування опуклої поверхні, та закривають шляхом встановлення в ЕІ тонкостінних ковпачків 6 (заглушок). Останні виготовляють із електропровідного матеріалу, що володіє низькою електроерозійною стійкістю, наприклад, із алюмінію. При досяганні початку формування випуклої поверхні порожнини між торцевою поверхнею ковпачка та поверхнею ЕЗ збуджується електрична дуга, внаслідок чого торцева стінка ковпачка руйнується, відчиняючи доступ в канал 1 робочої рідини. Цей прийом дозволяє автоматизувати процес керування гідродинамічним режимом робочої рідини в зоні обробки при РОД порожнин складного рельєфу з опуклою поверхнею.

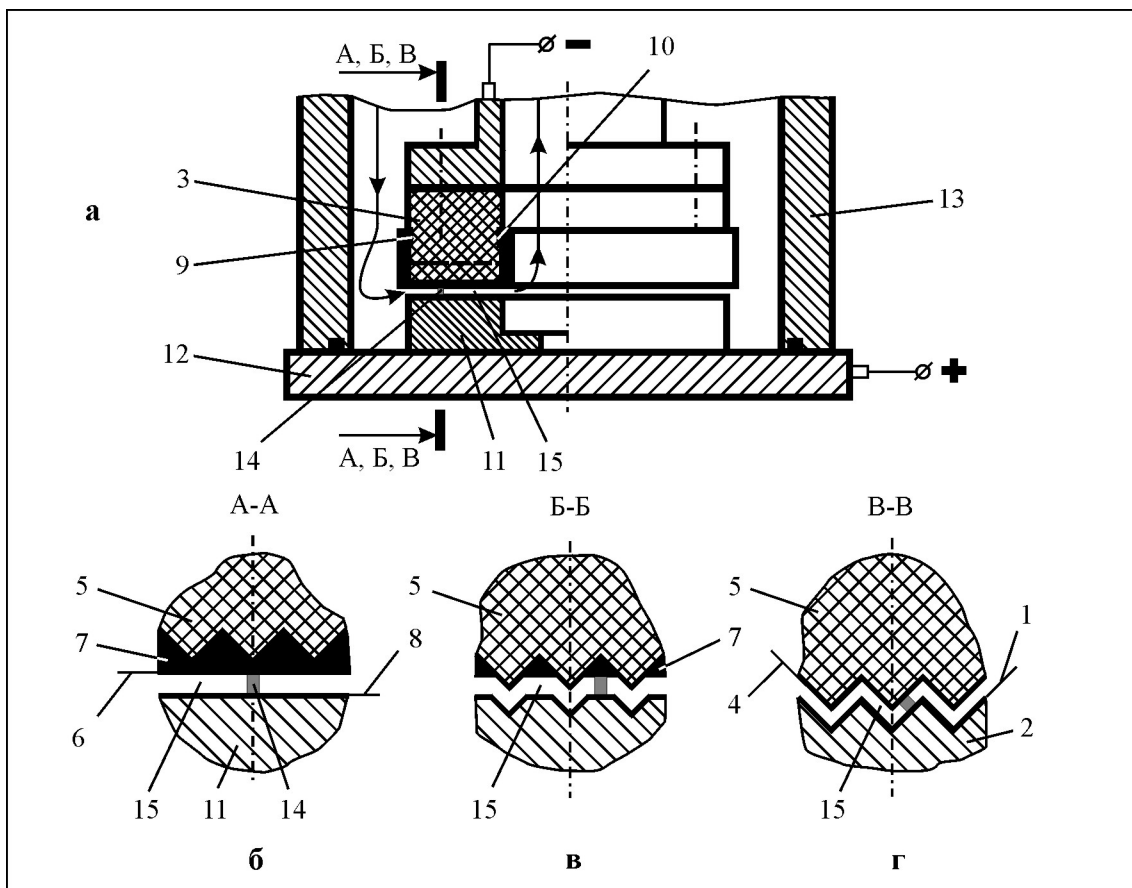


**Рис. 2.15. Схема початкової (а) та кінцевої (б) стадії процесу РОД порожнини складного рельєфу з використанням тонкостінного ковпачка**

Слід відмітити, що складний рельєф порожнини може утворюватися і за рахунок похилого дна, або мати на ньому елементи похилої поверхні. Жодний із трьох прийомів, які наведено вище, не вирішує проблему забезпечення оптимальних параметрів прокачування робочої рідини в торцевому МЕЗ біля гострого краю ЕЗ, де в початковій фазі процесу горить електрична дуга. Так, в початковій фазі процесу обробки електричною дугою торцевої поверхні з орієнтованим перпендикулярно радіальному напрямку складним рельєфом, наприклад при обробки V-подібних дрібних зубів муфти моменту, робоча рідина вільно (без опору) прокачується між плоскою поверхнею електрода-заготовки та рельєфною поверхнею електрода-інструмента, тобто тече по лінії найменшого опору, а в міжелектродному зазорі, де саме горить дуга, в зв'язку з великим гідравлічним опором, робоча рідина практично не тече. В наслідок цього, між електродами збуджується звичайна (не стиснута

дуга), яка за своїми параметрами наближається до зварювальної, і не може вести розмірну обробку. Міжелектродний зазор швидко шлакується (бо швидкість рідини в зазорі значно нижче критичної), виникають короткі замикання, процес дестабілізується та припиняється.

З метою розширення технологічних можливостей способу розмірної обробки електричною дугою торцевих поверхонь складного рельєфу, запропоновано обробку здійснювати двошаровим електродом-інструментом оригінальної геометрії [9].



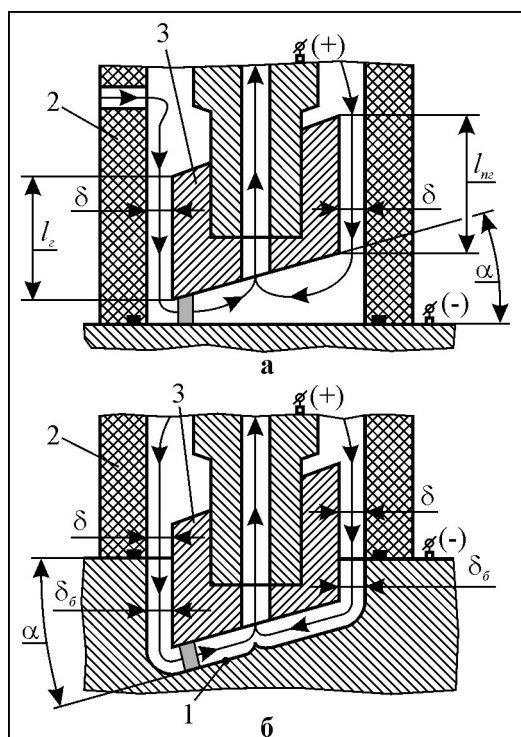
**Рис. 2.16. Фази реалізації способу обробки дугою дрібних зубів муфти моменту з використанням двошарового електрода-інструмента: а - початкова фаза (радіальний переріз); б - початкова фаза (поперечний переріз А-А); в - проміжн фаза (поперечний переріз Б-Б); г - кінцева фаза (поперечний переріз В-В)**

На рис. 2.16, як приклад, наведено характерні фази обробки електричною дугою торцевої поверхні з орієнтованим перпендикулярно

радіальному напрямку складним рельєфом 1 виробу 2 (обробка дрібних зубів муфти моменту), яку здійснюють двошаровим електродом-інструментом 3. Останній виготовляють за наступною технологією. Торцеву робочу поверхню 4 внутрішнього шару 5 виконують еквідистантно поверхні виробу 1. Внутрішній шар 5 виготовляють із вуглеграфітового матеріалу марки МПГ-7, що володіє високою електроерозійною стійкістю. Торцеву робочу поверхню 6 зовнішнього шару 7 виконують еквідистантно поверхні електрода-заготовки 8, тобто плоскою. Зовнішній шар 7 виготовляють із матеріалу, який володіє низькою електроерозійною стійкістю, наприклад із сплаву Вуда, свинцю тощо. Закріплення зовнішнього шару на внутрішньому здійснюється шляхом занурення твердого внутрішнього шару в розплав із матеріалу зовнішнього шару до проточок 9, 10 з подальшим його охолодженням. Перед обробкою електрод-заготовку 11 виробу 2 закріплюють нерухомо на плиті 12 електроерозійного верстата, а двошаровий електрод-інструмент 3 – на його шпинделі. Робочу зону верстата закривають герметично камерою 13. Для обробки в камеру нагнітають під технологічним тиском 0,2...2 МПа робочу рідину (як правило органічне середовище) за напрямком від периферії до центру двошарового електрода-інструмента 3. Вмикають постійний технологічний струм і ведуть процес обробки електрода-заготовки 11 електричною дугою 14 з використанням автоматичного регулятора торцевого міжелектродного зазору 15. Завдяки тому, що в початковий момент обробки торцева робоча поверхня 6 зовнішнього шару 5 еквідистантна (в даному випадку паралельна) поверхні 8 ЕЗ 11, обробка здійснюється при постійному торцевому МЕЗ 15. Саме ця умова дозволяє забезпечити оптимальні гідродинамічні умови для горіння електричної дуги 14 у будь-якій точці МЕЗ 15. Зовнішній шар 7 на ЕІ 9, завдяки низькій електроерозійній стійкості, легко та швидко руйнується електричною дугою 14 та поступово вивільняє внутрішній шар 5, який, власне, і

відповідає за точність формоутворення поверхні складного рельєфу 1, так як його виготовлено із електроерозійно-стійкого матеріалу. Протягом всього процесу обробки торцевий міжелектродний зазор 15 підтримується постійним, що забезпечує стабільний гідродинамічний режим обробки, а отже, стабільну точність формоутворення складного рельєфу.

В роботі [2] зроблено спробу щодо РОД порожнини з похилим дном 1 за рахунок використання локальної герметичної камери 2, яка охоплює ЕІ 3 з зазором  $\delta$ , що дорівнює бічному МЕЗ  $\delta_\delta$  (рис. 2.17).



Даний зазор створює додатковий штучний опір витіканню потоку в торцевий зазор. Зменшуючи довжину цього зазору з боку гострого кута ЕІ  $\alpha$  (відстань  $l_z$ ) та збільшуючи довжину цього зазору з боку протилежному гострому куту ЕІ  $\alpha$  (відстань  $l_{nz}$ ) можна підвищити витрату робочої рідини крізь торцевий МЕЗ поблизу гострого кута і тим самим керувати розподілом потоку в торцевому МЕЗ. Дане технічне рішення у вигляді способу обробки захищено патентом України на винахід [10]. Спосіб, що

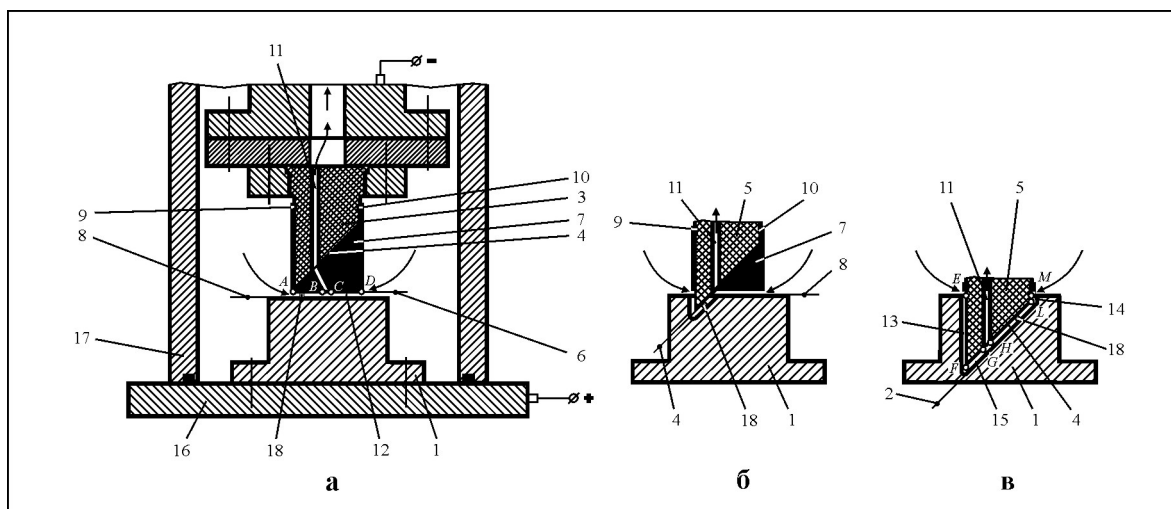
пропонується, дозволяє розмірно обробляти електричною дугою порожнини з кутом нахилу донної поверхні до  $12,5^\circ$ .

Слід відмітити, що збільшення кута нахилу донної поверхні приводить до дестабілізації процесу, викликаного суттєвою складністю керування перерозподілом потоку в торцевому МЕЗ з метою забезпечення оптимального гідродинамічного режиму.

Саме тому подальше удосконалення способу розмірної обробки електричною дугою торцевих поверхонь складного рельєфу з використанням для формоутворення двошарового електрода-інструмента відбувалося у напрямку забезпечення оптимального гідродинамічного режиму потоку робочої рідини в торцевому зазорі при обробці торцевої поверхні з підвищеною складністю рельєфу. Представником такої поверхні є порожнина із значно похилим дном. Останнє пов'язано з тим, що гідродинамічні умови процесу в початковій та кінцевій фазах обробки значно відрізняються. Так, в початковій фазі обробки гідравлічний опір течії робочої рідини в торцевому зазорі як правило симетричний відносно технологічного каналу в ЕІ, в той же час в кінцевій фазі обробки – значно несиметричний. Це приводить до того, що електрична дуга в різних точках торцевого зазору в кінцевій фазі обробки горить в різних гідродинамічних умовах, що визначає різну якість обробленої поверхні. Більш того, коли різниця в швидкостях потоку вийде за критичну межу, процес дестабілізується та може зовсім зупинитися. Крім того, даний спосіб не забезпечує обробку великогабаритних торцевих поверхонь складного рельєфу, так як із підвищенням розміру поверхні підвищується довжина траси евакуації продуктів ерозії із торцевого зазору, продуктивність суттєво падає, а процес затухає.

У відповідності із способом, що пропонується [11], розмірну обробку порожнини із значно похилим дном (рис. 4.16) в ЕЗ 1, як торцевої поверхні

складного рельєфу 2, здійснюють двошаровим ЕІ 3, який виконано за наступною технологією.



**Рис. 4.16.** Фази реалізації способу обробки дугою круглої порожнини із значно похилим дном з використанням двошарового електрода-інструмента: а - початкова фаза; б - проміжна фаза; в - кінцева фаза

Торцеву робочу поверхню 4 внутрішнього шару 5 виконують еквідистантно поверхні 2 похилого дна порожнини в ЕЗ 1. Внутрішній шар 5, як у вище описаному випадку, виготовляють із електроерозійно-стійкого матеріалу, наприклад із вуглеграфітового матеріалу марки МПГ-7. Торцеву робочу поверхню 6 зовнішнього шару 7 виконують еквідистантно поверхні 8 ЕЗ 1. Зовнішній шар 7 виготовляють із матеріалу, який володіє низькою електроерозійною стійкістю, наприклад, із сплаву Вуда. Закріплення зовнішнього шару 7 відносно внутрішнього 5 здійснюється шляхом занурення твердого внутрішнього шару 5 в розплав із матеріалу зовнішнього шару до проточок 9, 10 з подальшим його охолодженням. Забезпечення симетричності гідравлічного опору в МЕЗ відносно каналу 11 в ЕІ 3 на різних фазах обробки досягається умовами:

- для початкової фази:

$$\Delta P_{ex(A)} + \Delta P_{AB} + \Delta P_{n(B)} = \Delta P_{ex(D)} + \Delta P_{CD} + \Delta P_{n(C)}, \quad (2.12)$$

де  $\Delta P_{ex(A)}$ ,  $\Delta P_{ex(D)}$  - гідравлічні опори (або втрати тиску) на вході потоку в торцевий МЕЗ 12 відповідно в точках  $A$  та  $D$ ;

$\Delta P_{AB}$ ,  $\Delta P_{CD}$  - гідравлічні опори (або втрати тиску) в торцевому міжелектродному зазорі 12 відповідно на ділянках  $AB$  (довжиною  $l_{AB}$ ) та  $CD$  (довжиною  $l_{CD}$ );

$\Delta P_{n(B)}$ ,  $\Delta P_{n(C)}$  - гідравлічні опори (або втрати тиску) при внутрішньому повороту потоку відповідно в точках  $B$  та  $C$ .

Але оскільки  $\Delta P_{ex(A)} = \Delta P_{ex(D)}$ , а  $\Delta P_{n(B)} \approx \Delta P_{n(C)}$ , то залежність (2.12) набуде вигляду:

$$\Delta P_{AB} = \Delta P_{CD}; \quad (2.13)$$

- для кінцевої фази:

$$\begin{aligned} \Delta P_{ex(E)} + \Delta P_{EF} + \Delta P_{n(F)} + \Delta P_{FG} + \Delta P_{n(G)} = \\ = \Delta P_{ex(M)} + \Delta P_{ML} + \Delta P_{n(L)} + \Delta P_{LH} + \Delta P_{n(H)}, \end{aligned} \quad (2.14)$$

де  $\Delta P_{ex(E)}$ ,  $\Delta P_{ex(M)}$  - гідравлічні опори (або втрати тиску) на вході потоку в бічні міжелектродні зазори 13, 14 відповідно в точках  $E$  та  $M$ ;

$\Delta P_{EF}$ ,  $\Delta P_{ML}$  - гідравлічні опори (або втрати тиску) в бічних міжелектродних зазорах 13, 14 відповідно на ділянках  $EF$  (довжиною  $l_{EF}$ ) та  $ML$  (довжиною  $l_{ML}$ );

$\Delta P_{n(F)}$ ,  $\Delta P_{n(L)}$  - гідравлічні опори (або втрати тиску) при зовнішньому повороту потоку відповідно в точках  $F$  та  $L$ ;

$\Delta P_{FG}$ ,  $\Delta P_{LH}$  - гідравлічні опори (або втрати тиску) в торцевому між-електродному зазорі 15 відповідно на ділянках  $FG$  (довжиною  $l_{FG}$ ) та  $LH$  (довжиною  $l_{LH}$ );

$\Delta P_{n(G)}$ ,  $\Delta P_{n(H)}$  - гідравлічні опори (або втрати тиску) при внутрішньому повороту потоку відповідно в точках  $G$  та  $H$ .

Оскільки  $\Delta P_{ex(E)} = \Delta P_{ex(M)}$ ,  $\Delta P_{n(F)} \approx \Delta P_{n(L)}$ ,  $\Delta P_{n(G)} \approx \Delta P_{n(H)}$ , то залежність (2.14) можна спростити до вигляду:

$$\Delta P_{EF} + \Delta P_{FG} = \Delta P_{ML} + \Delta P_{LH} . \quad (2.15)$$

Перед обробкою (див. рис. 2.18) електрод-заготовку 1 закріплюють нерухомо на плиті 16 електроерозійного верстата, а двошаровий електрод-інструмент 3 - на його шпинделі. Робочу зону верстата закривають герметично камерою 17. Для обробки в камеру нагнітають під технологічним тиском робочу рідину (як правило органічне середовище) за напрямком від периферії до центру електрода-інструмента 3. Вмикають постійний технологічний струм і ведуть процес обробки електрода-заготовки 1 електричною дугою 18 з використанням автоматичної системи слідування за торцевим міжелектродним зазором 12, 15. При цьому зовнішній шар 7 на електроді-інструменті 3 легко та швидко руйнується електричною дугою 18 та поступово вивільняє внутрішній шар 5, який, власне, і відповідає за точність формоутворення отвору з похилою донною торцевою поверхнею 2, так як його виготовлено із електроерозійно-стійкого матеріалу. Завдяки виконанню умов (4.7) та (4.9), при реалізації процесу обробки забезпечується симетричний відносно каналу 11 гідравлічний опір течії робочої рідини в міжелектродному зазорі не тільки в початковій, але й кінцевій фазах обробки, що, в свою чергу забезпечує симетричний відносно каналу 11 в електроді-інструменті 2 потік рідини в

даних фазах. Це приводить до того, що електрична дуга 18 в різних точках торцевого зазору в кінцевій фазі обробки горить в оптимальних гідродинамічних умовах. Останнє визначає задану технологічну якість обробленої поверхні.

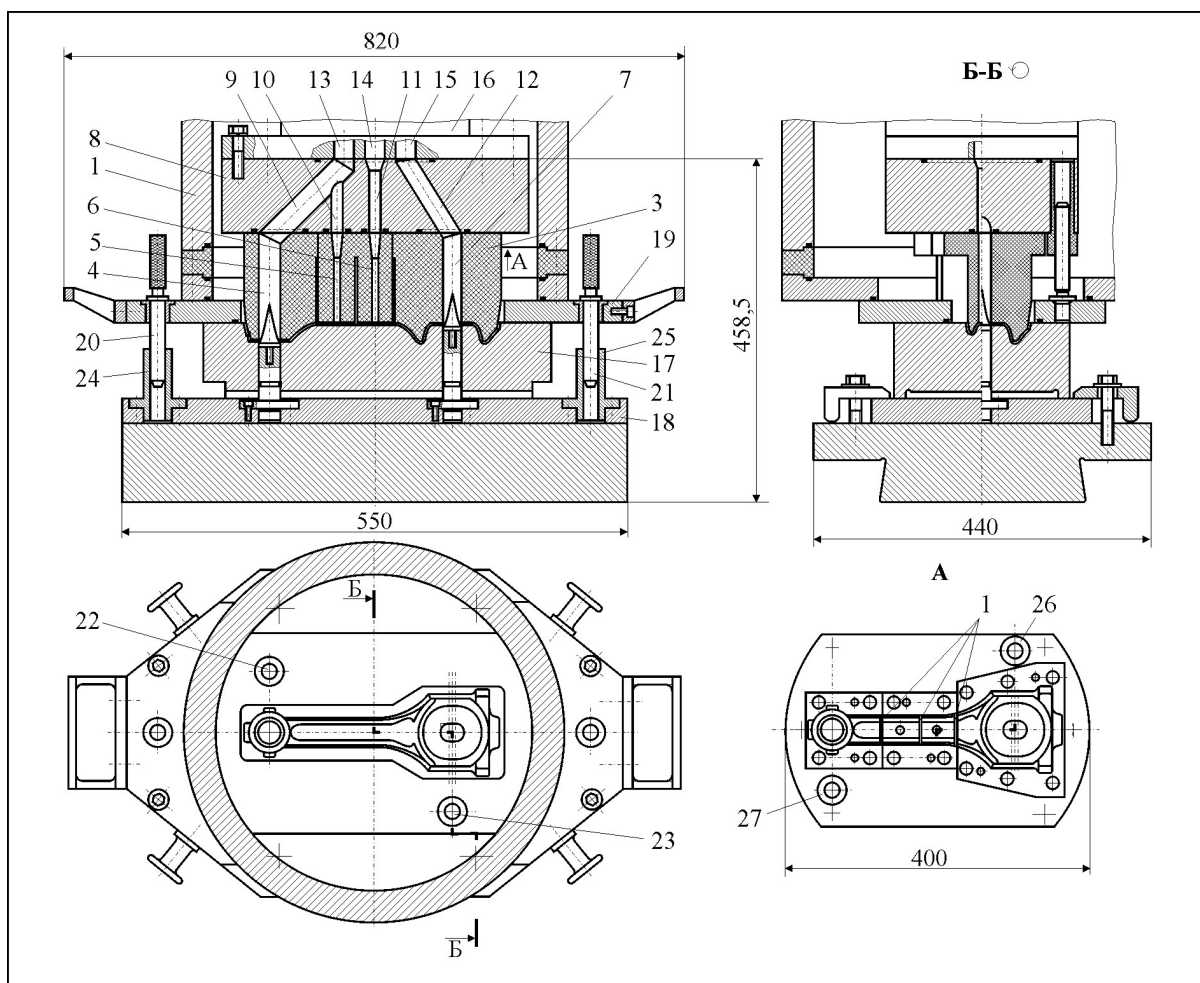
**Принцип позиціонування електродів при РОД фасонних порожнин кувальних штампів.** В загальному випадку в процесі розробки технологічного оснащення для РОД фасонних порожнин штампів необхідно забезпечити:

- нагнітання робочої рідини в МЕР та видалення її із МЕР разом з продуктами ерозії;
- технологічне виготовлення графітових різногабаритних ЕІ;
- задану точність базування ЕІ по відношенню до ЕЗ;
- надійну гідроізоляцію зони обробки;
- швидкозмінність ЕІ та ЕЗ;
- надійне кріплення ЕІ та ЕЗ.

Розглянемо рішення цих питань в плані розробки технологічного пристрою для РОД фасонної порожнини вставки кувального *штампа кривошипного гаряче-штампувального пресу* на деталь «Шатун» (рис. 2.19).

Нагнітання робочої рідини в МЕР здійснюється із герметичній камери 1 верстата та щілинних надрізів 2 на ЕІ 3, а вилучення – через технологічні канали 4, 5, 6 і 7 в ЕВ та електродотримачі 8, для чого канали 9, 10, 11 і 12 електродотримача з'єднані з каналами 13, 14 і 15 шпинделя 16 верстата. Кількість каналів шпинделя, що використовуються, як показано нижче, задається електродотримачем, який виконує функцію дискретного регулятора потоку. Вона вибирається із умови забезпечення в

каналах оптимальної швидкості потоку, яка достатня для видалення продуктів ерозії із вертикальних ділянок [12].



**Рис. 2.19. Технологічний пристрій для РОД фасонної порожнини вставки кувального штампа на деталь “Шатун”**

Технологічність виготовлення ЕІ досягається за рахунок застосування ряду конструктивних рішень:

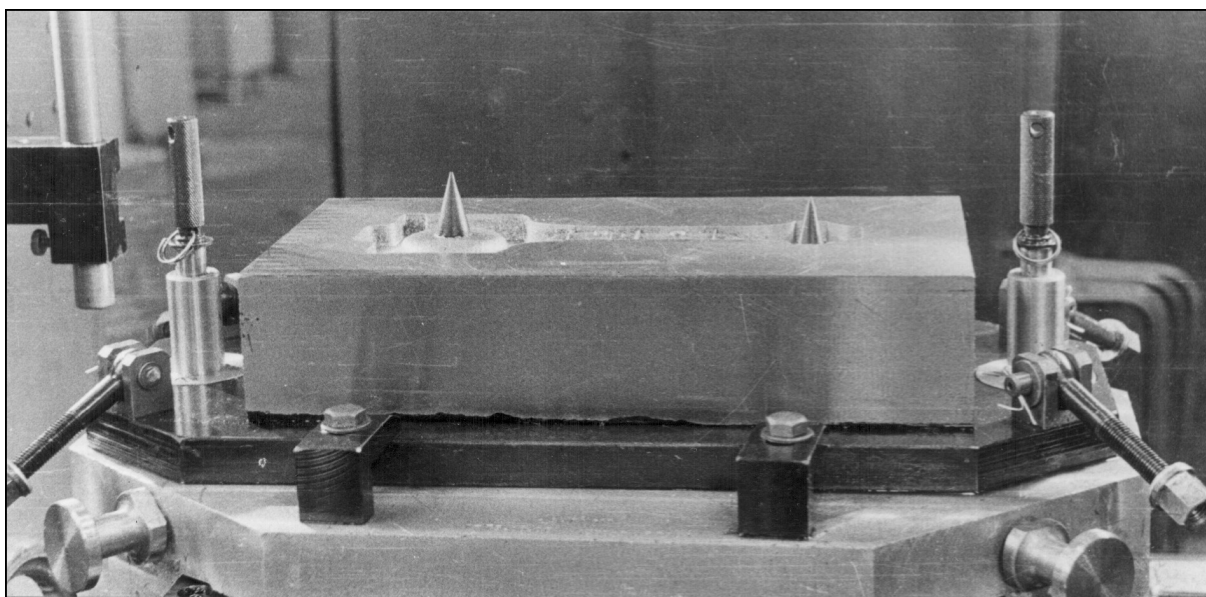
- ЕІ виконано складеної конструкції, що забезпечує раціональний розкрій вихідного вуглеграфітового матеріалу та технологічність виготовлення крайніх щілинних пазів;

- склеювання складових елементів ЕІ дозволяє робити подальшу обробку рельєфної частини ЕІ на копіювально-фрезерному верстаті, а фіксування штифтами до електродотримача – на координатно-

розточувальному верстаті, що забезпечує точне позиціонування складнопрофільного ЕІ відносно базових елементів електродотримача.

Центральне місце в розробці технологічного пристрою займає питання про базування ЕІ 3 відносно ЕЗ 17. Існуючі методи базування за розміткою не забезпечують потрібної точності та трудомісткі. В даному пристрою вперше застосовано *новий спосіб базування* за допомогою базової 18 та проміжної 19 плит, електродотримача, а також двоступеневої системи колонок 20, 21, 22, 23 та втулок 24, 25, 26, 27, який забезпечує точність базування до  $\pm 0,02$  мм. Принцип базування з використанням даного способу відбитий на рис. 2.19.

Надійна гідроізоляція зони обробки досягається за рахунок встановлення в характерних місцях ущільнювальних кілець.

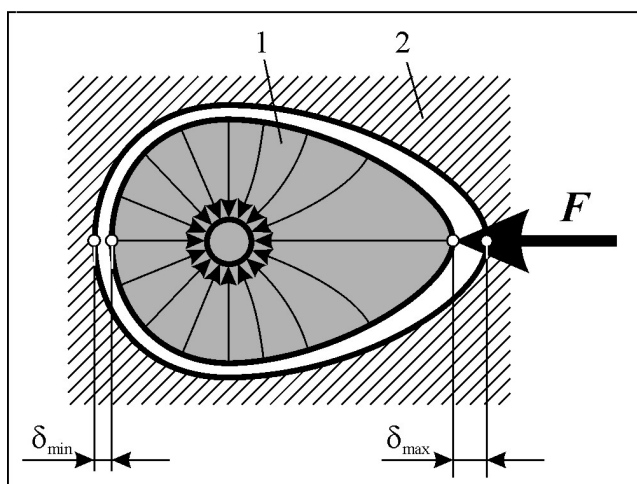


**Рис. 2.20. Техологічний пристрій зі знятою проміжною плитою, що підготовлений для зміни вставки кувального штампа на деталь “Шатун”**

Швидкозмінність ЕІ досягається за рахунок забезпечення можливості виготовлення кріпильних та штифтових отворів на координатно-розточувальному верстаті. Для швидкої та зручної зміни вставки (ЕЗ 17) проміжна плита 19 постачається двома рукоятками, а конструкція пристрою дозволяє завести у бічні отвори вставки транспортні

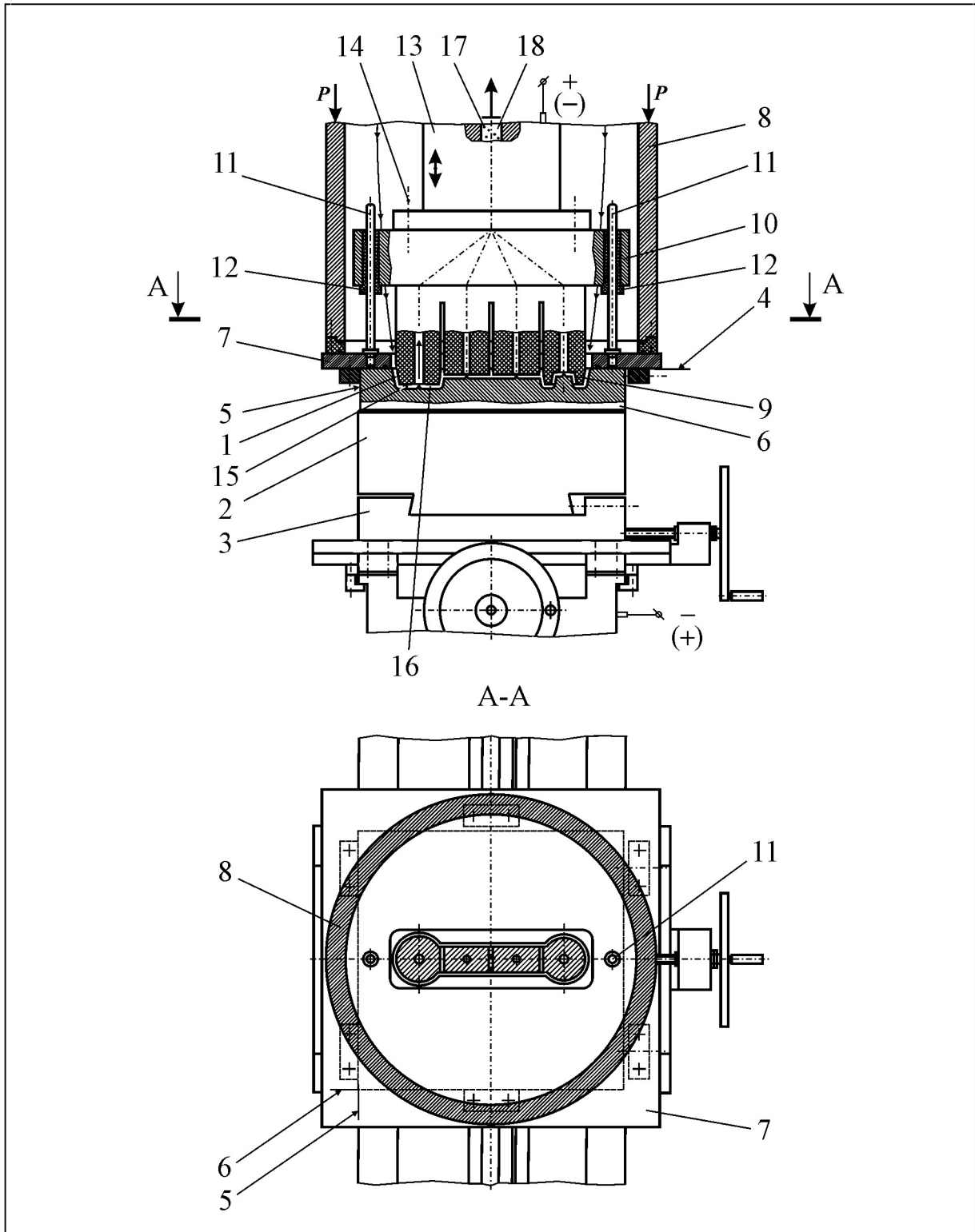
штирі. Знімання та встановлення вставки здійснюється з використанням цехових під'ємно-транспортних засобів. На рис. 2.20 показано технологічний пристрій зі знятою проміжною плитою 19, який підготовлений для заміни вставки.

Необхідність в забезпеченні надійного кріплення ЕІ та ЕЗ, з фізичної точки зору, обумовлена можливістю використання *асиметричного прокачування* робочої рідини в торцевому МЕЗ. Останнє є причиною виникнення радіальної результуючої сили, що прагне змістити електроди відносно один одного (рис. 5.3). Ця сила виникає від різниці тисків в протилежних бічних МЕЗ у зв'язку з різними їх гідравлічними опорами. Вона може визвати нестабільність процесу та підвищений знос бічної поверхні ЕІ, внаслідок чого точність обробки знижується. Надійність кріплення ЕІ та вставки в даному пристрою досягається використанням відповідних болтових з'єднань та прихоплювачів.



**Рис. 2.21.** Схема виникнення радіальної сили  $F$  від асиметричного потоку робочої рідини в торцевому МЕЗ:  
1 - ЕІ; 2 - ЕЗ

Описана вище конструкція технологічного пристрою для РОД фасонних порожнин кувальних штамів кривошипних гарячештампувальних пресів захищена патентом України [13].



**Рис. 2.21. Пристрій для РОД фасонної порожнини нижньої частини молотового штампа на деталь “Важіль”**

Конструкція технологічного пристрою для РОД фасонної порожнини *молотового штампа* має певні особливості. Так, для обробки фасонної

порожнини 1 в молотовому штампі 2 (рис. 2.21) останній за допомогою цехового крану встановлюють та закріплюють на координатному столі 3 електроерозійного верстата, що реалізує спосіб розмірної обробки електричною дугою. На дзеркалі 4 штампа 2 точно встановлюють за *контрольним кутом* (взаємно-перпендикулярні поверхні 5 та 6) опорну плиту 7, яка одночасно виконує функцію дна герметичної камери 8. Електрод-інструмент 9, який звичайно виготовляють із електроерозійностійкого графіту, закріплюють точно та нерухомо відносно електродотримача 10. Усередині камери 8 плиту 7 з'єднують з електродотримачем 10 принаймні двома напрямними вузлами. Кожен напрямний вузол складається із напрямної колонки 11, що запресовується у плиту 7, та напрямної електроізоляційної втулки 12, що запресовується у електродотримач 10. Наявність напрямних вузлів у пристрою дозволяє швидко (за декілька секунд) позиціонувати електрод-інструмент 9 по відношенню до молотового штампа 2 шляхом попереднього надівання електродотримача 10 разом з електродом-інструментом 9 на напрямні колонки 11. Для запобігання при встановленні можливого пошкодження фасонного графітового електрода-інструмента 9, його вертикальне переміщення обмежується двома упорами однакової висоти (на рис. 5.4 упори не показано), які встановлюються між плитою 7 та електродотримачем 10. В такому стані опускають шпindel 13, та на відстані 1-2 мм від верхньої площини електродотримача 10 його зупиняють. Шляхом переміщення координатного стола 3, позиціонують кріпильні різьбові отвори електродотримача 10 з отворами шпинделя 13, вставляють кріпильні болти 14 в отвори шпинделя 13 та закріплюють рухому частину пристрою на шпинделі 13 верстата. Далі знімають з пристрою обмежувальні упори, піднімають шпindel 13 вгору, опускають герметичну камеру 8, вмикають насос подачі робочої рідини в зону обробки, постійний технологічний струм, та ведуть розмірну обробку

фасонної порожнини 1 в молотовому штампі 2 електричною дугою 15, що збуджується в торцевому між електродному зазорі 16 в потужному гідродинамічному потоці робочої рідини. Продукти ерозії 17 вилучаються із зони обробки разом з робочою рідиною крізь центральний канал 18 у шпинделі 13.

Демонтаж пристрою з верстата здійснюється у зворотному напрямку.

Використання конструкції пристрою, що пропонується, порівняно з відомими, дозволяє підвищити точність позиціонування електродів на шість квалітетів (з 14 до 8 квалітету) та зменшити час позиціонування в 80...180 разів (з 20...30 хвилин до 10...15 секунд).

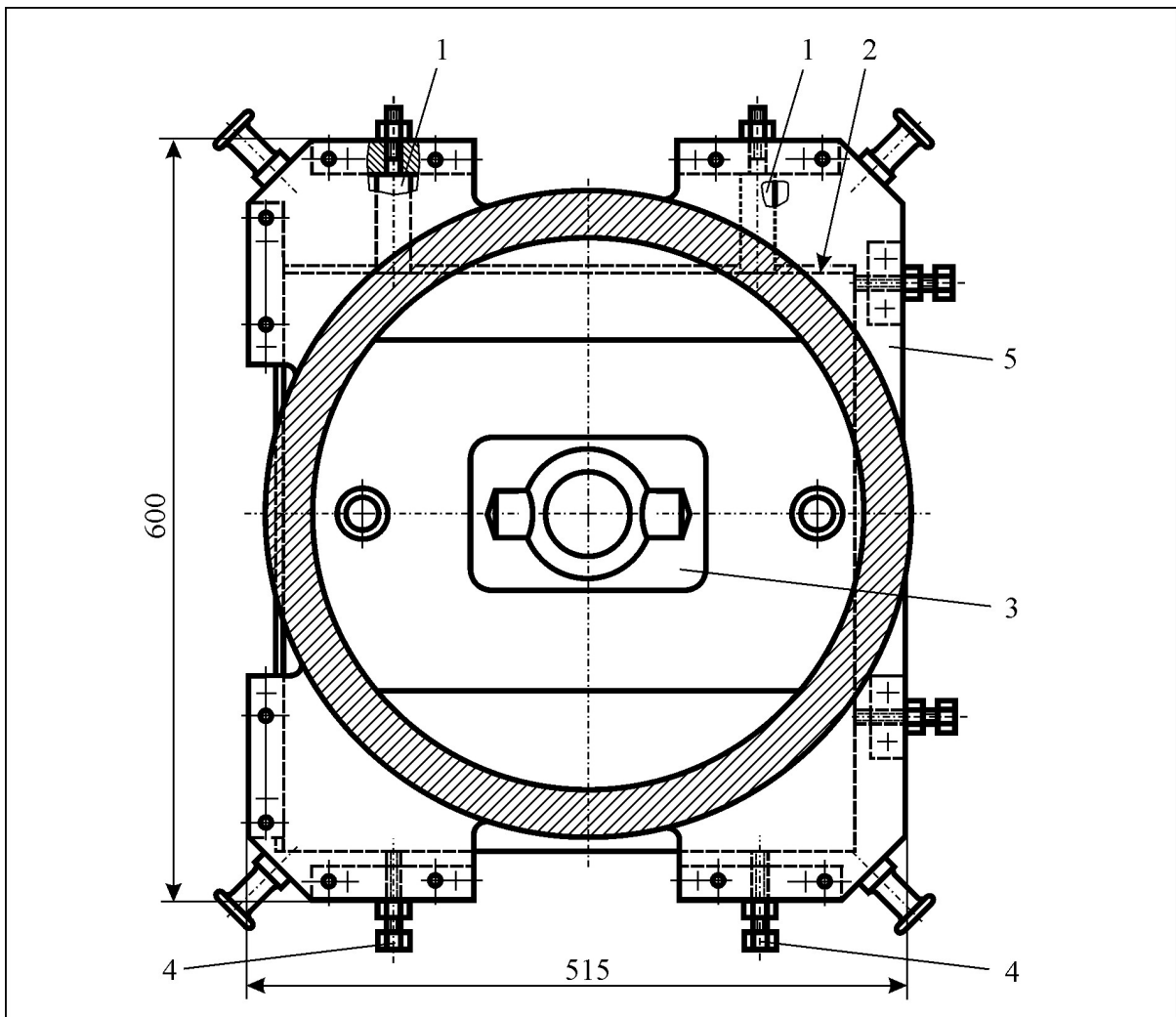


Рис. 2.23. План технологічного пристрою для РОД фасонної порожнини нижнього та верхнього молотового штампі на деталь “Кільце”

Слід відмітити, що у загальному випадку, навіть для РОД симетричної в плані і відносно дзеркала молотового штампа порожнини, є потреба в проектуванні та виготовленні двох технологічних пристроїв (окремо для нижнього та верхнього штампа). Останнє пов'язано з асиметричним розташуванням порожнини на дзеркалі молотового штампа. Для створення умов обробки порожнини на обох штампах з використанням одного технологічного пристрою (рис. 2.23) застосовують упори 1, які встановлюють в пристрій з боку контрольного кута 2 молотового штампа 3. При переході з обробки порожнини верхнього штампа до обробки порожнини нижнього штампа (або навпаки) упори 1 та фіксуючі гвинти 4 опорної плити 5 переставляють (міняють місцями).

При використанні копіювально-прошивного верстата з точним (без зазорів) напрямком шпинделя та стола технологічний пристрій для РОД фасонної порожнини молотового штампа можна спростити шляхом заміни напрямних вузлів ковзання на колонки-упори, що базують електрод-інструмент відносно штампа. На колонках-упорах пристрій зберігається та встановлюється на верстат. Перед обробкою колонки-упори знімають.

### **Зміст звіту**

1. Коротко описати технологічні прийоми процесу РОД кувальних штамків:

- малогабаритних порожнин простої форми при використанні способу однозонного прокачування;
- великогабаритних порожнин та порожнин складної форми при використанні способу багатозонного прокачування;
- порожнин складного рельєфу при використанні способу багатозонного зворотного прокачування;

2. Спроекувати технологічний пристрій (загальний вид та специфікацію) для позиціонування електродів при РОД фасонної порожнини кувального штампа, що проектувався в рамках виконання курсового проекту по гарячому штампуванню.

### **Контрольні питання.**

Визначення: малогабаритної порожнини; порожнини простої форми; великогабаритної порожнини; порожнини складного рельєфу; способу зворотного прокачування; способу багатозонного прокачування. Суть метода крутого сходження за градієнтом. Технологічні прийоми РОД фасонних порожнин кувальних штампів.

## Завдання № 3

## ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ПРОЦЕС РІЗАННЯ ЛАЗЕРОМ

Вивчити та описати особливості процесу лазерного різання матеріалів: область застосування; фізичну сутність процесу; вплив режимів обробки на якісні показники різу; залежність розмірних параметрів різання від технологічних факторів; прогресивне обладнання [14, 15].

### Загальні відомості

**Область застосування лазерного різання матеріалів.** Для різання важкооброблюваних матеріалів все більше розповсюдження отримують електрофізикохімічні методи. При рішенні питання найбільш доцільного використання лазерів в технології різання необхідно розглядати три аспекти: конкурентоспроможність, межі застосування, переваги порівняно з іншими методами.

В таблиці 3.1 наведено данні для порівняння деяких електрофізикохімічних методів різання з лазером по ширині різу, що отримується, та продуктивності обробки.

Таблиця 3.1

### Порівняння лазерного різання з іншими електрофізикохімічними методами різання

Метод різання	Ширина різу, мм	Продуктивність процесу, см <sup>3</sup> /хв
Лазерний	0,3 – 0,8	40 – 50
Анодно-механічний	0,5 – 2	4 – 10
Електрохімічний	0,25 – 0,4	0,7 – 1,0
Електроконтактний	0,5 – 1	14 – 20
Електроіскровий	0,1 – 0,5	0,1 – 1,0

В таблицях 3.2 та 3.3 наведено данні для порівняння лазерного різання з іншими методами розкрою за продуктивністю, якістю різа та витратам.

Таблиця 3.2

**Порівняння лазерного способу різання сталей з іншими традиційними методами за продуктивністю та якістю**

Метод різання	Швидкість різання, м/хв	Ширина різу, мм	Глибина зони термічного впливу, мм	Шорсткість поверхні різу, мкм
Лазерний	3 – 8	0,5 – 0,8	0,3 – 0,5	10 - 80
Механічний	0,05	5 – 10	-	15 - 30
Абразивний	0,05	1 – 2	2 – 4	1 – 2
Кисневий	1,0	3	5	500
Плазмовий	5,0	2 – 3	1 – 2	300
Електроерозійний	0,5	2 – 5	0,5 – 1,8	30
Дуговий	0,1 – 0,3	7	10 – 12	500

Таблиця 3.3

**Швидкість обробки та витрати при різанні титана різними методами**

Метод різання	Швидкість різання, мм/с, при товщині листа, мм			Витрати на обладнання у відносних одиницях на 1 м <sup>2</sup> різу при товщині листа, мм		
	3	6	12	3	6	12
Лазерний	50	25	16,7	1,0	1,7	1,8
Механічний	1,8	1,3	0,5	2,1	3,1	5,9
Кисневий	25	19,2	8,3	1,1	1,9	2,0
Плазмовий	25	20,8	15	1,1	2,0	2,2

Найбільш *доцільно лазерне різання застосовувати* при розкрої листів із сталей, титанових сплавів та кольорових металів товщиною до 5 – 10 мм, різних неметалевих матеріалів товщиною до 20 мм для дрібних та середніх серій деталей (100 – 1000 шт.), особливо при обробки деталей із складним контуром. При обробки дрібних партій деталей витрати зменшуються порівняно з різанням на листових ножицях та штампуванням

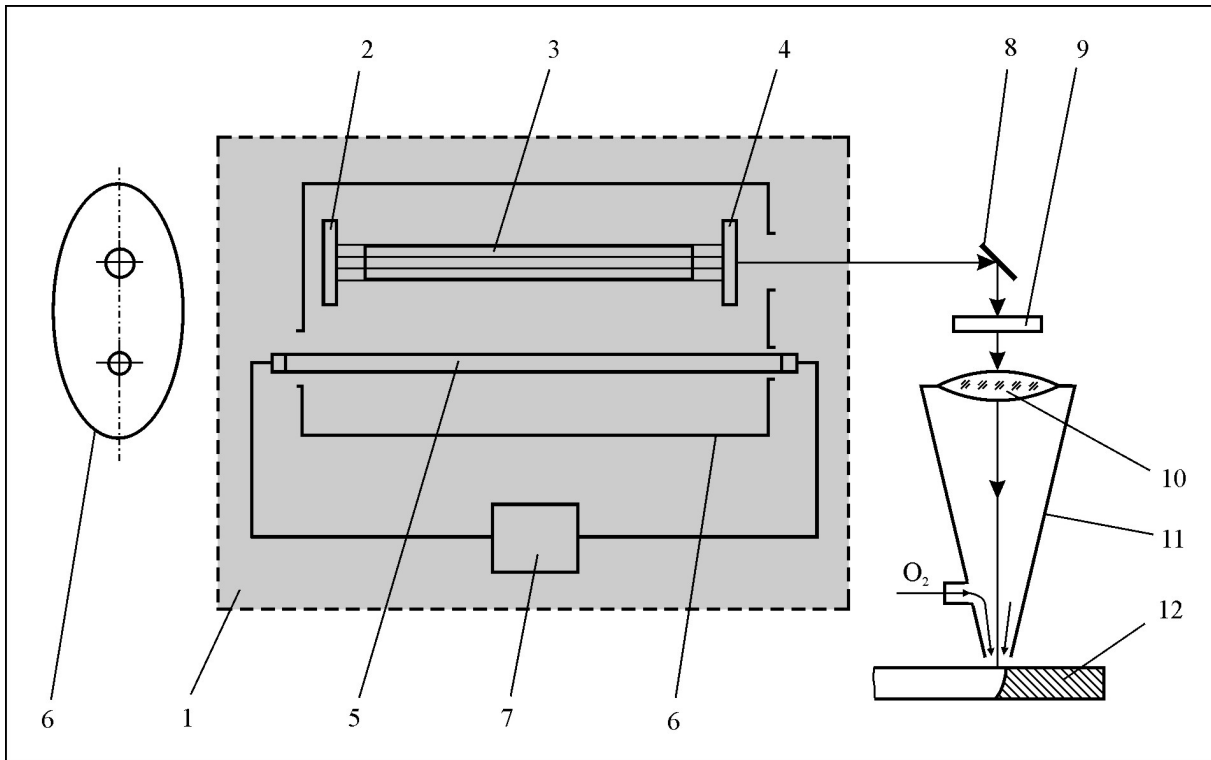
в 2 – 4 рази за рахунок усунення операції розмітки (70 % часу, що іде на обробку), значного зниження відходів матеріалів.

Різання різних матеріалів за допомогою лазера має *ряд переваг* порівняно з традиційними методами розкрою. До них відносяться:

- можливість обробки різних матеріалів (в тому числі і струмо-непровідних);
- порівняно мала ширина різку (приблизно 1/5 ширини різку при газопламеневому або плазмовому різанні);
- висока продуктивність процесу та якість поверхні різку;
- незначна зона термічного впливу та деформації після обробки;
- можливість легкої автоматизації та комп'ютеризації процесу.

**Фізична сутність процесу лазерного різання матеріалів.** Лазерне різання ґрунтується на теплової дії лазерного випромінювання та відбувається при безперервному або періодичному переміщенні джерела тепла, яке сформоване у пляму з високою густиною потужності за допомогою спеціальної оптичної системи. В залежності від конструктивних особливостей випромінювачів можлива реалізація безперервного або імпульсно-періодичного режиму лазерного різання. Для розкрою матеріалів більше розповсюдження отримало застосування лазерів безперервної дії. При цьому можливі різні механізми лазерного розділення, які ґрунтуються на різних процесах: випаровуванні матеріалу, плавленні з додатковим вилученням розплаву із зони різання, хімічних реакцій горіння, розкладом з виділенням летучих з'єднань тощо. Крихкі матеріали можна поділяти методом терморозколювання. Останній метод ґрунтується в нанесенні не наскрізного різку, або серії отворів з подальшим розломом по лінії різку.

Схема газолазерного різання матеріалів показана на рис. 3.1.

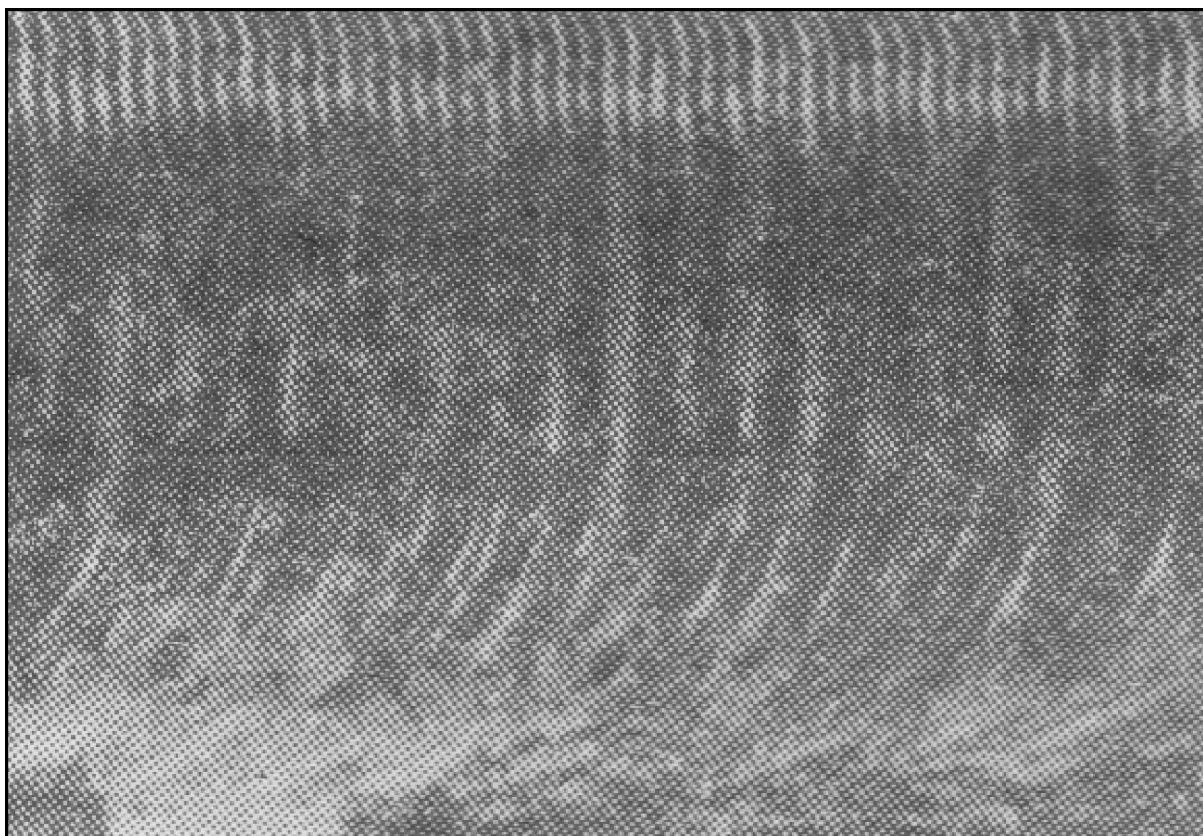


**Рис. 3.1.** Схема газолазерного різання матеріалів з соосною подачею струменя газу: 1 - оптичний квантовий генератор (ОКГ) або лазер; 2 - дзеркало; 3 - стрижень (синтетичний рубін); 4 - напівпрозоре дзеркало; 5 - газорозрядна лампа-вспалах; 6 - кожух, що відбиває світло; 7 - високовольтна батарея конденсаторів; 8 - поворотне дзеркало; 9 - заслонка; 10 - лінза, що фокусує; 11 - сопло;

Енергія у вигляді когерентного (постійної довжини хвилі) випромінювання генерується в оптичному квантовому генераторі 1 (ОКГ), який власне і є лазером. Стрижень 3, що виготовлений із робочої речовини (наприклад, із синтетичного рубіну), розташовується між двома дзеркалами 2, 4. Дзеркало 2 повністю відбиває усі проміні, що на нього падають, а дзеркало 4 є напівпрозоре. Для накачування енергії використовується газорозрядна лампа-вспалах 5, яка для більшої ефективності опромінення кристала поміщається разом з ним усередину кожуха 6, що відбиває, який має поперечний переріз у вигляді еліпса. При розташуванні лампи 5 та кристала 3 в фокусах еліпса створюються найкращі умови рівномірного освітлення кристала. Живлення лампи-вспалаха 5 звичайно здійснюється від спеціальної високовольтної батареї

конденсаторів 7. Отримане когерентне випромінювання після проходження крізь напівпрозоре дзеркало 4 відбивається від поворотного дзеркала та спрямовується до лінзи 10, що фокусує. При цьому енергія концентрується в точці, що приводить до суттєвого зростання температури. Найбільше розповсюдження отримав спосіб різання матеріалів лазерним випромінюванням з співвісною променю лазера подачею струменю кисню в зону різання.

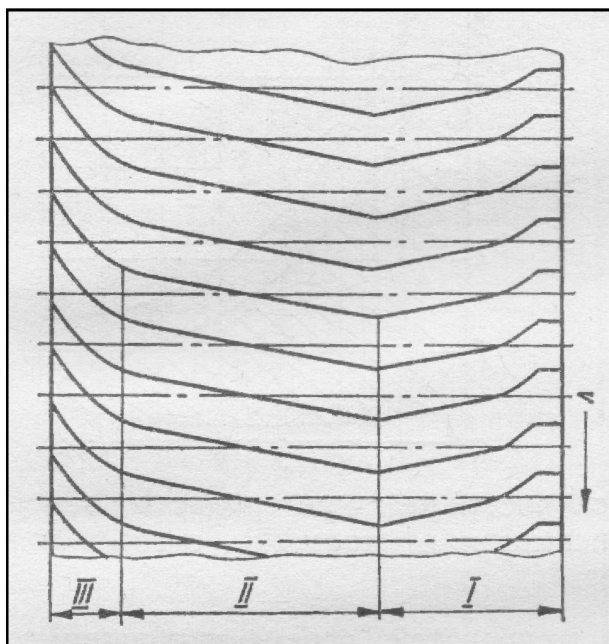
**Вплив режимів обробки на якісні показники різку.** Поверхня різку при невеликих швидкостях обробки являє собою сукупність рівномірно розташованих *борозен* (рис. 3.2).



**Рис. 3.2.** Поверхонь різку, що виконано в вуглецевої сталі при оптимальної ( $v = 2,0$  м/хв) швидкості різання ( $\text{CO}_2$  - лазер потужністю 1 кВт при фотусуванні випрямлювання в пляму діаметром 0,2 мм).

Для швидкостей же різання, які перевищують деяку межу, різ отримується більш гладким, тобто без явно виражених борозен. Борознеутворення на поверхні різів спостерігається при швидкостях обробки менших 2,5 м/хв.

Схематичне зображення розташування борозен на поверхні різів, що виконано у вуглецевої сталі при швидкості різання  $v = 2,5$  м/хв., показано на рис. 3.3.



**Рис. 3.3.** Схема розташування борозен на поверхні різів у вуглецевій сталі при  $v = 2,5$  м/хв

На поверхні різів виділяються три зони:

- зона I характеризує руйнування, що періодично протікає від верхньої кромки всередину металу. Деякий нахил борозен у напрямку обробки залежить від переміщення передньої частини лазерного джерела із швидкістю  $v$  в процесі різання у межах ширини утвореної у верхній кромки заготовки борозни з одночасним її поглибленням всередину металу зі швидкістю руйнування;

- зона II, що розташована нижче, хоча і формується безперервно, але також має структуру у вигляді борозни (однак менш виражену) внаслідок періодичного вилучення продуктів руйнування під дією струменя кисню із

зони I. Нахил борозен зони II в напрямку, протилежному напрямку різання, визначається нахилом поверхні руйнування, що протікає безперервно. Для більш низьких швидкостей різання нахил борозен зменшується як для зони I, так і для зони II;

- зона III вказує на продовження процесу різання, але без участі лазерної енергії, а тільки лише за рахунок струменя кисню та перегрітого металу, що видувається із зони обробки. При цьому швидкість різання металу різко знижується (про що свідчить значний нахил борозен до кромки різі).

Встановлено, що ширина різі у верхній кромки більша, чим в середній його частині, а в зоні III спостерігається розширення різі.

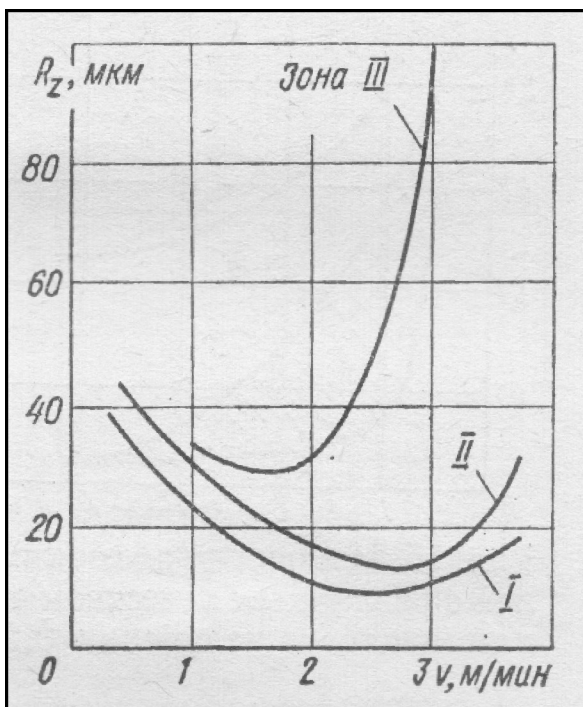


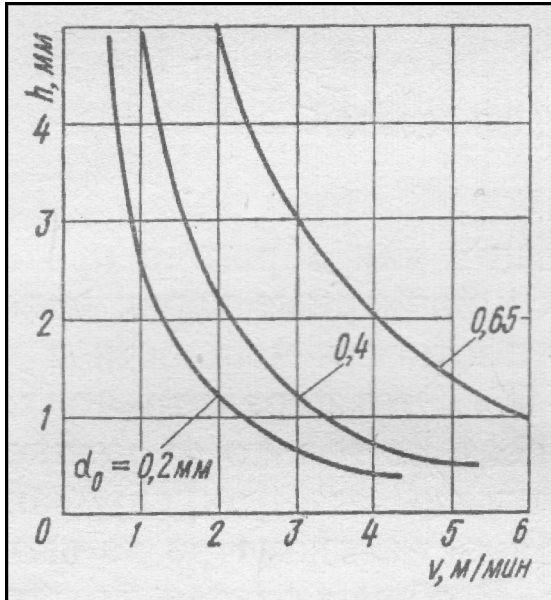
Рис. 3.4. Залежність шорсткості поверхні різі у вуглецевій сталі від швидкості обробки при  $P = 0,9$  кВт та  $p = 0,15$  МПа

Дослідження показали, що зона I має найменше значення шорсткості  $R_z$  (рис. 3.4). Як бачимо, для досягнення якісних поверхонь різання, коли шорсткість не перевищує величини  $R_z = 40 \dots 50$  мкм, необхідно обмежувати швидкість для запобігання утворення на поверхні різання зони III.

**Залежність розмірних параметрів різання від технологічних факторів.** Важливим фактором, що визначає як характер протікання процесу різання металів, так і розмірні характеристики виконаного різання, є *густина потужності* в зоні дії лазерного випромінювання  $W_p$ . Цей параметр є комплексною величиною та залежить не тільки від потужності лазерного випромінювання, але й від умов його фокусування, модового складу променя, його точності фокусування, діаметра на виході із резонатора та інших факторів. Густина потужності у фокальній плямі можна підрахувати за формулою

$$W_p = \frac{4P}{\pi d_0^2}, \quad (3.1)$$

де  $P$  – потужність лазерного випромінювання.



**Рис. 3.5.** Залежність глибини якісно виконаного різання в вуглецевих сталях від швидкості різання при різних умовах фокусування

Із рис. 3.5 видно, що зменшення фокальної плями викликає зростання глибини якісно виконаного різання. Основною причиною такого зростання глибини різання є підвищення густини потужності в зоні обробки. Тому при різанні вуглецевих сталей необхідно прагнути до фокусування

випромінювання в плями меншого діаметра (використовувати установки з кращім фокусуванням лазерного пучка, що працюють в одномодовому режимі, застосовувати більш короткофокусні лінзи тощо).

Не менш важливим фактором, що впливає на розмірні параметри різання, є тиск робочого газу, що продувається в зону обробки з співвісно променю лазерному променю. Підвищення тиску до 0,35 – 0,4 МПа приведе до пропорційного росту глибини різку. При подальшому зростанню тиску глибина різання стабілізується, а далі повільно знижується. Останнє пов'язано із інтенсифікацією вилучення продуктів реакції горіння сталі та підсиленню екзотермічної реакції.

**Прогресивне обладнання.** Сучасні установки з ЧПУ моделі Laser-Jet для лазерного різання деталей із листа постачає Германія (рис. 3.6).



**Рис. 3.6. Робоча зона установки моделі Laser-Jet**

Нижче в табл. 3.4 наводиться технічна характеристика установок Laser-Jet

## Технічна характеристика установок Laser-Jet

<b>Устройство для резки</b>			
Ход	по оси X	мм	2500
	по оси Y	мм	1250
	по оси Z	мм	70
Рабочая высота		мм	1000
Предельная ширина детали		мм	2700
Макс. нагрузка на раб. стол		кг/дм <sup>2</sup>	1
Ускоренный ход		мм/мин	60000
<b>СО<sub>2</sub> лазер /К&gt;0,8</b>			
Длина волны		мкм	10,6
Диапазон мощности луча		Вт	60 - 1000
Макс. мощность пиков импульсов		кВт	3,5
Частота импульсов		Гц	1 - 1000
Газ лазера			Premix
<b>Точность</b>			
Точность позиционирования		мм +/-	0,05
Точность повторения		мм +/-	0,05
<b>Масса и размеры</b>			
Габариты		mm	2900 x 3710
Масса		кг	2050
Установка лазерной резки на 1000 В	Арт.-№г.		140 810
Установка лазерной резки на 600 В	Арт.-№г.		140 811
Установка лазерной резки на 1500 В	Арт.-№г.		140 812

## **Зміст звіту**

Коротко описати особливості процесу лазерного різання матеріалів:

- область застосування;
- фізичну сутність процесу;
- вплив режимів обробки на якісні показники різку;
- залежність розмірних параметрів різання від технологічних факторів;
- прогресивне обладнання.

## **Контрольні питання**

Чим визначається область застосування лазерного різання матеріалів? Поняття про когерентний промінь. Схема роботи лазера. Яку роль виконує подача тиском під газового середовища в зону різання матеріалів лазером? Навіщо в конструкції лазера застосовується напівпрозоре дзеркало? В якому діапазоні змінюється ширина різку? Як підрахувати густину потужності, що випромінює лазер? Показники, що характеризують якість відрізування лазером? Вплив швидкості різання на розмірні параметри різання.

## Завдання № 4

**ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОХІМІЧНОЇ  
ОБРОБКИ**

Вивчити та описати особливості процесу електроерозійнохімічної (ЕЕХО) обробки: область застосування; фізичну сутність процесу; технологічні характеристики; системи керування подачею електрода-інструмента.

**Загальні відомості**

**Область застосування.** Процес електроерозійнохімічної обробки є одним із найбільш продуктивних технологічних методів виготовлення отворів діаметром 0,8 – 10 мм в жароміцних та твердих сплавах. Він забезпечує швидкість прошивання отворів в тонкостінних виробах (до 10 мм) до 200 – 300 мм/хв.

**Фізична сутність процесу.** Процес ЕЕХО являє собою послідовне протікання електрохімічної та електроерозійною складових протягом одного імпульсу. При цьому швидкість прошивання визначається головним чином процесом електроерозійного руйнування, механізм якого аналогічний механізму знімання при електроерозійній обробки. Роль електрохімічної складової зводиться до формуванню умов для пробною зазору за рахунок утворення паро газового шару на катоді-інструменті та знімання матеріалу з боку бічної поверхні отвору, який прошивається, що визиває підвищення бічного зазору.

При однаковій енергії імпульсу, що витрачається на електроерозійне знімання при ЕЕХО та ЕЕО, причиною досягнення високих швидкостей прошивання при ЕЕХО є близькі до ідеальних умови протікання

електроерозійного процесу в електролітах. Підвищений внаслідок особливостей пробою електролітів торцевий та із-за дії електрохімічної складової бічний зазори, через які прокачується з великою швидкістю електроліт, дозволяють інтенсивно очищувати зону обробки від продуктів ерозії. При цьому зменшується кількість фіктивних розрядів та тим самим інтенсифікується ерозійне знімання на малих, порівняно з ЕЕО, площах. Підвищення внаслідок цього густини струму ерозії при ЕЕХО веде до підвищення питомої продуктивності обробки, а отже до зростання лінійної швидкості.

**Технологічні характеристики.** Нижче наведено результати дослідження основних технологічних характеристик процесу ЕЕХО при виготовленні наскрізних отворів:

- досягнення швидкостей прошивання 10 – 30 мм/хв. та вище з забезпеченням чистоти обробленої поверхні за 4 – 5 класами виправдано при прошиванні за схемою трепанації отворів, площа яких не перевищує 300 мм<sup>2</sup>;

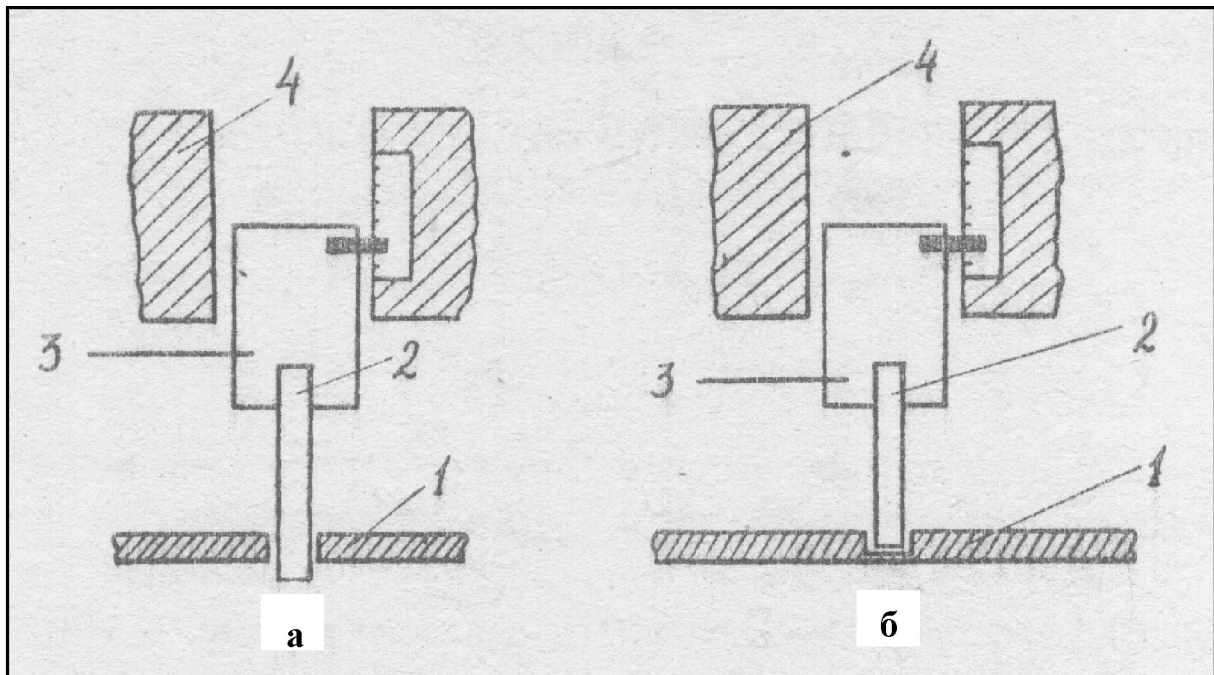
- найбільший ефект від застосування процесу ЕЕХО визначається вибором оптимальних швидкостей прошивання незалежно від характеристик джерел живлення, що використовуються;

- визначена область найбільш ефективного застосування метода ЕЕХО: виготовлення наскрізних фасонних отворів у нежорстких деталях із високоміцних матеріалів товщиною 1 – 3 мм; точність обробки – 4 – 5 класи; шорсткість обробленої поверхні –  $Rz20 - Rz40$ ; площа обробки – до 300 мм<sup>2</sup>.

**Системи керування подачею електрода-інструмента.** На ранній стадії розвитку метода ЕЕХО контроль та керування процесом здійснювався вручну. Це приводило до зниження важливої переваги

метода – високої продуктивності, так як витрата часу на різні операції налагодження значно більша ніж на сам процес прошивання.

Наступним етапом було створення напівавтоматичного циклу керування верстатом для ЕЕХО, в якому керування подачею електрода-інструмента здійснювалося за допомогою удосконаленої розімкнутої системи керування. Але практика показала, що при обробці на даних верстатах великих партій деталей виникає значна похибка виміру переміщення торця електрода-інструмента (до 100 %). Останнє зв'язано зі зменшенням довжини ЕІ із-за зносу, що досягає величин, що порівняні з товщиною оброблюваної деталі. Внаслідок цього ЕІ не доходить до



**Рис. 4.1.** До поняття зносу електрода-інструмента при ЕЕХО: а - ЕІ без зносу; б - ЕІ зі зносом; 1 - оброблювана деталь; 2 - електрод-інструмент; 3 - шпиндель; 4 - станина  
завершення обробки отвору (рис. 4.1).

Усунення цієї похибки зв'язано з переналагодженням верстата та відповідно з втратою часу, що неприпустимо для умов масового виробництва. Крім того, переключення привода подачі ЕІ з прискореної подачі на робочу відбувається із-за зносу ЕІ не в момент початку ЕЕХО, а

в певному, заздалегідь заданому положенні шпинделя. Це також приводить до втрати часу, так як зростає час, протягом якого ЕІ переміщується на робочій, більш повальній швидкості.

В роботі [14] розроблені та випробувані електронні блоки розімкнутої системи керування подачею. Принципова схема пристрою для перемикання привода з прискореного значення подачі на робоче (рис. 4.2) забезпечує перемикання подачі ЕІ з досяганням МЕЗ певної величини, при якій ініціюється пробій стовпа електроліту. Датчиком сигналу служить без індуктивний шунт, що включений в ланцюг «джерело живлення – деталь – ЕІ». При певному падінні напруги на шунті схема спрацьовує та за допомогою контакту вихідного реле  $K$ , що замикає, вмикається реле  $P$ , яке забезпечує перемикання подачі ЕІ. Настроювання чутливості здійснюється резисторами  $R4$ ,  $R5$ . Одночасно з перемиканням подачі ЕІ запускається електронне реле часу. Запуск реле часу від схеми реєстрації першого пробою повністю виключає похибки вимірювання переміщення торця ЕІ у товщі деталі. Реле формує інтервал часу для прошивання деталі та додаткового перебігу, що необхідний для подальшого електрохімічного доведення. За допомогою даного реле також забезпечується фіксація моменту закінчення прошивання.

Дана система керування подачею для ЕЕХО з реєстрацією першого пробою дозволяє виключити цикл «швидке підведення – повільне підведення – торкання – відведення на МЕЗ – прошивання» та замінити його на цикл «швидке підведення – фіксація МЕЗ – прошивання». Дана заміна економить 50 % часу, що іде на обробку деталі.

### Зміст звіту

Коротко описати особливості процесу електроерозійнохімічної (ЕЕХО) обробки:

- область застосування;
- фізичну сутність процесу;
- технологічні характеристики;
- системи керування подачею електрода-інструмента.

### **Контрольні питання**

Область застосування електроерозійнохімічної обробки. Фізичний механізм процесу ЕЕХО. Прогресивний спосіб керування подачею ЕІ.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Электроэрозионная и электрохимическая обработка: расчёт, проектирование, изготовление и применение электродов-инструментов. Ч. 1. Электроэрозионная обработка. – М.: НИИИ по машиностроению, 1980. – 224 с., ил.
2. Боков В. М. Обробка отворів електричною дугою: монографія / В. М. Боков, М. І. Попова. – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс – ЛТД», 2014. – 160 с.
3. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер и др. Под ред. Э. К. Лецкого. – М.: Мир, 1977. – 552 с., ил.
4. А. с. 1225134 СССР, МКИ В 23 Н 1/00. Способ электрофизической обработки полостей / В. И. Носуленко, В. М. Боков (СССР). – № 3387724/25-08; заявл. 05.02.82; Не подлежит опубл. в откр. печати.
5. Исследование, разработка и внедрение технологии и оборудования для прошивки отверстий в маломагнитных сталях: Отчёт по НИР № 514 / КИСМ. - № ГР 01824022863; Инв. № 02830007723. – Кировоград, 1982. – 79 с. ДСП.
6. Фотеев Н. К. Технология электроэрозионной обработки / Фотеев Н. К. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с.
7. Новые технологические процессы электрофизической и электрохимической обработки. Руководящие материалы. – М.: ЭНИМС, НИИмаш, 1973. – 228 с.
8. А. с. 902397 СССР, МКИ В 23 Р 1/00. Способ электрофизической обработки электрической дугой / В. И. Носуленко, В. С. Запорожченко, В. М. Боков (СССР). - № 2946927/25-08; заявл. 25.06.80; Не подлежит опубл. в откр. печати.

9. Пат. 4410 Україна, МПК В23 Р 13/00. Спосіб розмірної обробки електричною дугою торцевих поверхонь складного рельєфу / Боков В. М. (Україна). - № 2004053405; заявл. 06.05.2004; опубл. 17.01.2005, Бюл. № 1.

10. Пат. 22072 А Україна, МПК В23 Н 7/36. Спосіб розмірної обробки електричною дугою отворів та порожнин / Боков В. М., Попова М. І. (Україна). - № 96041707; заявл. 29.04.96; опубл. 30.04.98, Бюл. № 2.

11. Пат. 19947 Україна, МПК В23 Р 13/00. Спосіб розмірної обробки електричною дугою торцевих поверхонь складного рельєфу / Боков В. М. (Україна). - № u200604911; заявл. 03.05.2006; опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1.

12. А. с. 806333 СССР, МКИ В 23Р 1/02. Устройство для электрофизической размерной обработки металлов / В. И. Носуленко, В. М. Боков, Г. Н. Мещеряков (СССР). – № 2727931/25-08; заявл. 23.02.79; опубл. 23.02.81, Бюл. № 7.

13. Пат. 59334 Україна, МПК В23 Н 1/00, В23 Н 7/00, В23 Н 11/00. Пристрій для обробки фасонних порожнин електричною дугою / Боков В. М. (Україна). - № u201012930; заявл. 01.11.2010; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 9.

14. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: учеб. пособие /[Артомонов Б. А., Волков Ю. С., Дрожалова В. И., Седыкин Ф. В. и др.]; под ред. В. П. Смоленцева. Т. 2. Обработка материалов с использованием высококонцентрированных источников энергии. – М.: Высш. шк., 1983. – 208 с., ил

15. Коваленко В. С. Малоотходные процессы резки лучом лазера / В. С. Коваленко, В. В. Романенко, Л. М. Олещук. – К.: Техніка, 1987. – 112 с., ил.

**ЗМІСТ**

Завдання № 1. Розрахунок геометричних параметрів ЕІ при ЕІМО ...	3
Завдання № 2. Вивчення технологічних прийомів процесу РОД фасонних порожнин кувальних штампів .....	7
Завдання № 3. Вивчення впливу технологічних параметрів на процес різання лазером .....	49
Завдання № 4. Вивчення особливостей електроерозійнохімічної обробки .....	60
Перелік джерел посилання .....	65