

В. І. Носуленко, В. М. Шмельов

*Розмірна обробка металів
електричною дугою*

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

В. І. Носуленко, В. М. Шмельов

*Розмірна обробка металів
електричною дугою*

Навчальний посібник

УДК 621.9.048.4

H84

Рецензенти: **Кириченко А.М.**, доктор технічних наук, професор, зав. кафедри металорізальних верстатів та систем Центральноукраїнського національного технічного університету;

Боков В.М., кандидат технічних наук, професор кафедри обробки металів тиском та спецтехнологій Центральноукраїнського національного технічного університету

Затверджено вченою радою Центральноукраїнського національного технічного університету. Протокол №10 від 30 липня 2017 року.

Носуленко В. І., Шмельов В. М.

Розмірна обробка металів електричною дугою: Навчальний посібник. – Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2017. – 256 с.

ISBN 978-617-7079-62-9

Описано фізичні основи, технологія, пристрої та верстати розмірної обробки металів електричною дугою.

Навчальний посібник для студентів технічних спеціальностей, аспірантів та фахівців машинобудівних спеціальностей.

© Носуленко В. І., Шмельов В. М., 2017

ВСТУП

Підвищення ефективності суспільного виробництва пов'язано, перш за все, з розвитком машинобудування та широким впровадженням у виробництво прогресивних технологій. Основою машинобудування є металообробка, яка представлена різноманітними традиційними способами обробки металів різанням, тиском та литтям, а також перспективними, але порівняно мало вивченими і такими, що мають обмежене практичне застосування різноманітними процесами так званої електротехнології (електрофізичними та електрохімічними способами обробки) [1].

Одним із прогресивних способів розмірної електрофізичної обробки металів, що забезпечує широкі технологічні можливості, є традиційна електророзрядна обробка (ЕРО) або інакше електроерозійна обробка (ЕЕО), що заснована на використанні нестационарних, іскрових (імпульсних) електричних розрядів. Проте вона знаходить обмежене практичне застосування, оскільки не забезпечує достатньо високої продуктивності. В цьому зв'язку помітний практичний інтерес являє спосіб, що отримав назву розмірна обробка металів електричною дугою, надалі РОД [2...124].

РОД – це принципово новий процес [68], заснований на використанні стаціонарної електричної дуги. Він є різновидом ЕРО, по суті, наступним етапом її розвитку. Порівняно з відомими способами ЕРО, заснованими на використанні нестационарного електричного розряду (електроіскрова обробка), РОД забезпечує такі переваги:

1. Значно більш високу продуктивність (в 5...10 разів і більше), що наближується до продуктивності обробки металів різанням. Продуктивність РОД прямо пропорційна струму дуги. В умовах РОД струм дуги може досягати сотень і тисяч ампер. Відомих обмежень по струму обробки, характерних для електроіскрової обробки, тут нема.

2. Менші питомі витрати електроенергії (приблизно вдвічі), що помітно підвищує економічну ефективність процесу.

3. Джерела живлення технологічним струмом (звичайні джерела живлення зварювальної дуги) значно дешевші (в 3...5 разів), широко розповсюджені та загальнодоступні, є в достатній кількості.

4. Розроблені порівняно прості та дешеві електроерозійні верстати РОД та системний ряд компактних, простих і дешевих електроерозійних головок (ЕЕГ) реалізують концепцію локального підведення робочої рідини в зону обробки (тобто робочої ванни з рідиною, як це характерно для звичайних електроерозійних верстатів, нема). Це дозволяє високоефективно здійснити обробку як профільованим, так і непрофільованим електродом, як на універсальних і спеціальних верстатах РОД, так і на будь-яких металорізальних верстатах без втрати останніми своїх основних функцій, як в найбільш сучасному інструментальному цеху, так і в будь-якій ремонтній майстерні. Тому верстати РОД стають верстатами масового попиту.

Як високоефективний альтернативний процес спосіб РОД порівняно з традиційними методами металообробки (різанням, тиском) забезпечує такі переваги:

1. Вихідний енергоносій (електроенергія) не перетворюється в силову енергію (тобто не потрібен двигун і відповідні ланки кінематичного ланцюга верстата), а реалізується в зоні обробки безпосередньо, виконуючи відповідну операцію обробки; при цьому продуктивність обробки може бути змінена простим регулюванням струму обробки. В результаті верстат значно спрощується та здешевлюється, а процес стає більш мобільним.

2. Обробка здійснюється без докладання помітних механічних зусиль до інструмента (силове різання, тиск на інструмент відсутні) та без силової дії на заготовку. Відповідно виключається необхідність передачі значних механічних зусиль через систему верстат-

пристосування-інструмент-деталь (ВПД), що дозволяє помітно спростити та здешевити верстат в цілому.

3. Відсутня необхідність застосування спеціальних інструментів, більш твердих, ніж метал, що обробляється. Інструмент для РОД (електрод) помітно простіший та дешевий, ніж інструменти, які застосовуються при традиційних методах металообробки (різець, свердло, протяжка, штамп).

4. Продуктивність обробки не залежить від твердості та в'язкості металу, який обробляється, що дуже важливо в умовах все зростаючого застосування важкооброблюваних матеріалів.

5. Широкі можливості реалізації різноманітних технологічних схем формоутворення як непрофільованим, так і, особливо, профільованим електродом, зокрема, копіювання форми електрода на поверхні заготовки при простому поступальному русі електрода, що дозволяє отримати аналогічно процесу штампування різноманітні отвори, порожнини, стержні та інші вироби складної форми. При цьому для використання таких операцій в умовах РОД потрібні порівняно прості і дешеві верстати і порівняно дешеві електроди, в той час як при традиційних методах металообробки для досягнення того ж результату треба мати металоємність, порівняно дорогі, часто унікальні верстати та преси і порівняно дорогі інструменти.

6. Існує можливість виконувати ряд технологічних операцій, що не можуть бути виконані іншими методами обробки, наприклад різноманітні глибокі отвори в важкооброблюваних матеріалах.

Викладені переваги РОД, досягнутий рівень розробок, простота реалізації та наявність відповідної техніки (джерел живлення дуги і т. і.) роблять РОД вискоелективним альтернативним процесом металообробки, що має широкі технологічні можливості, визначену область раціонального застосування та забезпечує високу економічну ефективність, перш за все, більш високу продуктивність та ресурсозбереження.

1. РОЗМІРНА ОБРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЮ ДУГОЮ ЯК СПОСІБ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНОЇ ОБРОБКИ

1.1. Сутність розмірної обробки металів електричною дугою

Сутність розмірної обробки металів електричною дугою (РОД) полягає в тому [68], що обробку здійснюють стаціонарною електричною дугою, яка горить поміж електродом-інструментом (ЕІ) і електродом-заготовкою (ЕЗ) в потоці рідини при динамічному тиску потоку в зоні обробки не менше $1...2\text{кПа}$ (що відповідає швидкості потоку приблизно $1...2\text{м/с}$). Звичайно РОД здійснюється дуговим розрядом, що горить в поперечному, по суті, потоці робочої рідини (рис. 1.1). Одержаний таким чином дуговий розряд переміщується по поверхні електродів і має високі енергетичні характеристики, в зв'язку з чим відбувається інтенсивне локальне руйнування металу за рахунок випаровування і крапельного викидання розплаву, а потік рідини видаляє із зони обробки отримані продукти ерозії. Все це в сукупності забезпечує оптимальне протікання процесу розмірної обробки.

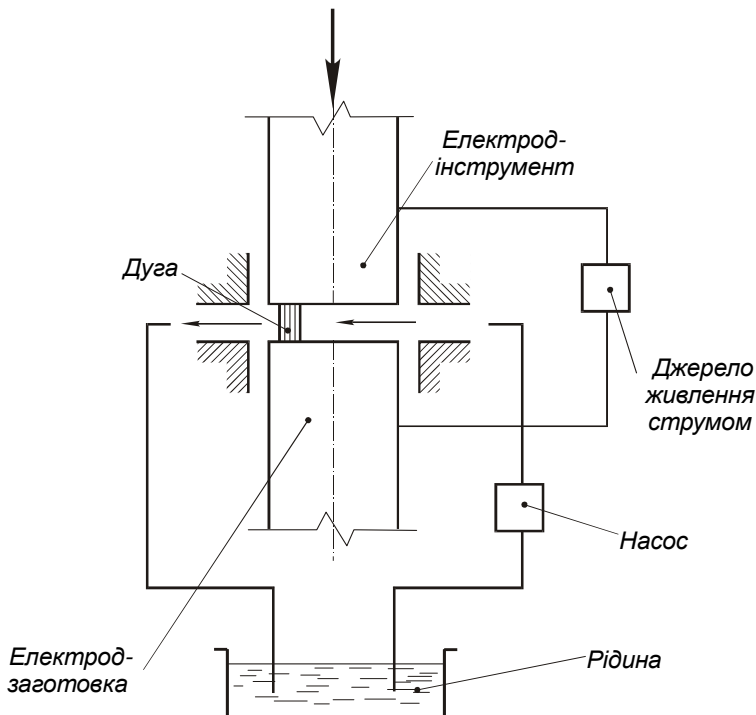


Рис. 1.1. Принципова схема РОД

Типова осцилограма струму і напруги дуги при РОД (рис. 1.2) не відрізняється від типової осцилограми струму і напруги звичайної стаціонарної дуги типу зварювальної [125, с. 17] чи плазмової дуги для різання металу [126, с. 150].

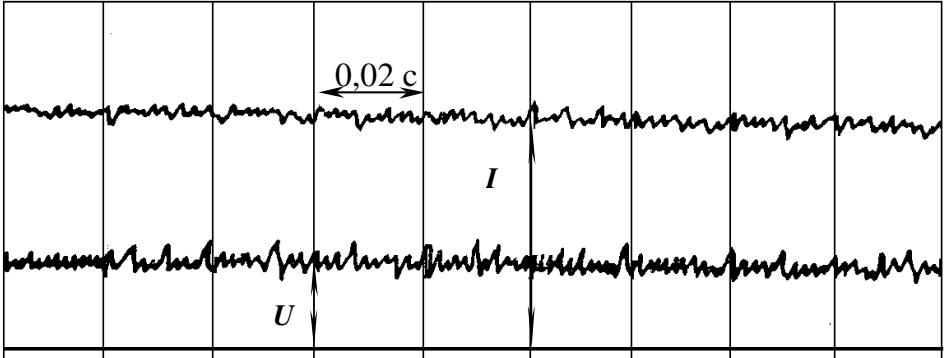


Рис. 1.2. Типова осцилограма струму I та напруги U дуги при РОД

В умовах РОД енергетичні характеристики розряду (густина струму, напруженість електричного поля і т. і.) регулюються легко, плавно і в широких межах за рахунок зміни динамічного тиску потоку і при збільшенні (зменшенні) останнього збільшуються (зменшуються), що необхідно розглядати як результат саморегулювання енергетичних характеристик розряду в функції динамічного тиску потоку. Як наслідок, в умовах такого процесу можна легко керувати якістю процесу обробки за рахунок зміни динамічного тиску, здійснюючи обробку в широкому діапазоні режимів, починаючи від грубого розмірного плавлення і аж до превалюючого тонкого розмірного випаровування. Таким чином, динамічний тиск потоку робочої рідини в умовах РОД є основним параметром процесу, який визначає, в кінцевому підсумку, можливість та якісну сторону процесу обробки.

Робочою рідиною є рідини-діелектрики, наприклад, нафтопродукти, вода, різні розчини, емульсії та суспензії. Зазначимо, що в умовах РОД можуть бути ефективно використані також

різноманітні гази. Проте рідини-діелектрики, принаймні зараз, мають перевагу з точки зору технологічних та експлуатаційних характеристик і тому РОД звичайно реалізують із застосуванням середовищ-рідин.

ЕІ можуть бути плавкими, наприклад сталевими, і неплавкими, наприклад вольфрамовими, профільованими і непрофільованими. Вони виготовляються з тих же матеріалів і мають приблизно таку ж ерозійну стійкість, як і при відомих способах ЕРО. Так, високу стійкість забезпечують ЕІ з графіту при застосуванні робочої рідини із нафтопродуктів.

Дуга при РОД може живитись як постійним, так і змінним струмом. При живленні дуги змінним струмом стабільність процесу гірша, а продуктивність помітно знижується. В цьому зв'язку, а також з метою використання ефекту полярності електричної ерозії, який дозволяє забезпечити максимальну продуктивність обробки ЕЗ і мінімальний знос ЕІ, дугу при РОД живлять постійним струмом. Джерелом живлення струмом є зварювальні випрямлячі або генератори із зовнішньою падаючою характеристикою. Напруга робочого ходу джерел живлення визначається особливостями реалізації технологічних схем формоутворення і коливається в межах 20...50В і більше; напруга холостого ходу коливається в межах 50...100В і більше. Потужність джерел живлення струмом визначає продуктивність обробки і може досягати десятків і сотень кіловат.

Якщо змінювати типорозмір електродів і надавати їм відповідні рухи подачі, можна при використанні відповідних технологічних прийомів реалізувати зазначені закономірності процесу РОД і таким чином реалізувати практично всі відомі технологічні схеми формоутворення.

Якість обробленої поверхні, яка визначається її шорсткістю та глибиною зони термічного впливу, є, головним чином, функцією динамічного тиску потоку робочої рідини і, менше, робочого струму, покращується при збільшенні динамічного тиску потоку та зменшенні

струму і, в цілому, не поступається досягнутій при відомих способах ЕРО. Глибина, структура і твердість зони термічного впливу легко регулюються за рахунок зміни динамічного тиску потоку і при збільшенні останнього до відповідних значень незалежно від струму ця зона може бути відсутньою.

Оптимальна величина міжелектродних зазорів (МЕЗ) коливається в межах 0,05...0,15мм. Точність обробки, яка визначається перш за все зносом ЕІ та коливаннями величини МЕЗ, в цілому не поступається досягнутій при відомих способах ЕРО.

Порівняльна оброблюваність матеріалів в умовах РОД оцінюється аналогічно, як і при відомих способах ЕРО. Продуктивність обробки в першому наближенні прямо пропорційна струму, який може досягати кількох тисяч ампер, і в багато разів перевищує продуктивність електроіскрової (електроімпульсної) обробки. Наприклад, при струмі обробки 1000А продуктивність при обробці сталей досягає 30000мм³/хв при R_a 6,3мкм та глибині зони термічного впливу в межах кількох сотих долей міліметра. Питомі витрати електроенергії в залежності від режимів обробки складають для сталей 3...10кВт·год/кг (100...300кДж/см³).

Особливістю способу є необхідність реалізації досить великих розходу та тиску (до 2МПа і більше) робочої рідини.

Процес РОД потрібно розглядати як спосіб ЕРО.

1.2. Розмірна обробка електричною дугою як наступний етап розвитку ЕРО

Згідно існуючих уявлень та прийнятої, інколи випадково, термінології при опису процесів ЕРО в залежності від виду електричних розрядів, параметрів імпульсів струму, напруги та інших умов розрізняють електроіскрову обробку, високочастотну обробку, електроімпульсну обробку, електроконтактну обробку, обробку короткою дугою, обробку квазістаціонарною дугою постійного

струму, РОД, плазмову обробку та інші, кожна з яких відрізняється вихідними технологічними характеристиками, обладнанням та має свою область промислового застосування.

Основою будь-якого знання є пізнання сутності об'єкту. В цьому, власне, полягає основна задача науки. Логіка розвитку пізнання приводить до необхідності чітко відрізнити те, що складає суть об'єкта, від того, якою вона здається, якою ми її бачимо. Суть є вузловим пунктом внутрішнього зв'язку основних моментів, сторін об'єкта, а досягнути суті об'єкта – це зрозуміти причини і умови його виникнення, його визначальні властивості, закони його життя, характерні для нього протиріччя, тенденції розвитку.

В цьому зв'язку покажемо, що РОД має природний зв'язок і однакову фізичну природу з відомими способами ЕРО, а несхожість способів ЕРО, їх відміни, які спостерігаються, це лише різні форми виявлення однієї й тієї ж фізичної суті.

Очевидно, що пізнання суті РОД – це, перш за все, пізнання фізичної суті, фізичної природи “інструмента” обробки, яким є стаціонарна електрична дуга в умовах РОД. Пізнання ж загального і відмін у різних способах, різновидах ЕРО – це перш за все пізнання загального і відмін електричних розрядів, які при цьому застосовуються. Покажемо, що всі різновиди ЕРО засновані на використанні електричних розрядів єдиної фізичної природи – того, що називають електричним дуговим розрядом. Саме це є суть “інструмента” обробки в умовах ЕРО. Саме це є те спільне, що об'єднує і робить схожими всі відомі способи ЕРО. Несхожість, відміни електричних розрядів в умовах різноманітних способів ЕРО – це лише різні форми виявлення однієї і тієї ж фізичної суті – електричного дугового розряду.

Надалі на основі експериментальних даних, покажемо, що, дійсно, всі різновиди електроерозійної обробки засновані на

використанні електричних дугових розрядів, які реалізуються в різноманітних умовах взаємодії з зовнішнім середовищем і відрізняються тим, що неодмінно забезпечують енергетичні характеристики, достатні для локального руйнування металу за рахунок його плавлення і випаровування.

Сучасний науковий світогляд твердо спирається на принцип руху, зміни, розвитку як загальний фундаментальний принцип буття і пізнання. Для того, щоб правильно зрозуміти будь-яке явище, треба розглядати його в зв'язку з іншими явищами, знати його походження і витоки та подальший розвиток. В цьому зв'язку простежимо за розвитком ЕРО. Покажемо, що РОД має природний зв'язок з відомими способами ЕРО, а її поява підготовлена попереднім розвитком теорії і практики ЕРО і, в кінцевому підсумку, РОД може розглядатись як наступний етап розвитку ЕРО (рис. 1.3). ЕРО, як зазначалось, заснована на використанні перетвореної в тепло енергії електричних дугових розрядів різної тривалості, що горять поміж ЕІ та ЕЗ. Історично склалось так, що практичне застосування для обробки металів раніше інших отримав стаціонарний електричний дуговий розряд – так звана електрична вольтова дуга. 1886 року в Росії Бенардосу М.М. була видана “Привілея” за № 194 на “Спосіб з’єднання і роз’єднання металів безпосередньою дією електричного струму”. На цей винахід Бенардос отримав патенти в Росії, Франції, Бельгії, Великобританії, Італії, Німеччині, Швеції, Норвегії, Данії, Швейцарії і Австро-Угорщині.

В опису до цієї “Привілеї” суть винаходу викладена так: “Предмет винаходу являє *спосіб* (тут і надалі виділено нами - В. Н.) з’єднання і *роз’єднання металів дією електричного струму*, який названо “електрогефест” і *заснований на безпосередньому утворенні вольтової дуги між місцем обробки металу, що становить один електрод, і підведеної до цього місця рукоятки з другим електродом,*

Електророзрядна обробка металів

Рік	1886	1925	1943	1948	1968
Автор	Бенардос Н. Н.	Грумпельт О.	Лазаренко Б. Р.	Писаревський М. П.	Носулєнко В. І.
Документ	Привієєв Росії № 194	Патент СРСР № 2776	СССР А. с. № 70010	СССР А. с. № 80718	СССР А. с. № 368975
Рівновиди способів	Обробка електричною дугою	Електроконтактна обробка	Електроіскрова обробка	Електроімпульсна обробка	РОД
Опис	Спосіб...роз'єднання металів дією електричного струму ... заочиснений на утворенні вольфової дуги між зісцем обробки металу, що становить один електрод, і другим електродом (вугілем). Цим способом можуть бути виконані такі роботи : ... роз'єднання і розривання металів на частини, середжування або виготовлення отворів і порожкилин... Вугілля або речовина, що залишає вугілля може мати різні форми.	...метали піддається дії перерваної дуги, яку отримують за допомогою тою зубчатого диска, що має периферійну швицькість близько 120 м/с	...застосовано на використанні іскрового розряду тривалістю до кількох мікросекунд, що відбувається в рідкому середовищі	... заочиснено на використанні імпульсних дугових розрядів великої приваєлості (до 10^{-3} с)	... обробку здійснюють в потопці ріднини стаціонарним електричним дуговым розрядом
Вид розряду	Стаціонарний дуговий	Імпульсний	Іскровий	Імпульсний	Стаціонарний дуговий
Характеристика розряду	Стаціонарний дуговий	Нестаціонарний дуговий			Стаціонарний дуговий
Етапи розвитку	Т-єза	АНПТ-єза			Синтєз

Рис. 1.3. Етапи розвитку ЕРО

з'єднаний з відповідним полюсом електричного струму. *Цим способом можуть бути виконані такі роботи: з'єднання частин поміж собою, роз'єднання і розрізання металів на частини, свердлування або виготовлення отворів і порожнин та наплавлення шарами. Вольтова дуга утворюється в місці, де повинна бути виконана одна з вищезгаданих робіт, наближенням вугілля (або іншої струмопровідної речовини) до частини, що обробляється, причому це вугілля буде позитивним або негативним полюсом, а другим полюсом буде оброблювана частина. Вугілля або речовина, що замінює вугілля, може мати різні форми.*”

Таким чином виникнення ЕРО треба віднести до тих часів, коли електрична дуга знайшла застосування для плавлення і грубої обробки металевих заготовок, оскільки саме до цього періоду, як зазначено в “Привілеї”, треба віднести перші спроби використати електричну дугу для “свердлування або виготовлення отворів і порожнин”. Як бачимо вихідним пунктом, початковим етапом розвитку ЕРО є використання для обробки металу звичайної електричної дуги, яка являла собою стаціонарний електричний дуговий розряд. Прослідкуємо за розвитком ЕРО, починаючи саме з цього моменту.

Найбільш повним, всебічним і глибоким ученням про розвиток є діалектика – наука про загальні закони руху і розвитку природи, людського суспільства і мислення. Закони діалектики діють всюди, вони охоплюють всі сторони дійсності. Вони суть, закони природи, суспільства і мислення. Тому вони мають загальне пізнавальне методологічне значення, і отже, діалектика - це метод не однієї якої-небудь області знання, а загальний метод пізнавальної діяльності людей.

Як відомо, на питання, що є джерелом руху, розвитку, чому відбувається розвиток, відповідає один із основних законів діалектики – закон єдності і боротьби протилежностей. Згідно цього закону, всім речам, явищам, процесам властиві внутрішні протиріччя, протилежні сторони і тенденції, які знаходяться в стані взаємозаперечення;

боротьба протилежностей дає внутрішній імпульс до розвитку, веде до нарощування протиріч, які розв'язуються на відповідному етапі зникненням старого і появою нового.

З появою ЕРО виникли і почали розвиватись протиріччя, властиві даному процесу обробки і такі, що складали рушійну силу його розвитку. Ці протиріччя полягали в тому, що з однієї сторони, застосування електричної дуги для обробки металів відкривало великі технологічні можливості, дозволяло, наприклад, обробляти метали з будь-якими механічними властивостями, не вимагало використання інструменту більш твердого, ніж оброблюваний метал і т. і. Проте з іншої сторони, як кількісна, так і особливо якісна сторони процесу обробки не змогли задовольнити потреб практики. Дійсно, застосування на початку розвитку ЕРО звичайної електричної дуги не змогло вирішити задачу розмірної обробки металу, оскільки звичайна електрична дуга не забезпечила достатньо високих для локального руйнування металу енергетичних характеристик розряду. Отже, для того щоб отримати відповідне практичне застосування, ЕРО повинна була мати подальший розвиток.

На питання про те, в якому напрямку іде розвиток, відповідає один із основних законів діалектики – закон заперечень заперечень. Дія цього закону обумовлює зв'язок, спадкоємність між тим, що заперечується і тим, що заперечує, внаслідок чого діалектичне заперечення виступає не як голе заперечення, що відкидає попередній розвиток, а як умова розвитку, що утримує та зберігає в собі весь позитивний зміст попередніх стадій розвитку, повторюючого на вищій основі деякі риси вихідних сходинок і такого, що має в цілому поступальний, зростаючий характер. Часто процес заперечень зображують в термінах: “теза” (вихідний пункт розвитку), “антитеза” (перше заперечення) та “синтез” (друге заперечення), розглядаючи суть розвитку в цій трійці. Поступальність розвитку, проте, не можна розуміти спрощено, вона реалізується в боротьбі різних тенденцій, пробиває собі дорогу лише в підсумку, в масі перехресних ліній

розвитку. Окремі лінії загального розвитку можуть бути спрямовані не вперед, а назад, виражати моменти регресу, руху назад. Кожний прогрес в органічному розвитку є разом з тим і регресом, оскільки закріплює односторонній розвиток і виключає можливість розвитку в багатьох інших напрямках.

Розвиток ЕРО, як відомо, пішов в напрямку зміни виду електричного розряду, а саме: на зміну стаціонарному дуговому розряду (звичайній електричній дузі) прийшов нестационарний імпульсний дуговий розряд. Такий розряд вже забезпечував достатньо високі для локального руйнування металу енергетичні характеристики і був використаний для розмірної обробки металів. Так з'явилась електроконтактна обробка. Перші відомості практичного використання електроконтактної обробки відносяться до 1925р. [127], коли Грумпельт О. запропонував електрофрикційний спосіб розрізання металу при напрузі 5...20В перерваними дугами, що створювались зубчастим диском, який обертався з окружною швидкістю до 120м/с .

Таким чином вихідний пункт розвитку ЕРО (теза) відповідає використанню для обробки металів стаціонарного електричного дугового розряду, а перше заперечення (антитеза) відповідає використанню для обробки металів нестационарного дугового розряду.

Якісно новим етапом розвитку ЕРО стала електроіскрова обробка, що була запропонована Б. Р. Лазаренко і Н. І. Лазаренко 1943 року [128] і яка відрізняється використанням так званих іскрових розрядів (електричних дугових розрядів малої тривалості). Така обробка забезпечила якісну сторону процесу обробки і першою з електроерозійних способів обробки отримала достатньо широке практичне застосування.

Електроіскрова обробка, як і електроконтактна, заснована на використанні нестационарних дугових розрядів, але це якісно інші

розряди – їх тривалість значно менша, а енергетичні характеристики значно вищі, в зв'язку з чим, власне, і виявляється можливим забезпечити якісну сторону процесу обробки. Перед нами, таким чином, приклад прояву одного із основних законів діалектики – закону переходу кількісних змін (тривалості розряду) в якісні (енергетичні характеристики розряду), який, як відомо, відповідає на питання, як відбувається розвиток. Цей закон являє собою такий взаємозв'язок і таку взаємодію кількісних і якісних сторін явища, процесу, внаслідок яких дрібні, спочатку непомітні кількісні зміни, поступово накопичуючись, рано чи пізно порушують міру явища, процесу і викликають докорінні зміни, які спостерігаються у вигляді стрибків і здійснюються залежно від природи об'єктів і умов їх розвитку в різноманітних формах. Цей закон орієнтує на те, щоб розглядати і вивчати явища як єдність якісної і кількісної сторін, бачити складні взаємозв'язки і взаємодію цих сторін, зміну співвідношень поміж ними. Кількісні зміни відбуваються безперервно і поступово. Стадія безперервного кількісного розвитку не змінює якості, проте створює для цього передумови. Якісні зміни відбуваються у вигляді розриву безперервності, поступовості, іншими словами, будь-яка якісна зміна відбувається у вигляді стрибка. Завершуючи будь-який процес, стрибок означає момент якісної зміни явища, перелом, критичну стадію розвитку. Отже, розвиток, будучи єдністю кількісних і якісних змін, є разом з тим і єдністю безперервності і перервності.

Оскільки електроіскрова обробка в зв'язку з рядом недоліків (низька продуктивність, великий знос ЕІ, висока енергоємність процесу) не змогла повністю задовольнити потреби практики, ЕРО отримує подальший розвиток. І вже 1948 р. Писаревський М. П. пропонує дугоімпульсний спосіб обробки [129], заснований на використанні імпульсних дугових розрядів досить великої тривалості.

Так з'являється електроімпульсна обробка, яка в результаті робіт ряду учених і винахідників на цей час досягла найвищої досконалості серед відомих електроерозійних способів обробки. Порівняно з електроіскровою обробкою електроімпульсна обробка забезпечила значно більш високу продуктивність, меншу енергоємність процесу, незначний знос ЕІ.

Проте, не зважаючи на те, що ЕРО, яка представлена електроіскровою, електроімпульсною і швидкопрогресуючою електроконтактною обробкою, досягла високої досконалості, вона все ще має ряд суттєвих недоліків, не завжди може задовольнити потреби практики, недостатньо конкурентоспроможна не лише з обробкою різанням, але і з електрохімічною обробкою, перш за все за продуктивністю. Тому є потреба в подальшому розвитку ЕРО.

Якщо підвести деякі підсумки, можна зазначити, що викликані потребами практики способи електроіскрової, електроімпульсної і електроконтактної обробки, які засновані на використанні нестационарних дугових розрядів різної тривалості, отримали відповідний розвиток і достатньо широке застосування і являють собою перше заперечення (антитезу) вихідного пункту розвитку ЕРО – обробки стаціонарним електричним дуговим розрядом (тези).

Проте, як відомо, одним актом заперечення розвиток явища, процесу не вичерпується. Дійсно, як би не зберігались в першому запереченні якісь елементи позитивного, притаманні тому, що підлягало запереченню, воно, тобто перше заперечення, є його протилежністю. Стосунки вихідної форми і першого заперечення – це стосунки протилежностей, двох протилежних форм. Вони містять в собі абстрактну однобічність, яка повинна бути подолана, щоб з'явилась можливість подальшого розвитку.

В цьому випадку заперечення і виступає в якості синтезу всього попереднього розвитку, синтезу цих однобічно протилежних форм, що долає і розв'язує протиріччя поміж ними. Оскільки

підлягає запереченню те, що заперечувало вихідну форму, то зрозуміло, що таке подвійне заперечення веде до відновлення деяких сторін, рис цієї вихідної форми.

Таким чином, якщо виходити з викладеного, можна зробити висновок, що подальший розвиток ЕРО повинен йти в напрямку використання стаціонарного електричного дугового розряду. Дійсно, згідно закону заперечень вдосконалення і розвиток ЕРО, заснованої на використанні нестационарних електричних дугових розрядів різної тривалості, об'єктивно повинно містити в собі своє заперечення, тобто тенденцію до стаціонарного електричного дугового розряду. Якщо проаналізувати розвиток ЕРО можна побачити, що тенденція до використання стаціонарного електричного дугового розряду намітилась вже давно, ще з появою електроімпульсної обробки, яка порівняно з електроіскровою обробкою реалізує електричні дугові розряди більшої тривалості. Найбільш помітно ця тенденція проглядається в розвитку електроконтактної обробки, яка на сьогодні досягла досить високого рівня і при реалізації якої використовуються нестационарні електричні дугові розряди найбільшої тривалості аж до стаціонарного [130].

В кінцевому підсумку тенденція розвитку ЕРО до використання стаціонарного електричного дугового розряду повинна привести до якісного стрибка, тобто до використання стаціонарного електричного дугового розряду що, на нашу думку, об'єктивно проявляється в запропонованому нами способі РОД.

РОД являє собою ніби повернення до вихідного пункту розвитку ЕРО, коли використовувалась звичайна стаціонарна електрична дуга, бо і те, й інше в своїй основі передбачає використання стаціонарного електричного дугового розряду. Проте це повернення не є простим повторенням, воно являє собою якісно зовсім інше, виступаючи в якості синтезу всього попереднього розвитку ЕРО, а саме: від першого етапу розвитку (тези) залишилась форма розряду (стаціонарний електричний дуговий розряд), як така,

що має перевагу перед нестационарним розрядом з точки зору простоти отримання і забезпечення кількісної сторони процесу обробки (високої продуктивності); від другого етапу розвитку (антитеза) – залишались достатньо високі для локального руйнування металу енергетичні характеристики розряду, в зв'язку з чим є можливим забезпечити якісну сторону процесу обробки.

Таким чином, якщо підвести підсумки, можна зробити висновок, що РОД має природний зв'язок з відомими способами ЕРО, заснованими на використанні нестационарного дугового розряду, а її поява підготовлена попереднім розвитком ЕРО, є природним розвитком останньої, і, отже, РОД може розглядатись як спосіб ЕРО. Зрозуміло, що РОД не може вирішити всіх проблем ЕРО, в зв'язку з чим не тільки не виключає, але й передбачає широке застосування відомих способів ЕРО – електроіскрового, електроімпульсного та електроконтактного, кожен з яких відрізняється своїми особливостями, має свою область промислового застосування і безперервно вдосконалюється, доповнюючи один одного. Тому можна зазначити, що з появою РОД технологічні можливості ЕРО в цілому значно зросли, зросла її економічна ефективність та конкурентоспроможність з іншими способами металообробки і, перш за все, з обробкою металів різанням.

1.3. Про класифікаційні ознаки та класифікацію способів ЕРО

В світі не існує ізольованих явищ, кожне з них обумовлене якимось іншими явищами. Явище ж, якщо воно вирване із свого природного зв'язку, перетворюється в дещо незрозуміле, ірраціональне. Звичайно в процесі пізнання, ми, щоб дослідити те чи інше явище, виділяємо його на початку із загального зв'язку. Але рано чи пізно логіка дослідження вимагає поновлення цього зв'язку, інакше не можливо отримати дійсний образ явища. Загальний універсальний зв'язок, взаємодія явищ і процесів повинні знайти

відображення у взаємозв'язку людських понять. Тільки в цьому випадку людина може пізнати світ в його єдності і руху. Наукове поняття чи система понять, що утворюються людиною в процесі пізнання, зокрема, класифікація способів ЕРО, є не що інше, як відображення внутрішнього зв'язку явищ, процесів поміж ними.

Поява РОД, на нашу думку, дозволяє по новому поглянути на процес ЕРО і на фізичні умови його реалізації. Дійсно, якщо раніше вважали, що необхідною умовою є дискретність, перерваність, нестационарність електричних розрядів [131, с. 11, 34 і інші], то зараз цього сказати не можна. Зокрема, ми переконуємось, що застосування нестационарних електричних розрядів не є обов'язковою умовою реалізації процесу ЕРО, і отже, для цього, в кінцевому підсумку, важливою є не тривалість і енергія імпульсу, а дещо інше. В зв'язку з цим плідною є спроба проаналізувати основні фактори, що забезпечують оптимальне протікання ЕРО, з тим, щоб установити основні фізичні умови її реалізації, а отже, і основні класифікаційні ознаки ЕРО.

Розробка класифікаційних ознак і удосконалення класифікації способів ЕРО має велике наукове і методологічне значення, оскільки дозволяє поглянути на процес електричної ерозії з точки зору простої суті, яка лежить в основі цього складного явища, дозволяє відокремити ознаки суттєві від несуттєвих і виявити загальні для всіх способів ще невідомі внутрішні зв'язки та закономірності, дозволяє знаходити нові комбінації визначальних ознак та описати деякі ще невідомі властивості обробки, дозволяє вибрати напрямки пошукових досліджень і передбачити основні тенденції та можливі напрямки в розвитку ЕРО.

Основні класифікаційні ознаки ЕРО повинні відображувати основні фізичні умови її реалізації і тому розробка класифікаційних ознак повинна починатись з аналізу останніх. Теплова природа електричної ерозії, як відомо, доведена. Тому проаналізуємо класифікаційні ознаки відомих способів ЕРО перш за все з точки зору фізики тепла (рис. 1.4).

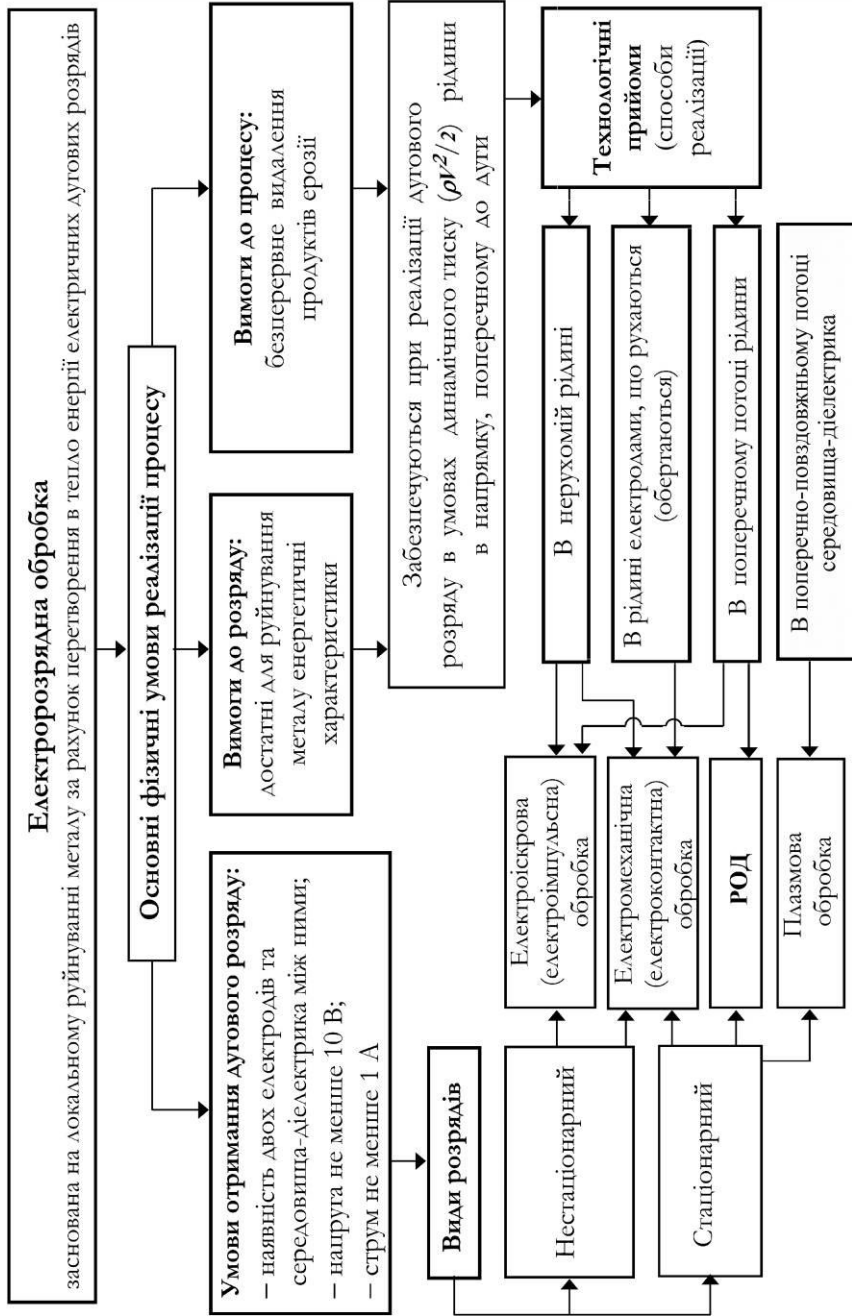


Рис. 1.4. Класифікаційні ознаки і класифікація способів ЕРО

ЕЕО заснована на використанні для локального руйнування металу перетвореної в тепло енергії електричних дугових розрядів. Сформулюємо основні фізичні умови реалізації ЕРО. Для цього почнемо з аналізу різновидів електричних розрядів, які застосовують для ЕРО.

Для ЕРО, як зазначалось, можна використовувати як стаціонарний, так і нестаціонарний електричні дугові розряди, причому за своїм ефектом теплової дії на металеві електроди (зона термічного впливу, шорсткість і інше) ці розряди практично не відрізняються. Є можливим, наприклад, підібрати режими, при яких для обох видів розрядів можна отримати однаковий результат (наприклад, при однаковій шорсткості обробленої поверхні зона термічного впливу також не буде відрізнятись).

В такому випадку стаціонарний розряд в умовах РОД і нестаціонарний розряд при відомих способах ЕРО треба за їх якістю розглядати як рівноцінні джерела тепла, а їх енергетичні характеристики (напруженість електричного поля і густина струму в стовпі розряду, сумарне значення катодного і анодного падінь напруги та інше) при відповідних умовах повинні співпадати. І дійсно, якщо порівняти енергетичні характеристики стаціонарного розряду в умовах РОД і енергетичні характеристики нестаціонарного розряду в умовах відомих способів ЕРО [132, с. 12...14], то виявляється що це саме так. Є, проте, і відміни. Різними є і технологічні можливості таких джерел тепла. Дійсно, при протіканні нестаціонарного розряду його енергетичні характеристики змінюються в широких межах (наприклад, напруженість електричного поля в стовпі розряду може змінюватись від 5 до 0,5кВ/см), тоді як енергетичні характеристики стаціонарного розряду в умовах РОД досить стабільні (так напруженість електричного поля в стовпі розряду може бути незалежно від величини струму не менше 3 кВ/см). Проте з точки зору фізичної суті явища – це одне й те ж, це електричний дуговий розряд відповідних енергетичних характеристик. Можна, наприклад, сказати, що електрична іскра – це дуга зі змінними в часі енергетичними характеристиками, а можна,

навпаки, сказати, що дуга в умовах РОД – це тривала іскра. Тому, як уже зазначалось, стаціонарний і нестаціонарний електричні розряди в умовах ЕРО мають однакову фізичну природу і підкоряються одним і тим же законам.

Враховуючи викладене, сформулюємо основні фізичні умови реалізації ЕРО. Ці умови повинні, певно, включати в себе, по-перше, загальні умови протікання електричного дугового розряду, по-друге, повинні відображати особливі вимоги до розряду, що використовується в умовах ЕРО, і, по-третє, повинні відображати особливі вимоги до процесу електричної ерозії з точки зору його оптимального протікання.

Найбільш загальні умови протікання електричного дугового розряду можна звести до таких:

1. Наявність двох електродів-провідників електричного струму із середовищем-діелектриком в МЕЗ, що забезпечує безперервно поновлюваний електричний опір протіканню струму в МЕЗ.

2. Наявність напруги на електродах не менше 10...20В [125, с. 15].

3. Струм не менше 1 А [133, с. 13].

Основні вимоги до електричного розряду, який використовується в умовах ЕРО, полягають в тому, щоб він забезпечував достатньо високі для локального руйнування металу енергетичні характеристики (оскільки, наприклад, звичайна зварювальна дуга цього не забезпечує). Основні вимоги до процесу електричної ерозії зводяться, перш за все, до необхідності безперервного видалення із зони обробки продуктів ерозії. В такому випадку запитаємо, яким чином можна забезпечити оптимальне протікання процесу ЕРО або, що те ж, яким чином забезпечуються основні фізичні умови реалізації процесу РОД?

Перш за все, установемо фактори, що обумовлюють отримання достатньо високих для локального руйнування металу енергетичних характеристик розряду. Як відомо, енергетичні характеристики розряду є головним чином функцією складу і стану зовнішнього середовища в міжелектродному зазорі та матеріалу електродів. Якщо змінювати матеріал електродів і склад зовнішнього середовища в

міжелектродному зазорі, можна регулювати енергетичні характеристики розряду. Проте при цьому вони виявляються недостатніми для локального руйнування металу, а отже і для ЕРО. Тобто, в умовах ЕРО такий технологічний прийом (зміна складу зовнішнього середовища в міжелектродному зазорі та матеріалу електродів) може розглядатись лише як допоміжний, в поєднанні з іншими, більш важливими технологічними факторами.

Стан зовнішнього середовища характеризується, як відомо, температурою і тиском. Змінювати температуру зовнішнього середовища з метою регулювання енергетичних характеристик складно і малоефективно. Тиск зовнішнього середовища, а це перш за все рідини і газу, може мати статичний характер, коли середовище практично нерухоме, або ж динамічний характер, коли розряд горить в потоці середовища-діелектрика, наприклад рідини. Коли тиск зовнішнього середовища має статичний характер, з підвищенням тиску середовища напруженість електричного поля і густина струму, а відповідно, і енергетичні характеристики розряду зростають [133, с.41...46]. Проте малоефективність та труднощі практичного здійснення роблять цей спосіб регулювання енергетичних характеристик розряду в умовах ЕРО неприйнятним.

Отже, щоб отримати достатньо високі для ЕРО енергетичні характеристики розряду залишається, таким чином, єдина можливість, єдиний технологічний фактор – динамічний тиск робочого середовища, тобто розряд повинен горіти в потоці середовища-діелектрика, а якщо більш конкретно – в поперечному потоці середовища-діелектрика. При цьому енергетичні характеристики розряду виявляються достатніми для локального руйнування металу, а потік середовища-діелектрика видаляє продукти ерозії.

Таким чином в найзагальнішому випадку основні фізичні умови реалізації ЕРО можуть бути сформульовані таким чином: ЕРО реалізується електричним дуговим розрядом в поперечному потоці середовища-діелектрика.

Проведемо аналіз існуючих способів ЕРО з точки зору відповідності цій умові реалізації процесу. При РОД ця умова, як зазначалось, очевидна. Електроіскрова та електроімпульсна обробка реалізують нестационарні електричні розряди в нерухомій

діелектричній рідині. Такі розряди забезпечують достатньо високі для локального руйнування металу енергетичні характеристики також завдяки достатньо високому динамічному тиску зовнішнього середовища на розряд. Це досягається використанням початкової стадії розвитку розряду, коли в результаті протидії рідини розширенню каналу розряду динамічний тиск зовнішнього середовища виявляє себе найбільш ефективно. Дійсно, з цього приводу Б. Н. Золотих [132] зазначає: «Будь-яка рідина в силу її інерційності буде протидіяти розширенню каналу розряду і діяти на перших етапах розвитку розряду як тверда стінка. Це механічне «фокусування» призводить до різкого збільшення густини енергії, а, отже і до різкого збільшення величини ерозії».

Таким чином, нестационарні електричні розряди, які реалізуються в умовах електроіскрової та електроімпульсної обробки, забезпечують зазначені вище основні фізичні умови реалізації ЕРО також в результаті горіння розряду в поперечному потоці середовища-рідини з тією лише особливістю, що при цьому середовище-рідина нерухоме, а переміщується фронт розряду (що, проте, не змінює зазначеної суті), а надалі в результаті пульсацій розряду створюється поперечний потік рідини, який забезпечує евакуацію продуктів ерозії.

Отже, електрична дуга (стаціонарний електричний дуговий розряд) в умовах РОД та іскра, імпульс (нестационарний електричний дуговий розряд) – це лише різні форми прояву одного й того ж явища, які відрізняються різним характером взаємодії електричного розряду з поперечним потоком середовища-діелектрика; при цьому стаціонарний електричний розряд відрізняється достатньо усталеною формою такої взаємодії, а нестационарний електричний розряд - неусталеною.

При електроконтактній обробці використовуються як нестационарні, так і квазістаціонарні електричні дугові розряди [134]. Правомірно зробити висновок, що при електроконтактній обробці реалізується інший, ніж при електроіскровій і електроімпульсній обробці, механізм підвищення енергетичних характеристик розряду, а застосування нестационарних електричних розрядів взагалі не обов'язкова умова реалізації процесу. Який же в такому випадку фізичний механізм цього процесу? Очевидно, це також результат динамічного тиску поперечного потоку середовища-рідини на розряд

з тією лише особливістю, що цей потік створюється як безпосередньо, так і імпульсами, що механічно генеруються електродами, які обертаються. Саме тому застосування нестационарних електричних розрядів в цьому випадку не є обов'язкове. Доречно зазначити, що назва способу «електроконтактна обробка», певно, взагалі не відображає фізичну суть способу. Але тоді назву способу "електроконтактна обробка" слід змінити на таку, що відображає фізичну суть способу і назвати цей процес "електромеханічна обробка" (ЕМО). В умовах такого процесу енергетичні характеристики дуги обмежені, але є достатніми для локального руйнування металу. Так, зона термічного впливу може становити соті частки міліметра.

За умов плазмової обробки, у плазмотронах ефект всебічного, постійного, рівномірного, поперечного до стовпа дуги динамічного впливу потоку середовища-діелектрика досягається за рахунок обмеження площі поперечного перерізу каналу розряду соплом плазмотрона з додатковим динамічним впливом поздовжньо-поперечного потоку на стовп дуги за рахунок прокачування через сопло середовища-діелектрика. До числа основних технологічних факторів слід віднести геометричні параметри сопла і витрата середовища-діелектрика, що, власне, визначає і, відповідно, обмежує енергетичні характеристики дуги. При цьому енергетичні характеристики дуги обмежені, але є достатніми для локального руйнування металу, а зона термічного впливу може становити десяті частки міліметра.

Таким чином всі способи ЕРО засновані на використанні електричних дугових розрядів в поперечному потоці середовища-діелектрика, що є основною і обов'язковою умовою реалізації ЕРО. Отже в такому випадку основною класифікаційною ознакою способів ЕРО треба прийняти спосіб реалізації зазначеної умови.

Зараз, згідно викладеного, відомо три основних прийоми (способи) реалізації цієї основної фізичної умови ЕРО, а саме:

1. Електричний розряд протікає безпосередньо в поперечному потоці середовища-діелектрика. Основний технологічний фактор – швидкість потоку. Цей прийом реалізують при РОД і плазмовій обробці (ПО).

2. Електричний розряд протікає в поперечному потоці середовища-рідини, який (потік) утворюється електродами, що

взаємно переміщуються (звичайно обертаються). Основний технологічний фактор – швидкість відносного руху електродів. Цей прийом реалізують при електроконтактній обробці.

3. Реалізуються нестационарні електричні розряди в нерухомому середовищі-рідині. Основний технологічний фактор – тривалість імпульсу. Цей прийом використовують при електроіскровій та електроімпульсній обробках.

Отже, якщо виходити з того, що основною класифікаційною ознакою способів ЕРО є спосіб їх реалізації згідно зазначеної основної фізичної умови, то можна виділити три основних способи ЕРО:

1. Обробка стаціонарним електричним дуговим розрядом в поперечному потоці рідини (РОД і ПО).

2. Обробка в рідині електричним дуговим розрядом електродами, що обертаються (електроконтактна обробка, а якщо по фізичній суті, то, це електромеханічна обробка).

3. Обробка в рідині нестационарними електричними дуговими розрядами (електроіскрова, електроімпульсна обробка).

Зазначимо, що наведені способи ЕРО можна комбінувати, в зв'язку з чим їх кількість зростає. Крім того, враховуючи викладене, можна запропонувати принципово нові способи ЕРО, наприклад, спосіб, що реалізує в рідині електричний дуговий розряд, який рухається поміж ЕІ та ЕЗ в результаті взаємодії з деяким магнітним полем. Проте про практичну значимість цих способів можна робити висновки тільки після проведених відповідних пошукових досліджень. Тому включати їх в класифікатор способів ЕРО поки недоречно. Тим більше, що, на нашу думку, нестачі в кількості способів ЕРО нема, їх і зараз достатньо для того, щоб в кожному конкретному випадку економічно ефективно можна було вирішити питання оптимального поєднання кількісних і якісних сторін процесу, зокрема за рахунок комбінації способів ЕРО та відповідного узгодження енергетичних характеристик розряду з теплофізичними характеристиками електродів.

1.4. Висновки

1.4.1. Спосіб РОД треба розглядати як спосіб ЕРО і який відрізняється тим, що обробку здійснюють стаціонарною електричною дугою в потоці середовища-діелектрика.

1.4.2. Усі різновиди ЕРО засновані на використанні

електричних розрядів єдиної фізичної природи – того, що прийнято називати електричним дуговим розрядом. Саме це є тим загальним, що об'єднує їх і робить схожими, а несхожість електричних розрядів в умовах різноманітності способів ЕРО – це лише різні форми прояву однієї й тієї ж фізичної суті – електричного дугового розряду.

1.4.3. Спосіб РОД має природний зв'язок з відомими способами ЕРО, а його поява підготовлена усім попереднім розвитком ЕРО, він – об'єктивно наступний етап розвитку останньої.

1.4.4. Усі відомі способи ЕРО засновані на використанні електричних дугових розрядів в поперечному потоці середовища-діелектрика, що є основною і обов'язковою умовою здійснення ЕРО. Тому за основну класифікаційну ознаку способів ЕРО прийнято спосіб реалізації зазначеної основної фізичної умови здійснення ЕРО. В цьому зв'язку можна виділити три основних способи ЕРО: обробка безпосередньо в поперечному потоці рідини стаціонарним дуговим розрядом (процес РОД і ПО), обробка в рідині електричними розрядами із використанням електродів, що обертаються (електромеханічна обробка) та обробка в нерухомій рідині нестационарними (імпульсними) дуговими розрядами (електроіскрова, електроімпульсна обробка). Наведені способи ЕРО можна комбінувати, в зв'язку з чим їх кількість зростає.

1.4.5. Спосіб РОД об'єктивно є наступним етапом розвитку ЕРО, може розглядатись як один із основних способів ЕРО, забезпечує широкі технологічні можливості, ряд переваг, високу економічну ефективність і тому є об'єктом наукових досліджень з перспективами широкого впровадження у виробництво.

1.4.6. Процеси металообробки, що засновані на використанні електричних дугових розрядів різних форм і включають в себе традиційні способи ЕРО, РОД і ПО утворюють у своїй сукупності ЕРО, що забезпечує широкі технологічні можливості. Викладені переваги цих технологій, простота здійснення, досягнутий рівень розробок роблять процеси ЕРО високоефективною альтернативою традиційним процесам обробки різанням і тиском. Об'єктивно ЕРО – це наступний етап розвитку металообробки, коли, скажімо так, на зміну «ери сили» приходить «ера тепла». При цьому саме процес РОД є якісно новим етапом у розвитку металообробки в цілому, оскільки викладені переваги процесів ЕРО виявилось можливим реалізувати повною мірою лише після появи РОД.

2. ЕЛЕКТРИЧНА ДУГА ЯК ДЖЕРЕЛО ЕНЕРГІЇ ДЛЯ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Технології, що засновані на використанні відомих електричних дуг, досягли «технологічної стелі», досягли критичної «точки насичення» і, певною мірою, себе вичерпали. Тому поява нових технологій з використанням електричної дуги може бути пов'язано лише з появою якісно нових дуг, які відрізняються новим, більш високим рівнем регульованих енергетичних, а, отже, і технологічних характеристик.

У зв'язку з цим науковий і практичний інтерес представляє запропонована нами і вже така, що отримала практичне застосування, електрична дуга в поперечному силовому полі в умовах динамічного впливу, наприклад, в поперечному потоці середовища-діелектрика, і яка відрізняється тим, що її отримують при динамічному тиску потоку більше 5...10кПа, тобто при тисках, які раніше не були реалізовані ні наукою, ні практикою. Така дуга дозволяє отримати якісно новий рівень енергетичних характеристик, які легко регулюються в самих широких межах і значно перевищують відомі, що дозволяє розглядати її як якісно нове джерело енергії для цілей науки і нових технологій.

При цьому беремо до уваги:

1. Встановлена невідома раніше закономірність взаємодії електричного поля, матеріальною формою прояву якого є електрична дуга, що характеризується силою струму I , і силового поля, матеріальною формою прояву якого є, наприклад, потік середовища-діелектрика, що характеризується динамічним тиском P_d , яка полягає в тому, що така взаємодія супроводжується явищем саморегулювання енергетичних характеристик плазми в стовпі дуги, власне, температури T , концентрації елементарних частинок n , тиску p , а також магнітної індукції власного магнітного поля дуги B , які описуються в функції векторного добутку сили струму дуги I на динамічний тиск поперечного до стовпа дуги силового поля, наприклад, потоку середовища-діелектрика P_d , тобто $\vec{I} \times \vec{P}_d$, і одночасно зростають при збільшенні останнього.

2. Викладена закономірність означає, що при протіканні електричного розряду в поперечному потоці середовища-діелектрика енергетичні характеристики плазми в стовпі дуги (температура, концентрація елементарних частинок, тиск) регулюються в самих

широких межах в функції динамічного тиску потоку, а власне магнітне поле дуги стискає і утримує в стовпі дуги отриману плазму заданих, регульованих енергетичних характеристик, починаючи від значень, характерних для звичайних зварювальних дуг і кінчаючи плазмою, енергетичні характеристики якої обмежуються лише можливостями застосовуваної техніки (робочою напругою джерела живлення дуги і динамічним тиском потоку середовища-діелектрика). Таким чином електрична дуга в умовах такого процесу є, що важливо, не тільки високоефективним джерелом теплової енергії (це стовп дуги, що характеризується тиском плазми p , концентрацією частинок n і температурою T), але і високоефективним джерелом магнітної енергії (власне магнітне поле дуги, що характеризується магнітною індукцією B), які регулюються в самому широкому діапазоні режимів, а їх значення обмежуються лише можливостями застосовуваної техніки. Тобто, як говорять у цьому випадку, "знайдена ручка", що дозволяє легко і плавно керувати цим ефектом. Це дозволяє використовувати таку дугу, назвемо її високотемпературною дугою, в різноманітних областях науки і нових технологій.

Опишемо теоретичні основи і результати експериментальних досліджень такої високотемпературної електричної дуги в поперечному силовому полі, енергетичні характеристики якої значно перевищують енергетичні характеристики відомих дуг і яка, таким чином, дозволяє реалізувати нові високоефективні технології.

Нагадаємо, і цього будемо слідувати, теорія - це система знань, що має практичну цінність. Немає нічого практичніше доброї теорії. Основним критерієм наукового рівня теорії є її практична цінність. Що розумієш, тим і володієш. Беремо до уваги також, що будь-яке точне знання можна отримати лише емпірично. Не слід множити причини при поясненні явища. Найпростіше пояснення - найкраще. Ознака істини - простота і ясність. Все це означає, що теорія електричної дуги повинна не тільки пояснювати це складне фізичне явище з точки зору простої суті, а й описувати дугу як технологічний засіб для відомих і для нових застосувань і, скажімо так, володіти здатністю передбачення. Сучасний стан теорії дуги далеко не повністю відповідає цим вимогам.

У зв'язку з цим відзначимо, що найбільш складною для розуміння і створення теорії дуги виявилася проста суть цього явища,

яка так і залишилася непоміченою. Полягає вона в тому, що електрична дуга є саморегульованою системою, а процеси саморегулювання забезпечує власне магнітне поле дуги. Тому перш за все необхідно описати закони такого саморегулювання в їх сукупності, взаємозв'язку і взаємозалежності. Це дозволяє системно описати закономірності взаємодії дуги із зовнішнім середовищем, зокрема, з поперечним силовим полем і, як наслідок, не тільки пояснити процеси що протікають в дузі, і які раніше не отримували пояснення (наприклад, "зворотний рух дуги в поперечному магнітному полі у вакуумі"), але й управляти її енергетичними, а, отже, і технологічними характеристиками, в тому числі і раніше не відомими, в найширшому діапазоні режимів, що дозволяє розглядати таку електричну дугу як якісно новий технологічний засіб для невідомих раніше високоефективних застосувань, зокрема, таких:

1. Електрична дуга в поперечному силовому полі за своїми енергетичними характеристикам є унікальним джерелом енергії, який, єдиний з відомих, забезпечує одночасне підвищення температури і тиску плазми (концентрації елементарних частинок, їх густині, інакше щільності) до найвищих значень, а також їх одночасне утримання. Енергетичні характеристики плазми в стовпі такої дуги, власне, температура T , число елементарних частинок n , тиск плазми p регулюються в найширшому діапазоні режимів і обмежуються лише можливостями застосовуваної техніки (робочою напругою джерела живлення електричним струмом U_p і динамічним тиском силового поля P_d), а власне магнітне поле дуги утримує плазму отриманих енергетичних характеристик. До того ж, що надзвичайно важливо, електрична дуга є джерелом енергії, потужність якого регулюється в найширшому діапазоні (від сотень ватів до багатьох тисяч кіловат), що, в кінцевому рахунку, дозволяє реалізувати джерело енергії унікальних технологічних можливостей.

Так, наприклад, в стовпі такої дуги створюються умови для синтезу хімічних елементів зовнішнього середовища і електродів відповідно до таблиці Менделєєва зліва направо. У зв'язку з цим, наприклад, досить підстав стверджувати, що в стовпі такої дуги є можливим отримати і утримувати високотемпературну плазму для

керованого термоядерного синтезу (КТС) і таким чином технологічно здійснити процес КТС, використовуючи механізми природних зв'язків і рухів елементарних частинок. Нагадаємо, що, згідно з існуючих уявлень, «... головна об'єктивна перешкода, яка стояло і до сих пір стоїть на шляху реалізації УТС, полягає в тому, що неможливо забезпечити одночасно і високу температуру плазми, і високу концентрацію частинок ізотопів водню в цій плазмі (щільність плазми) з тим, щоб відбувся синтез." [Ялишев Ф.Х., 10.10.2010, www.termoyadu.net].

2. Електрична дуга в поперечному силовому полі є високоефективним перетворювачем енергії електричного поля в енергію власного магнітного поля дуги. При цьому в зоні дії такого магнітного поля є можливим здійснити, наприклад, розщеплення хімічних елементів зовнішнього середовища і електродів згідно таблиці Менделєєва справа наліво і таким чином отримати вуглеводи з води і повітря.

При цьому як в першому випадку (синтез хімічних елементів), так і у другому випадку (розщеплення хімічних елементів) за рахунок зміни умов і режимів горіння дуги є можливість управляти цими процесами, забезпечуючи необхідні або прийнятні форми таких перетворень.

3. При протіканні електричної дуги в поперечному силовому полі енергетичні характеристики катодного і анодного джерел тепла на електродах регулюються в найширшому діапазоні режимів, починаючи від значень, характерних для звичайних дуг, типу зварювальних, достатніх для плавлення металу, і закінчуючи значеннями, достатніми для тонкого розмірного випаровування будь-яких струмопровідних матеріалів. Це дозволяє реалізувати найрізноманітніші нові високоефективні технології, зокрема, розмірну обробку металів, різні способи поверхневого зміцнення металів, більш ефективно у порівнянні з відомим підводне різання металів, плазмове різання металів при відсутності зони термічного впливу, отримання металевих порошків, отримання металевих суспензій, проведення хімічних реакцій та ін.

2.1. Загальні відомості

Електрична дуга - це фізичне явище, яке супроводжує протіканням електричного струму більше 1А поміж двома електродами через середовище-діелектрик при напрузі не менше 10...20В. Електрична дуга - це породження того, що називають електричним полем, енергія якого руйнує діелектричну міцність середовища-діелектрика, створюючи з матеріалу електродів і зовнішнього середовища електропровідний стовп плазми, який електрично "з'єднує" обидва електроди, утворюючи замкнутий контур. Але електрична дуга - це не тільки електропровідний стовп плазми, це ще й незначні по довжині (висоті) перехідні зони електричного контакту стовпа з електродами, які називаються катодною і анодною областями дуги і де більші значення температури плазми стовпа дуги знижуються до значно менших значень на поверхні електродів.

Таким чином електрична дуга, функціонально, це провідник електричного струму, а в електричному ланцюзі - це електричний опір. На відміну від металевих провідників кожна дуга відрізняється своїм електричним опором, яке залежить від складу і стану зовнішнього середовища, матеріалу електродів, електричних і геометричних параметрів розряду і таким чином електричний опір кожної окремої дуги є функцією багатьох змінних. Електрична дуга характеризується різко вираженою нелінійністю, тобто між силою струму і напругою немає пропорційної зв'язку. Електричний опір, а отже і напруга дуги U_d , що є функцією і одночасно мірою електричного опору дуги, розподіляються по довжині дуги L_d нерівномірно (рис. 2.1).

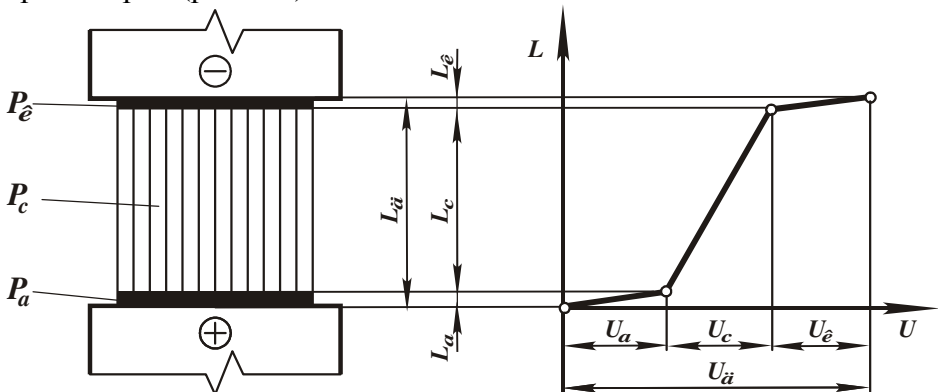


Рис. 2.1. Принципова схема електричної дуги як джерела тепла

В катодній L_d і анодній L_a областях, незважаючи на їх малу протяжність (в межах одного мікрметра), напруги U_k і U_a є значними, що свідчить про високу напруженість електричного поля в них. У стовпі напруженість електричного поля значно менше. У зв'язку з цим електричну дугу розглядають як суму трьох самостійно діючих джерел тепла в катодній області потужністю P_k , анодній області потужністю P_a і стовпі дуги потужністю P_c . Схема трьох джерел тепла в дузі дає можливість представити дугу таким чином: одне джерело тепла потужністю P_k розташований в плоскому шарі на поверхні катода, друге потужністю P_a розташовано в плоскому шарі на поверхні анода і третє потужністю P_c розташовано в об'ємі стовпа дуги. Це дозволяє розглядати і досліджувати дугу як єдність трьох дуже різних за енергетичними характеристиками джерел тепла, кожне з яких в межах своєї області характеризується досить однорідними характеристиками. При цьому приелектродні області (катодна і анодна) представляють собою потужні концентровані, певною мірою, плоскі джерела тепла, в той час як стовп дуги є значно менш концентрування об'ємним джерелом тепла.

2.2. Електрична дуга як саморегулююча система

Електрична дуга є саморегульованою системою. Дійсно, електрична дуга може протікати в найрізноманітніших умовах і характеризуватися найрізноманітнішими електричними, геометричними та енергетичними характеристиками. Так, наприклад, відомо, що дуга горить між будь-якими провідниками; вона стійко горить в вакуумі і при тисках, що досягають багатьох тисяч атмосфер; вона може протікати в потужних поздовжніх і поперечних потоках газу і рідини, в поздовжньому і поперечному магнітних полях; стійко горить між електродами, що обертаються; довжина дуги може коливатися від сотих часток міліметра до десятків метрів; струм дуги може регулюватися від одного ампера до багатьох тисяч ампер; температура плазми стовпа дуги, за наявними даними, змінюється в діапазоні від 5000K до 50000K і т.і. При цьому будь-яка, навіть дуже незначна зміна умов протікання розряду викликає, в результаті протікаючих в дузі процесів саморегулювання, відповідну зміну енергетичної структури дуги і її динамічних характеристик (переміщення дуги в просторі).

Питається, проте, де та сила, яка забезпечує зазначені процеси

саморегулювання? Як було показано [135], такою силою є власне магнітне поле дуги, яке є функцією зовнішніх впливів і, в свою чергу, впливаючи на дугу, що являє собою стовп плазми (провідник) з протікаючим по ньому струмом, змінює його енергетичну структуру і динамічні характеристики адекватно зовнішнім впливам, при необхідності, в бажаному напрямку. Зауважимо, це означає, що одне явище (енергетична структура і динаміка дуги відповідних характеристик) обов'язково супроводжується іншим явищем (наявністю власного магнітного поля дуги відповідних характеристик). Інакше, скажімо так, кожне з цих явищ є наслідком і продовженням іншого, а в цілому - це дві сторони одного і того ж явища, що називають електромагнітизмом дугового розряду. У зв'язку з цим електричні і магнітні поля дуги повинні розглядатися в єдності, взаємозв'язку і взаємозалежності як одне повне електромагнітне поле, яке взаємодіє з зовнішнім середовищем, забезпечуючи процеси саморегулювання в дузі.

Все це вказує на вельми тонкі, досконалі і різноманітні процеси саморегулювання, що протікають в дузі, і, отже, на те що дуга являє собою "ідеальну" саморегульовану систему, що знаходиться з зовнішнім середовищем в рухомій, хиткій рівновазі. Щоб переконатися в цьому достатньо проаналізувати осцилограму сили струму і напруги будь-якої дуги. Число механізмів саморегулювання дуги практично необмежена. Тому електрична дуга невичерпна в формах свого прояву, невичерпні також її технологічні можливості. Тому можна говорити про необмежені можливості управління властивостями дуги як джерела енергії для різних цілей науки і практики за рахунок зміни умов протікання розряду.

У зв'язку з цим важливо описати основні закономірності (закони, принципи) такого саморегулювання. Стан теорії і практики електричної дуги дозволяють сформулювати основний закон саморегулювання, згідно принципу найменшої дії (природа економна), як закон найменшого опору, відповідно до якого, по-перше, електрична дуга протікає таким чином, що електричний опір середовища протіканню розряду, а, отже, і напруга дуги, мінімальні, що відповідає принципу мінімуму Штеенбека і, що наприклад, пояснює факт переміщення дуги в просторі і в зв'язку з чим дискретність дуги в просторі є її безумовною властивістю. По-друге, зі зміною умов протікання розряду в результаті процесів

саморегулювання власне магнітне поле дуги і її енергетична структура змінюються таким чином, щоб зменшити ефект такого впливу, згідно принципу зміщення рівноваги Ле-Шательє, і, знову-таки, забезпечити в нових умовах мінімально можливий електричний опір середовища протіканню розряду. По-третє, кількість елементарних частинок в стовпі дуги (носіїв струму) повністю визначається силою струму за принципом необхідної достатності (не більше, не менше). Останнє означає, що кількість елементарних частинок в стовпі дуги n знаходиться в точній відповідності і пропорційна силі струму I , а їх концентрація n в одиниці об'єму може бути представлена в функції густини сили струму j відповідно до залежності:

$$n = C_1 j, \quad (2.1)$$

де C_1 - коефіцієнт розмірності.

Це підтверджено також експериментами. Так, наприклад, для дуги в повітрі $n=10^{15} \dots 10^{16} \text{см}^{-3}$ [136, с.245] при $j=2 \dots 3 \text{кА/см}^2$ [125, с.30], для дуги Гердієна $n=10^{18} \text{см}^{-3}$ [136, с.245] при $j=30 \text{кА/см}^2$ [136, с.103]. Тоді, наприклад, при заданому $n = 10^{16} \text{см}^{-3}$ і при $j=3 \text{кА/см}^2$ для дуги в повітрі при подальшому підвищенні густини сила струму до 30кА/см^2 при $n=10^{18} \text{см}^{-3}$ для дуги Гердієна коефіцієнт розмірності C_1 при простій інтерполяції отриманих результатів складе: $C_1=3,3(10^{15} \dots 10^{16}) \text{см}^{-3}/(\text{кА/см}^2)$.

Електрична сила F , що діє на заряджену елементарну частинку в стовпі дуги і визначає, в кінцевому рахунку, її енергію W , а значить її температуру і температуру плазми стовпа дуги T в цілому [137, с.18 ...20] дорівнює:

$$F = qE, \quad (2.2)$$

де q – елементарний електричний заряд, кулони; E - напруженість електричного поля, В/см.

Згідно (2.2) температура плазми стовпа дуги прямо пропорційна напруженості електричного поля E . Тому температура плазми в стовпі дуги може бути представлена виразом:

$$T = C_2 E, \quad (2.3)$$

де C_2 – коефіцієнт розмірності.

Отримане співвідношення підтверджено також експериментами. Так, наприклад, для дуги в повітрі $T=5000 \dots 6000 \text{К}$ [125, с.37, 38] при $E=25 \dots 30 \text{В/см}$ [125, с.19], для дуги Гердієна $T=50000 \text{К}$, при $E=300 \text{В/см}$ [136, с.102]. При цьому при простій

інтерполяції отриманих результатів коефіцієнт розмірності C_2 складе: $C_2=166...200\text{K}/(\text{В}/\text{см})$.

Тиск плазми в стовпі дуги p прямопропорційний концентрації частинок n і їх температурі T і визначається за відомою формулою:

$$p = nkT, \quad (2.4)$$

де k – постійна Больцмана.

Після підстановки (2.1) і (2.3) отримуємо:

$$p = C_3 jE, \quad (2.5)$$

де C_3 – коефіцієнт розмірності і, наприклад, для дуги в повітрі при $E=30\text{В}/\text{см}$, $j=3\text{кА}/\text{см}^2$ і при тиску плазми в стовпі дуги $0,1\text{МПа}$ [138, с.18] коефіцієнт $C_3=1/900\text{МПа}/(\text{кВА}/\text{см}^3)=30^{-2}\text{МПа}/(\text{кВА}/\text{см}^3)$. При простій екстраполяції отриманих результатів для дуги Гердієна при $E=300\text{В}/\text{см}$ і $j=30\text{кА}/\text{см}^2$ тиск плазми в стовпі дуги складе 10МПа .

Отримані співвідношення (2.1), (2.3), (2.5) є важливими. Вони дозволяють просто і надійно оцінити енергетичний стан плазми в стовпі дуги з точки зору простої суті такого складного фізичного явища, яким є дуга.

Оцінимо, в порівнянні, узагальнені і усереднені енергетичні характеристики плазми в стовпі відомих дуг і вкажемо на деякі особливості плазми в стовпі таких дуг, як можливого джерела високотемпературної плазми. Найбільш високоефективною в цьому відношенні є дуга Гердвена. Вона, як уже згадувалося, характеризується такими енергетичними характеристиками: $j=30\text{кА}/\text{см}^2$, $n=10^{18}\text{см}^{-3}$, $E=300\text{В}/\text{см}$, $T=50000\text{К}$, об'ємна густина теплової потужності становить $K=9000\text{кВА}/\text{см}^3$. Дуга в повітрі відрізняється такими енергетичними характеристиками: $j=2..3\text{кА}/\text{см}^2$, $n=10^{15}...10^{16}\text{см}^{-3}$, $E=25...30\text{В}/\text{см}$, $T=5000...6000\text{К}$, $K=90\text{кВА}/\text{см}^3$. Зауважимо, при зростанні в дузі Гердієна в порівнянні з дугами в повітрі концентрації частинок n на два - три порядки, одночасно на порядок зростає температура плазми T , на два порядки зростає об'ємна густина теплової потужності K , а, отже, на два порядки зростає і тиск плазми в стовпі дуги, досягаючи 10МПа (формули 2.4, 2.5). Це експериментальні, надійно перевірені дані. Тому можна стверджувати, що в стовпі електричної дуги можна отримувати і утримувати плазму високих енергетичних характеристик при одночасному збільшенні j , E , n , T , K , p , що важливо, якщо розглядати електричну дугу як можливе джерело високотемпературної плазми.

Зазначимо, це не повною мірою відповідає існуючим

увявленням для звичайної плазми. Так, наприклад, вважають, що температура плазми T повинна зростати зі збільшенням напруженості електричного поля E , але зменшуватися з ростом тиску p , тобто $T=f(E/p)$ [137, с.101]. Можна також нагадати, що сила струму в електричній дузі не підкоряється закону Ома (немає прямої залежності сили струму від напруги). Такі особливості, такі закони "життя" електричної дуги. Приймаємо до уваги, бо це важливо.

Вимагає, проте, пояснення факт утримання плазми, наприклад, в стовпі дуги Гердієна при тисках до 10МПа. Запитаємо, де та сила, яка врівноважує такий тиск плазми? Як уже згадувалося, а також відповідно до [135], це власне магнітне поле дуги, магнітна індукція якого, як і енергетичні характеристики дуги n , T , K , p , зростає зі збільшенням останніх, є функцією зовнішніх впливів на дугу і, в свою чергу, впливаючи на дугу, що представляє собою стовп плазми (провідник) з протікаючим по ньому струмом, змінює його енергетичну структуру і динаміку адекватно зовнішнім впливам, утримуючи, таким чином, в стовпі дуги плазму отриманих енергетичних характеристик.

Це стає зрозумілим, якщо взяти до уваги, що стовп дуги (а це стовп плазми) являє собою сукупність елементарних заряджених частинок високих енергій (в даному випадку, для дуги Гердієна, значно більш високих енергій, ніж в звичайних дугах), які знаходяться в стані електромагнітної взаємодії, створюючи таким чином сукупне магнітне поле дуги (в даному випадку, тому, значно більш високих характеристик, ніж в звичайних дугах), магнітна індукція якого, в результаті процесів саморегулювання в дузі, збільшується (зменшується) при одночасному збільшенні (зменшенні) енергії і концентрації елементарних частинок, що слід розглядати в єдності, взаємозв'язку і взаємозалежності. Зауважимо, це є особливістю цього електричного розряду і, певною мірою, визначає передбачуваність енергетичних характеристик електричної дуги. У зв'язку з цим відзначимо, це вже четвертий принцип саморегулювання дуги, назвемо його принципом взаємозв'язку енергетичних характеристик електричної дуги, згідно з яким при збільшенні (зменшенні) енергії елементарних частинок одночасно збільшується (зменшується) їх концентрація і, як наслідок, збільшується (зменшується) магнітна індукція власного магнітного поля дуги, яке утримує плазму отриманих енергетичних характеристик. При цьому зі

збільшенням магнітної індукції власного магнітного поля дуги вихід енергії зі стовпа дуги все більше відбувається у вигляді магнітної енергії останнього (поля).

Таким чином, електрична дуга є унікальним, єдиним з відомих, джерелом енергії, коли одночасно зростають температура і тиск плазми, а власне магнітне поле дуги утримує плазму отриманих високих енергетичних характеристик. Це, наприклад, дає підстави стверджувати, що високотемпературну електричну дугу слід, зокрема, розглядати як можливе джерело енергії для КТС, бо, нагадаємо, головна об'єктивна перешкода, яка стояла і до сих пір стоїть на шляху реалізації КТС, полягає в тому, що неможливо забезпечити одночасно і високу температури плазми, і високу концентрацію частинок ізотопів водню в цій плазмі (густини плазми), з тим, щоб відбувся синтез.

З огляду на викладене, зазначимо, що для того, щоб розглядати електричну дугу як джерело високотемпературної плазми, наприклад для КТС, необхідно, по суті, вирішити тільки одну задачу - запропонувати технологічний прийом, що забезпечує підвищення температури плазми в стовпі дуги до $T=10^7...10^8\text{K}$ (бо необхідне $n \geq 10^{16}\text{см}^{-3}$ і, відповідно p , забезпечені умовами горіння дуги). Проаналізуємо такі можливості. Звертаємося до формули (3). Проста екстраполяція отриманих результатів показує, що для підвищення температури плазми до вказаних значень при $C_2=200\text{K}/(\text{В}/\text{см})$ напруженість електричного поля в стовпі дуги повинна скласти $E=5 \cdot 10^4...5 \cdot 10^5\text{В}/\text{см}$. Перевіримо можливість досягнення такої напруженості електричного поля на стовпі дуги. Беремо до уваги, що E повністю визначається прямопропорційною функціональною залежністю від напруги на стовпі дуги U_c , яке в свою чергу є функцією (і мірилом) електричного опору середовища протіканню розряду. При цьому, чим більше останнє, тим більше U_c і, отже, тим більше E , а значить тим вище T . Таким чином температура плазми в стовпі дуги, як і інші енергетичні характеристики, є функцією електричного опору середовища протіканню розряду, зростає зі збільшенням останнього і, в кінцевому рахунку, є результатом взаємодії дуги із зовнішнім середовищем. Зауважимо, бо це важливо, – саме електричний опір середовища протіканню розряду визначає, в кінцевому рахунку, енергетичні характеристики плазми в стовпі дуги.

Простий аналіз показує, що найбільший з можливих

електричний опір середовища протіканню розряду може бути досягнуто при протіканні дуги в поперечному силовому полі в умовах динамічного впливу, наприклад, в поперечному потоці середовища-діелектрика, коли, наприклад, при швидкості потоку води до 1000м/с (що реально можна здійснити) динамічний тиск потоку на стовп дуги складе ~ 500 МПа. В цьому випадку при відповідному досить значному підвищенні напруги U_c , наприклад до 50000В при довжині дуги 5...10мм, дуга буде горіти (а не горіти вона не може) при відповідному збільшенні E до необхідних зазначених вище значень. Зауважимо, цим, по суті, ми описали технологічний прийом, що дозволяє отримати і утримувати в стовпі дуги високотемпературну плазму, наприклад, для керованого термоядерного синтезу.

На умовній схемі, представлений на рис. 2.2, наведені з точки зору простої суті, викладені теоретичні передумови отримання і утримання в стовпі дуги високотемпературної плазми, наприклад, для керованого термоядерного синтезу.

Висновок

Електрична дуга є саморегульованою системою. При протіканні електричної дуги в поперечному силовому полі в умовах динамічного впливу (динамічного тиску P_d), наприклад, в поперечному потоці середовища-діелектрика, енергетичні характеристики плазми в стовпі дуги, власне, температура T , концентрація елементарних частинок n , тиск p , а також магнітна індукція власного магнітного поля дуги B , регулюються в найширшому діапазоні режимів в функції P_d , одночасно збільшуючись (зменшуючись), і обмежуються лише можливостями застосовуваної техніки (робочою напругою джерела живлення дуги і динамічним тиском P_d потоку середовища-діелектрика). При цьому є можливим в найширшому діапазоні режимів змінювати потужність електричної дуги (від сотень ватів до багатьох тисяч кіловат). Все це робить електричну дугу в поперечному силовому полі унікальним джерелом енергії для різноманітних технологічних застосувань.

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ОТРИМАННЯ І УТРИМАННЯ В СТОВП ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПЛАЗМИ

1. Електрична дуга - це породження того, що називають електричним полем; являє собою джерело тепла у вигляді стовпа плазми, катодної та анодної областей дуги; є саморегульованою системою згідно принципу найменшої дії (принципи: Штеенбек, Ле-Шательє, необхідної достатності).

2. Стовп плазми є провідником електричного струму, знаходиться в дії електричного поля і являє собою сукупність елементарних частинок (носіїв електричного струму - електронів і іонів) в кількості, яка визначається силою струму за принципом необхідної достатності, а їх концентрація n може бути представлена в функції густини сили струму j відповідно до залежності:

$$n=C_1 j, \quad (1)$$

де C_1 - коефіцієнт розмірності.

3. Електрична сила, яка діє на елементарну частинку і визначає її енергію і, відповідно, її температуру і температуру плазми стовпа дуги в цілому описується виразом

$$F=q E, \quad (2)$$

де q - елементарний електричний заряд, кулони; E - напруженість електричного поля, В/см.

4. Відповідно до (2) температура плазми стовпа дуги T прямопропорційна E . Це доведено також експериментами. Наприклад, для зварювальної дуги $T \approx 5000\text{K}$ при $E \approx 30\text{В/см}$, для дуги Гердієна $T \approx 50000\text{K}$ при $E \approx 300\text{В/см}$. Тому

$$T = C_2 E, \quad (3)$$

де C_2 - коефіцієнт розмірності, $C_2 = 166 \dots 200\text{ K/(В/см)}$.

5. E визначається прямопропорційною функціональною залежністю від напруги на стовпі дуги U_0 :

$$E=f(U_0) \quad (4)$$

6. Напруга дуги є функцією (і мірою) електричного опору середовища-діелектрика протіканню розряду R :

$$U_0=f(R) \quad (5)$$

$$\text{Відповідно} \quad E=f(R) \quad (6)$$

$$T = f(R) \quad (7)$$

Отже, можливості регулювання T плазми стовпа дуги визначаються, по-перше, можливостями створення відповідного R і, по-друге, необхідністю реалізації відповідного U_0 для подолання такого R .

7. При горінні дуги в поперечному потоці середовища-діелектрика, наприклад, води забезпечується регулювання R в найширшому діапазоні в функції динамічного тиску потоку P_0 , тобто

$$R=f(P_0) \quad (8)$$

$$\text{Відповідно} \quad T=f(P_0), \quad (9)$$

що забезпечує регулювання T в найширшому діапазоні.

8. Наприклад, необхідно отримати високотемпературну плазму $T=10^7\text{K}$. Згідно формули (3) $E \approx 50000\text{В/см}$. Тоді при силі струму 200А , висоті стовпа дуги 1см використовуємо джерело живлення з вертикальною зовнішньою характеристикою при напрузі робочого ходу $\sim 50000\text{В}$ потужністю $\sim 10000\text{кВА}$ і насосну установку для створення потоку, наприклад, води динамічним тиском до 500МПа (швидкість потоку до 1000м/с). При цьому концентрація елементарних частинок в стовпі дуги складе $n \geq 10^{19}$, тиск плазми $P \approx 2000\text{МПа}$. Зазначені параметри плазми забезпечують, наприклад, реакцію термоядерного синтезу.

2.3. Електрична дуга в силовому полі

Енергетичні характеристики електричної дуги є функцією електричного опору зовнішнього середовища протіканню розряду, зростають зі збільшенням останнього і, в кінцевому рахунку, є результатом взаємодії дуги із зовнішнім середовищем.

За сукупністю теоретичних і експериментальних даних основним фактором взаємодії дуги із зовнішнім середовищем, що дозволяє в найширшому діапазоні режимів регулювати опір середовища протіканню розряду, є тиск зовнішнього середовища.

Згідно уявлень сучасної фізики, будь-яка взаємодія здійснюється через деякі поля. Електрична дуга – це породження того, що називають електричним полем, це матеріальна форма його прояву, це, на відміну від металевих провідників електричного струму, скажімо так, "оголена" форма існування електричного поля, яке, таким чином, має самий безпосередній контакт із зовнішнім середовищем, взаємодіючи з нею, і чим, власне, пояснюються тонкі механізми саморегулювання дуги в функції складу і стану зовнішнього середовища.

Тиск зовнішнього середовища слід розглядати як матеріальне прояв того, що називають силовим полем. Таким чином, взаємодію дуги із зовнішнім середовищем по тиску слід розглядати як взаємодію електричного поля, що характеризується силою струму дуги, і силового поля, що характеризується тиском зовнішнього середовища, яке, як відомо, може бути статичним і динамічним. Основним результатом такої взаємодії є те, що взаємодіючі системи зазнають змін.

Опишемо в зв'язку з цим фізичний механізм такої взаємодії при протіканні дуги в умовах всебічного статичного тиску зовнішнього середовища (в умовах статичного силового поля) і в умовах поперечного до стовпа дуги одностороннього динамічного тиску зовнішнього середовища (в умовах поперечного силового поля) і розглянемо можливість отримання в стовпі таких дуг плазми високих енергетичних характеристик. При цьому беремо до уваги, що електрична дуга з зовнішнім середовищем по тиску знаходиться в стані рівноваги і, відповідно до принципу зміщення рівноваги Ле-

Шательє, цей рівноважний стан забезпечується її власним магнітним полем. Як наслідок, при зміні тиску зовнішнього середовища в результаті процесів саморегулювання дуги змінюється власне магнітне поле дуги і, як наслідок, змінюються її геометричні та енергетичні характеристики, змінюється фізичний механізм передачі енергії від дуги в навколишній простір, власне, з стовпа дуги і приелектродних областей. При цьому в останньому випадку ця енергія досить передбачувана, оскільки сумарне падіння напруги в катодної і анодної областях відомо і знаходиться для всіх описаних дуг в межах 10...20В. Зі стовпа дуги енергія йде в навколишній простір за рахунок випромінювання, теплопровідності, конвекції і власного магнітного поля дуги.

2.3.1. Електрична дуга в статичному силовому полі

Електричні дуги в статичному силовому полі в умовах всебічного статичного тиску зовнішнього середовища поділяються, умовно, на дуги низького тиску - це вакуумні дуги, що горять при тиску нижче ~ 1 мм.рт.ст., і дуги високого тиску, що горять при тиску вище декількох десятків міліметрів ртутного стовпа (наприклад, звичайна електрична дуга. [139, с.22, 164...165] при атмосферному тиску). Цей поділ є досить умовний і багато в чому залежить від сили струму і матеріалу електродів. Дуга низького тиску, як правило, характеризується наявністю дифузного стовпа плазми, в якому відсутня теплова рівновага. Електрони (носії струму) в цій області мають порівняно високу температуру (10000...50000К), а температура газу важкого компонента плазми лише трохи вище температури навколишнього середовища. У той же час для дуги високого тиску характерно наявність обмеженого стовпа з високою температурою газу (зазвичай 4000...20000К), в якому існує теплова рівновага між електронами, позитивними іонами і нейтральними атомами і молекулами [139, с.22...23].

Зауважимо, енергетична структура дуг низького і високого тиску різко відрізняється і, отже, відповідно до принципу зміщення рівноваги, повинні значно відрізнятися характеристики власного магнітного поля цих дуг. Розглянемо в зв'язку з цим деякі особливості

і відмінності цих дуг.

При протіканні вакуумної дуги в поперечному магнітному полі спостерігається так званий "зворотній" рух дуги (катодної плями), тобто в напрямку протилежному тому, куди його повинна "нормально" переміщати сила взаємодії між магнітним полем і струмом [140, с.70...72; 139, с.164...165]. При підвищенні тиску рух дуги спочатку сповільнюється, а потім при подальшому збільшенні тиску до ~ 11 мм.рт.ст. припиняється і дуга зупиняється. При подальшому збільшенні тиску дуга рухається в "прямому" напрямі. Описаний фізичний ефект становить одну з "загадок" фізики і "до сих пір. залишається незрозумілим ні кількісно, ні якісно" [139, с.164].

У зв'язку з цим можна пояснити цю "загадку", виходячи з описаних нами принципів саморегулювання дуги, згідно з якими власне магнітне поле дуги є функцією зовнішніх впливів і, в свою чергу, впливаючи на дугу, що представляє стовп плазми з протікаючим по ньому струмом, змінює його структуру і динамічні характеристики адекватно зовнішнім впливам.

Точне знання можна отримати лише емпірично. Тому звертаємося до результатів експериментальних досліджень, власне, до аналізу описаних фізичних явищ, які супроводжують цей процес, в їх сукупності, взаємозв'язку і взаємозалежності.

Дуга низького тиску, як зазначалося, характеризується наявністю дифузного стовпа плазми, в якому відсутня теплова рівновага. Електрони в цій області мають порівняно високу температуру (10000...50000К), а температура газу важкого компонента плазми лише трохи вище температури навколишнього середовища. У той же час для дуги високого тиску характерно наявність обмеженого стовпа з високою температурою газу (зазвичай 4000...20000К), в якому існує теплова рівновага між електронами, позитивними іонами і нейтральними атомами. Але як в першому випадку (вакуумна дуга), так і в другому випадку (дуга високого тиску), струмопровідний стовп плазми з зовнішнім середовищем по тиску знаходиться в рівноважному стані.

Згідно описаних нами принципів саморегулювання дуги такий рівноважний стан плазми по тиску забезпечує власне магнітне поле дуги. Але якщо для дуги високого тиску, і це загальновідомо, власне магнітне поле дуги стискає плазму, то для вакуумних дуг воно перетворює весь обсяг вакууму в струмопровідний стовп плазми, по

суті розширюючи цей дифузний стовп плазми. Для цього напрямок власного магнітного поля такої дуги змінюється на протилежний по відношенню до знаку магнітного поля дуги високого тиску. Таким чином вакуумні дуги і дуги високого тиску відрізняються один від одного зворотними знаками власного магнітного поля. Як наслідок, при протіканні в поперечному магнітному полі вакуумна дуга і дуга високого тиску переміщуються в зворотних напрямках по відношенню один до одного.

Особливо слід звернути увагу, що при тиску ~ 11 мм.рт.ст. рух дуги припиняється і вона зупиняється. Це означає, що власне магнітне поле дуги себе не проявляє, воно відсутнє і таким чином втрати енергії з стовпа дуги в навколишній простір за рахунок втрат енергії власного магнітного поля дуги не відбуваються. Приймаємо також до уваги, що при зазначеному тиску вакуумної дуги ~ 11 мм.рт.ст спостерігається мінімальне значення напруги пробою і горіння вакуумної дуги [133, с.150, рис.52]. До того ж у порівнянні з дугами високого тиску вакуумні дуги відрізняються більш низькими напругами [139, с.191...193]. Таким чином з відомих дуг при інших рівних умовах вакуумна дуга при тиску ~ 11 мм.рт.ст. має мінімальне електричний опір і, як провідник електричного струму, в енергетичному відношенні є найбільш економною з відомих. В зв'язку з цим зазначимо, що горіння електричної дуги при тиску ~ 11 мм.рт.ст., назвемо його тиском рівноважного стану, – це особливий стан дуги, це критична точка її стану, що представляє науковий інтерес, і це щось оптимальне з точки зору балансу енергії в дузі, що становить практичний інтерес. Такою є одна з особливостей електричної дуги і, як зазначалося, вона не єдина.

При протіканні вакуумної дуги при тисках відмінних від тиску рівноважного стану, що відповідає тиску зовнішнього середовища ~ 11 мм.рт.ст., енергетична структура дуги змінюється, відповідно до принципу зміщення рівноваги, таким чином, щоб зменшити ефект такого впливу і, знову таки, забезпечити в нових умовах мінімально можливий електричний опір середовища протіканню розряду. Досягається це появою власного магнітного поля дуги відповідних характеристик, яке (поле) зі збільшенням або зменшенням тиску, щодо тиску рівноважного стану змінює знак на протилежний, забезпечуючи таким чином рівноважний тиск плазми в стовпі дуги в нових умовах. Як наслідок, при накладенні зовнішнього поперечного

магнітного поля останнє (поле) взаємодіє з власним магнітним полем дуги і вона отримує "прямий" або "зворотній" рух.

Нагадаємо, електрична дуга – ідеально саморегульована система, коли все залежить від усього, тому вказане значення рівноважного стану $\sim 11\text{мм.рт.ст.}$ наведено для найбільш вивчених і описаних порівняно слабкострумових дуг [139, с.164...165]. При зміні умов горіння дуги тиск рівноважного стану може відрізнятись від зазначених значень.

При перевищенні тиску рівноважного стану і подальшому збільшенні статичного тиску зовнішнього середовища магнітна індукція власного магнітного поля дуги зростає, що забезпечує рівноважний стан стовпа дуги по тиску з зовнішнім середовищем і, як наслідок, площа поперечного перерізу стовпа дуги зменшується, густина сили струму зростає, напруженість електричного поля зростає, температура плазми стовпи дуги зростає. Однак навіть при статичному тиску зовнішнього середовища сотні МПа, і це показує експеримент [5, с.41...45], енергетичні характеристики таких дуг не досягають значень, характерних для високотемпературних дуг типу дуги Гердієна.

Висновок. При протіканні електричної дуги в статичному силовому полі отримати високотемпературну плазму в стовпі дуги не представляється можливим.

2.3.2. Електрична дуга в поперечному силовому полі як джерело енергії для нових технологій.

Електричні дуги в поперечному силовому полі – це дуги в поперечному потоці середовища-діелектрика або в поперечному магнітному полі в умовах динамічного взаємодії. При протіканні дуги в поперечному магнітному полі динамічний тиск створюється поперечним магнітним полем у вигляді відповідного динамічного тиску на стовп дуги як на провідник зі струмом, магнітна індукція якого (поля), за визначенням, це сила, а одиниця вектора магнітної індукції є тесла – $1\text{Tл}=1\text{Н}/(1\text{А}\cdot 1\text{м})$ - це характеристика силового поля, яка при зазначених умовах є аналогом динамічного тиску, одиницею виміру якого є паскаль (Па). Як наслідок, за ефектом впливу на стовп дуги і за кінцевим результатом поперечний потік середовища-діелектрика і поперечне магнітне поле є еквівалентами.

Розглянемо результати експериментальних досліджень

електричної дуги в поперечному силовому полі і на цій основі опишемо фізичний механізм взаємодії дуги з поперечним силовим полем при збільшенні динамічного тиску останнього до максимально можливих значень.

2.3.2.1. Експериментальні дослідження

Наведемо результати експериментальних досліджень електричної дуги в поперечному потоці середовища-діелектрика. Перш за все зазначимо, що в якості робочого середовища-діелектрика можуть бути використані не тільки гази, що відомо, але, по суті, всі відомі середовища-діелектрики, що дозволяють сформувати поперечний потік, наприклад, вода, нафтопродукти, емульсії, суспензії, тверді середовища. Більш того, зокрема, саме рідкі середовища (а не гази, що відомо) є більш зручними і ефективними. Для різноманітних робочих середовищ універсальним параметром взаємодії дуги з потоком є динамічний тиск потоку, Па

$$P_d = \frac{\rho v^2}{2}, \quad (2.6)$$

де ρ - густина (об'ємна маса) робочого середовища, кг/м^3 ; v - швидкість потоку, м/с .

На рис. 1.1 показана принципова схема отримання електричної дуги в поперечному потоці рідких середовищ-діелектриків. При цьому необхідні динамічні тиску потоку в зоні горіння дуги досягаються застосуванням відповідних насосних установок. Важливим є наявність джерел живлення технологічним струмом відповідних характеристик. Необхідно враховувати, що напруга дуги при заданих довжині дуги і силі струму є функцією динамічного тиску потоку і різко зростає при збільшенні останнього. Так, наприклад, при динамічному тиску потоку 1МПа напруженість електричного поля в стовпі дуги досягає 4кВ/см .

Для кількісної та якісної оцінки такої електричної дуги, як джерела енергії, необхідно встановити електричні характеристики дуги (силу струму і напругу), визначити геометричні характеристики дуги (площа поперечного перерізу і довжину), визначити густина струму на катоді і аноді, сумарне значення катодного і анодного падіння напруги, визначити напруженість електричного поля в стовпі дуги, побудувати вольтамперну характеристику дуги. Далі розглянемо, як приклад, ці характеристики для випадку реалізації

дуги в поперечному потоці водопровідної води.

Електричні характеристики дуги - сила струму I і напруга U , - можуть, бути встановлені за осцилограмами. Типова осцилограма I і U такої дуги (див. рис. 1.2) підтверджує безперервне протікання розряду і не має принципових відмінностей від типових осцилограм відомих стаціонарних дуг. Силу струму такої дуги можна регулювати, як і для відомих дуг, від декількох ампер до багатьох тисяч ампер. Напруга дуги визначається головним чином довжиною дуги і динамічним тиском потоку і може змінюватися від значень, характерних для звичайних зварювальних дуг, і досягати сотень і тисяч вольт.

Електричні дуги в поперечному потоці середовища-діелектрика при динамічному тиску потоку більше 5...10кПа характеризується усіма ознаками стабілізованих дуг. Вони мають вигляд близького до циліндра, безперервно мігруючого стовпа з чіткими оптичними межами. Площа поперечного перерізу стовпа, катодного та анодного областей дуги приблизно рівні.

На рис. 2.3 наведено типовий кадр швидкісної кінозйомки дуги, що протікає в поперечному потоці води між анодом з міді (розміщений в верхній частині, на знімку не показаний) і графітовим катодом (знизу); сила струму дуги $I=250\text{А}$, напруга $U=30\text{В}$, динамічний тиск потоку $P_d=0,3\text{МПа}$, частота кінозйомки 4000 кадр/с, експозиція 1/20000 с.

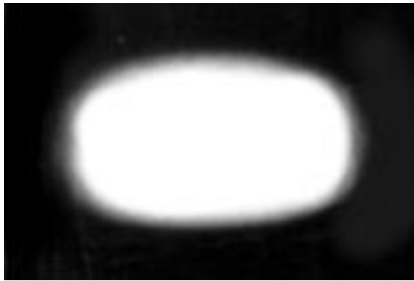


Рис. 2.3. Кадр швидкісної кінозйомки дуги

На рис. 2.4 показана залежність площі поперечного перерізу дуги S від I і P_d , на рис. 2.5 показана залежність довжини дуги L від I і P_d , на рис. 2.6 наведена залежність густини сили струму в дузі j від I і P_d , на рис. 2.7 приведена залежність напруженості електричного поля в стовпі дуги E від I і P_d , на рис. 2.8 показана залежність об'ємної густини теплової потужності в стовпі дуги K від I і P_d (всі залежності наведені для випадку протікання розряду в поперечному

потоці води між катодом зі сталі 45 і анодом з електроерозійного графіту МПГ-7 і обмежені можливостями застосовуваної техніки). Сумарне значення катодного і анодного падіння напруги мало залежить від режимів горіння дуги, визначається, перш за все, матеріалом електродів і складом робочого середовища і коливається в межах 12...21В. Сукупність представлених експериментальних даних дозволяє зробити такі висновки.

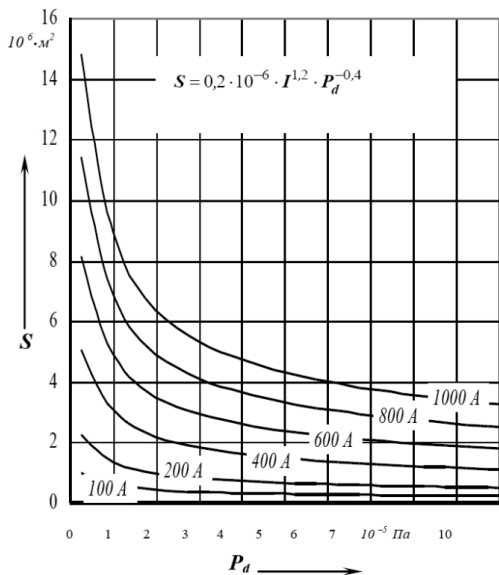


Рис. 2.4. Залежність площі поперечного перерізу S стовпа дуги від I і P_d

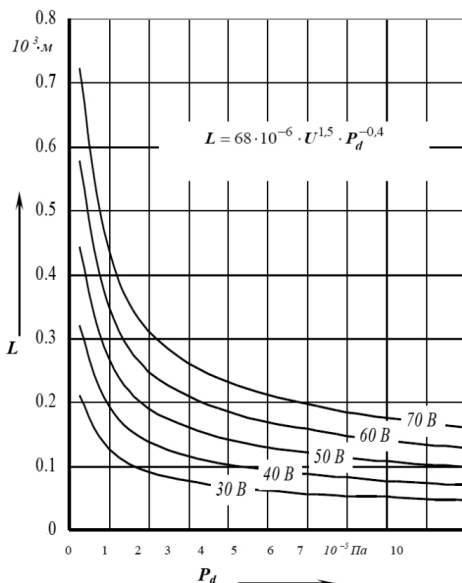


Рис. 2.5. Залежність довжини дуги L від U і P_d

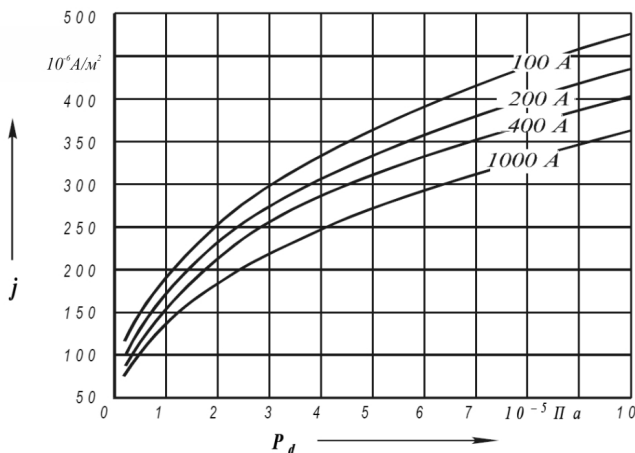


Рис. 2.6. Залежність густини струму j від I і P_d

Геометричні параметри дуги (площа поперечного перерізу, довжина і, в кінцевому рахунку, об'єм) обумовлені силою струму і динамічним тиском потоку і зі збільшенням останнього зменшуються.

У порівнянні з відомими зварювальними і плазмовими дугами площа поперечного перерізу такої дуги при інших рівних умовах (сила струму і напруга) в кілька разів менше, в десятки разів менше довжина дуги, в сотні разів менше її об'єм.

Густина сили струму в дузі є головним чином функцією динамічного тиску потоку, зростає з його збільшенням, досягаючи 40кА/см^2 і більше, і в порівнянні зі звичайними зварювальними і плазмовими дугами при інших рівних умовах (сила струму і напруга), меншою мірою, в кілька разів більше.

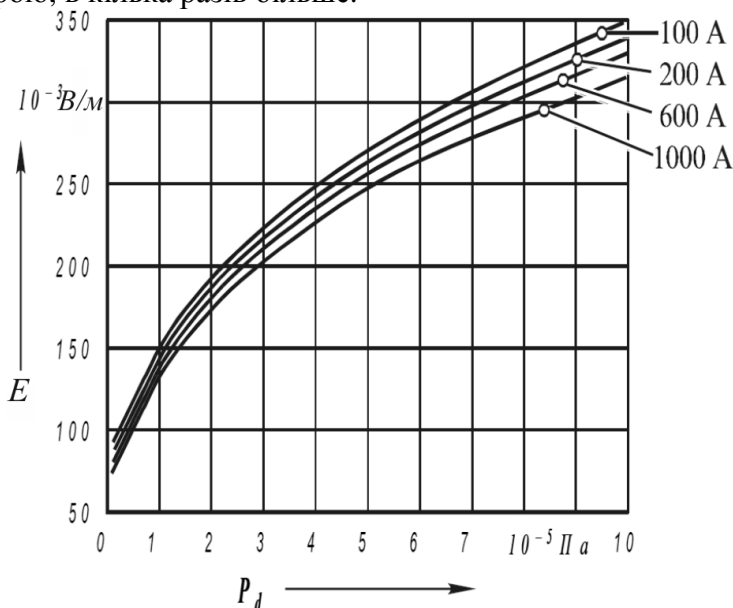


Рис. 2.7. Залежність напруженості E в стовпі дуги від I і P_d

У порівнянні з відомими зварювальними і плазмовими дугами напруженість електричного поля в стовпі дуги за інших рівних умов (сила струму і напруга) в десятки разів вище, досягає 3кВ/см і більше та є головним чином функцією динамічного тиску потоку.

Густина теплової потужності в стовпі дослідженої дуги зумовлена, перш за все, динамічним тиском потоку, різко зростає з його збільшенням і порівняно з відомими зварювальними і плазмовими дугами за інших рівних умов (сила струму і напруга) в

десятки і сотні разів вище.

Таким чином, при горінні дуги в поперечному потоці середовища-діелектрика зі збільшенням (зменшенням) динамічного тиску потоку геометричні характеристики дуги (площа поперечного перерізу і довжина) зменшуються (збільшуються), а її енергетичні характеристики, що характеризуються, зокрема, напруженістю електричного поля і густина струму в стовпі дуги, зростають (зменшуються), що слід розглядати як явище саморегулювання геометричних і енергетичних характеристик дуги в функції динамічного тиску потоку.

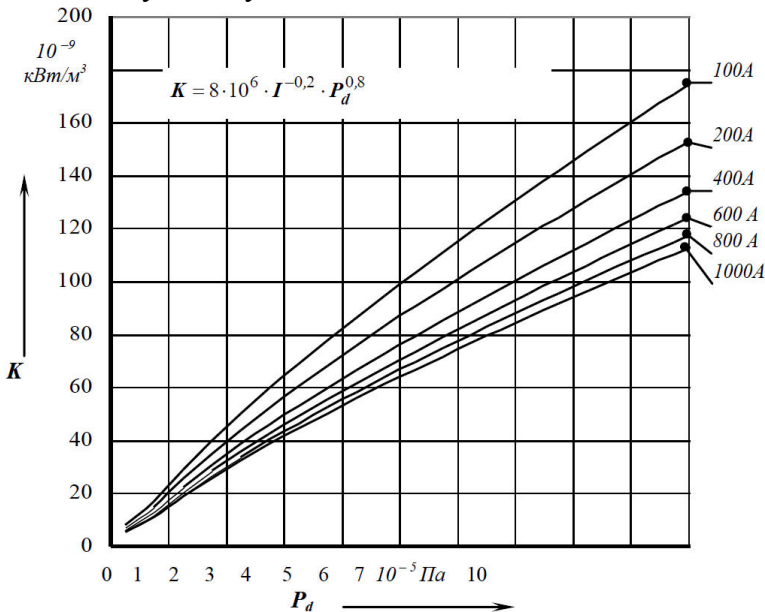


Рис. 2.8. Залежність об'ємної густини теплової потужності K в стовпі дуги від I та P_d

Оцінимо енергетичний стан плазми в стовпі дослідженої дуги, який визначається концентрацією елементарних частинок n , температурою T , об'ємною густиною теплової потужності K , тиском p . Для цього скористаємося отриманими співвідношеннями (2.1), (2.3), (2.5) і порівняємо значення максимально досягнутих енергетичних характеристик плазми стовпа такої дуги з найбільш ефективною з відомих в цьому відношенні дугою Гердієна (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Вид дуги	Енергетичні характеристики стовпа дуги					
	Густина сили струму, kA/cm^2	Напруженість електричного поля, V/cm	Концентрація елементарних частинок, $1/\text{cm}^3$	Температура плазми, K	Тиск плазми, MPa	Об'ємна густина теплової потужності, kWt/cm^3
Дуга Гердієна	30	300	10^{18}	50 000	10	9 000
Описана дуга	40	3000	10^{19}	500 000	130	120 000

З викладеного і співвідношень (1), (3), (5) випливає, що енергетичні характеристики плазми в стовпі розглянутої дуги регулюються в широких межах і значно перевищують енергетичні характеристики плазми відомих дуг, що слід розглядати як результат саморегулювання енергетичних характеристик плазми в стовпі дуги в функції динамічного тиску поперечного до стовпа дуги потоку середовища-діелектрика. Як наслідок, в стовпі такої дуги створюються, наприклад, умови для синтезу хімічних елементів зовнішнього середовища і електродів згідно таблиці Менделєєва зліва направо, що встановлено експериментально. Як уже зазначалося і описано [135], зазначені факти саморегулювання геометричних і енергетичних характеристик дослідженої дуги і, зокрема, факт утримання в стовпі дуги плазми при тиску до 130МПа, слід пояснювати наявністю потужного власного магнітного поля дуги, магнітна індукція якого є результатом не тільки сили струму, але і зовнішніх впливів і зростає зі збільшенням динамічного тиску поперечного до стовпа дуги потоку середовища-діелектрика.

У зв'язку з цим наведемо результати деяких експериментальних досліджень, що підтверджують це. При протіканні описуваної дуги між двома графітовими електродами діаметром 20мм в поперечному потоці середовища-діелектрика (вода, масло індустриальне і ін.) при силі струму 25 ... 300А, при напрузі на дузі 30В, при динамічному тиску потоку 0,3МПа (коли довжина дуги складає всього лише $\sim 0,1\text{mm}$) магнітна індукція власного магнітного поля такої дуги в 5...8 разів перевищує магнітну індукцію металевого провідника при проходженні по ньому струму такої ж сили. Це вказує на наявність потужного власного магнітного поля досліджуваної дуги і на те, що магнітна індукція такого поля є результатом не тільки сили струму, але і, перш за все, функцією динамічного тиску потоку і, отже, підтверджує викладене.

Такий же висновок впливає з балансу енергії в стовпі дослідженої дуги. Для цього візьмемо до уваги такі факти. При спостереженні електричної дуги в поперечному потоці води, наприклад, зазначених вище режимів через скло герметизованої камери, навіть на близьких відстанях, 10...20см, виявляємо, що така дуга являє собою надзвичайно скромне джерело світла у вигляді мігруючого в межах обмеженого експериментом простору стовпа плазми приблизно циліндричної форми малих розмірів (об'ємом менше 1мм^3), який можна спостерігати без світлозахисних стекол (порівняємо звичайну електричну дугу таких же електричних параметрів в повітрі, яка представляє сліпуче яскраве джерело світла і яке неможливо спостерігати без світлозахисних стекол). Це означає, що втрати енергії з стовпа запропонованої дуги за рахунок випромінювання вельми незначні. Це, по-перше. По-друге, пароутворення в результаті взаємодії стовпа такої дуги з потоком води практично не спостерігається. Це означає, що втрати енергії зі стовпа дуги за рахунок конвекції також незначні. Все це очевидно і тому, що об'єм досліджуваної дуги, як зазначалося, в сотні разів менше об'єму звичайної дуги в повітрі.

Питається, в такому випадку, куди йде енергія з стовпа дуги? Відповідь, якщо врахувати викладене, очевидно - вона перетворюється в енергію власного магнітного поля дуги. Пояснюється це, як зазначалося, тим, що стовп дуги (а це стовп плазми) являє собою сукупність елементарних заряджених частинок високих енергій (в даному випадку значно більше високих енергій, ніж у відомих дугах), які знаходяться в стані електромагнітної взаємодії [137, с. 63], створюючи, таким чином, сукупне магнітне поле дуги (в даному випадку, тому, значно більш високих характеристик, ніж у відомих дугах) і, перетворюючи, в кінцевому рахунку, енергію електричного поля в енергію магнітного поля. Таким чином електрична дуга в поперечному силовому полі є високоефективним перетворювачем енергії електричного поля в енергію магнітного поля. Як наслідок, в зоні дії такого магнітного поля дуги спостерігається, наприклад, розщеплення хімічних елементів зовнішнього середовища і електродів згідно таблиці Менделєєва справа наліво, що підтверджено експериментально.

Зауважимо, всі відомі електричні дуги високих енергетичних характеристик, включаючи описану і використовувану для розмірної

обробки металів (РОД), реалізовані в умовах протікання в поперечному потоці середовища-діелектрика. Це перш за все плазмові дуги, наприклад дуга Гердієна, коли ефект всебічного, поперечного до стовпа дуги динамічного впливу потоку середовища-діелектрика досягається за рахунок обмеження площі поперечного перерізу каналу розряду соплом плазмотрона з додатковим впливом потоку на стовп дуги за рахунок прокачування через сопло середовища-діелектрика. Сюди можна віднести, як одну з різновидів дугового розряду, також імпульсний розряд у воді або іскровий (імпульсний) розряд, в іншій рідині, наприклад, в умовах електроіскрової обробки, коли динамічна взаємодія розряду з поперечним потоком середовища-діелектрика досягається в умовах мінливого у часі всебічного стиснення стовпа дуги при розширенні каналу розряду, коли останній "набігає" на нерухоме середовище-діелектрик, стискаючи його. У зв'язку з цим на умовній схемі (рис. 2.9) наведені енергетичні характеристики зазначених дуг (порівняльні, узагальнені, усереднені) в функції динамічного тиску поперечного потоку середовища-діелектрика, що підтверджує викладені закономірності реалізації дуг в поперечному потоці середовища-діелектрика і дозволяє стверджувати, що при подальшому збільшенні P_d і, відповідно U_c , енергетичні характеристики таких дуг зростатимуть, в першому наближенні, відповідно до встановлених функціональних залежностей.

Висновок. За результатами експериментальних досліджень описані функціональні залежності енергетичних характеристик плазми в стовпі запропонованої дуги, власне j , E і, відповідно, T , n , K , p , а також магнітної індукції власного магнітного поля дуги B , від динамічного тиску поперечного до стовпа дуги потоку середовища-діелектрика при $P_d \leq 1$ МПа. Показано, що при збільшенні P_d всі зазначені енергетичні характеристики плазми одночасно зростають. Це дозволяє на підставі встановлених функціональних залежностей шляхом простої екстраполяції отриманих результатів розрахувати значення зазначених енергетичних характеристик плазми при подальшому збільшенні P_d і дозволяє стверджувати, що при відповідному збільшенні P_d і, відповідно, напруги на стовпі дуги U_c , забезпечується отримання в стовпі дуги плазми енергетичних характеристик T , n , p , необхідних для відомих процесі ЕРО.

ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ (порівняльні, узагальнені, усереднені)

55

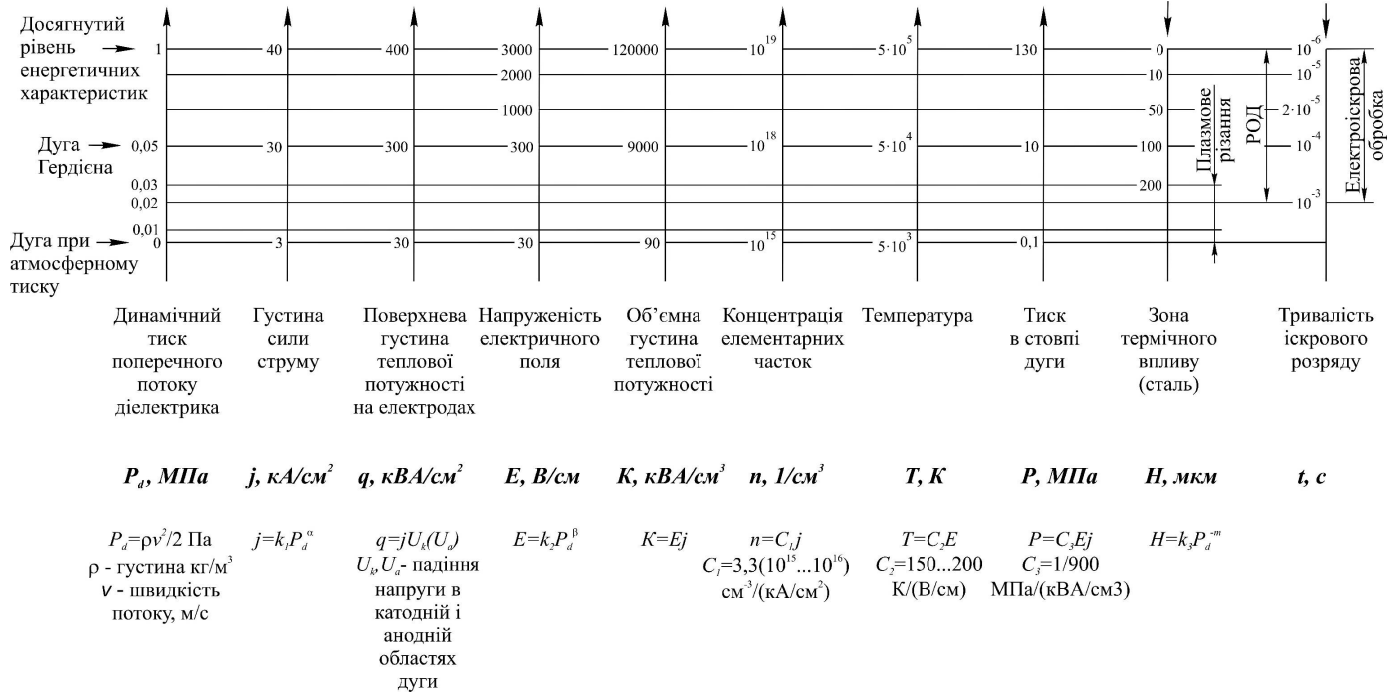


Рис. 2.9.

2.3.2.2. Феноменологічний опис дуги

З виразів (2.1, 2.3, 2.5), а також описаних залежностей густина сили струму і напруженості електричного поля (див. Рис. 2.7, 2.8) і табл. 2.1, а також результатів експериментальних досліджень, слідує, що енергетичні характеристики плазми в стовпі розглянутої дуги регулюються в широких межах і значно перевищують енергетичні характеристики плазми відомих дуг, а власне магнітне поле дуги утримує плазму отриманих енергетичних характеристик, що треба розглядати як результат саморегулювання енергетичних характеристик плазми в стовпі дуги в функції динамічного тиску потоку і що отримує пояснення згідно принципу зміщення рівноваги. Опишемо ймовірний фізичний механізм такого саморегулювання, що є результатом взаємодії дуги з потоком.

Описати таке явище в термінах фундаментальних частинок і їх взаємодій поки не є можливим. Тому розглянемо цю взаємодію на феноменологічному рівні, з макроскопічної точки зору, з точки зору взаємодії, власне, дуги і поперечного потоку середовища-діелектрика. Як зазначалося, згідно уявлень сучасної фізики, будь-яка взаємодія здійснюється через деякі поля. Електрична дуга – це породження того, що ми називаємо електричним полем, це матеріальна форма його прояву, це, на відміну від металевих провідників струму, "оголена" форма існування електричного поля, яке таким чином має самий безпосередній контакт із зовнішнім середовищем, взаємодіючи з ним, і чим, власне, пояснюються тонкі механізми саморегулювання дуги в функції складу і стану зовнішнього середовища. Потік середовища – це силове поле. Нагадаємо, що силове поле - це будь-яка причина, що викликає рух або його зміни.

Таким чином, взаємодія дуги з потоком слід розглядати як взаємодію електричного поля, що характеризується силою струму I , і силового поля, що характеризується динамічним тиском потоку P_d . Основним результатом такої взаємодії є те, що взаємодіючі системи зазнають змін.

Як було показано, в результаті взаємодії дуги з потоком спостерігається явище саморегулювання енергетичних характеристик дуги (напруженості електричного поля і густини струму) і,

відповідно, енергетичних характеристик плазми в стовпі дуги (концентрації елементарних частинок, температури і тиску) в функції динамічного тиск потоку. Опишемо фізичний механізм такої взаємодії. Почнемо з аналізу деяких фактів існування дуги в екстремальних умовах "механічної" взаємодії дуги з потоком, коли, по-перше, дуга зазвичай переміщується у напрямку руху потоку, але переміщається дискретно, після деякого вистоювання, зі швидкістю, приблизно, на порядок менше швидкості потоку (але тоді, скажемо так, як і якою є природа сил, "механічного зчеплення" дуги з електродами) і, по-друге, в результаті бічного тиску потоку на стовп дуги її існування здавалося б можливим тільки в тому випадку, якщо стовп дуги буде володіти достатньою "механічною міцністю" (інакше він буде зруйнований). Наслідком взаємодії дуги з потоком є також, наприклад, факт руху дуги в напрямку, поперечному до напрямку руху потоку, що спостерігається, наприклад, при горінні дуги між сталевими електродами при силі струму $I > 300 \dots 400 \text{ A}$ і динамічному тиску потоку $P_d > 0,3 \text{ МПа}$. Це також вимагає пояснення, але одночасно дозволяє більш визначено поглянути на сукупність викладених фактів.

Згідно з існуючими уявленнями, в даному випадку, єдиною силою, яка може переміщати дугу в напрямку, поперечному до потоку, може бути тільки власне магнітне поле дуги, посилене дією феромагнетика. При цьому, на відміну від звичайних дуг, типу зварювальних, таке магнітне поле не є симетричним, а напрямок вектора магнітної індукції такого поля збігається з напрямком потоку середовища-діелектрика (згідно правила "лівої" руки). Це, зокрема, пояснює вказаний раніше факт, коли дуга в поперечному потоці середовища-діелектрика переміщається не разом з потоком і не з його швидкістю, бо потужне власне магнітне поле забезпечує переміщення дуги згідно принципу мінімуму Штеенбека. Стає зрозумілою при цьому і "механічна міцність" такої дуги, бо власне магнітне поле дуги відповідних характеристик, що визначається динамічним тиском потоку і є значно більш високим у порівнянні зі звичайними дугами, стискає, утримує і врівноважує тиск плазми в стовпі дуги (яке, нагадаємо, багаторазово перевищує тиск в стовпі відомих дуг - см.

вираз 2.5, табл. 2.1) і таким чином забезпечує відповідну енергетичну структуру стовпа дуги, яка руйнує набігаючий на неї потік середовища-діелектрика. При цьому беремо до уваги, що в зоні дії власного магнітного поля дуги потік середовища-діелектрика протікає з великою швидкістю і таким чином вже на молекулярному рівні в цій зоні кожна частка середовища-діелектрика піддається інтенсивному впливу магнітного поля. Як наслідок, в цій перехідній зоні відбувається руйнування потоку, відбувається, що спостерігається експериментально, розщеплення матеріалу середовища-діелектрика на більш прості хімічні елементи. Такому ж ефекту розщеплення в зоні дії власного магнітного поля дуги піддаються ті випаровуванні частки матеріалу електродів, які з великою швидкістю перетинають це магнітне поле.

Не можна при цьому виключати можливість термічної взаємодії дуги з потоком за рахунок конвекції і випромінювання. Але втрати енергії зі стовпа дуги за рахунок конвекції і випромінювання, як зазначалося, практично не виявляються. Тому можна стверджувати, що втрати енергії з стовпа дуги відбуваються головним чином за рахунок втрат енергії власного магнітного поля дуги. Це означає, що електрична дуга в поперечному потоці середовища-діелектрика є високоефективним перетворювачем енергії електричного поля в енергію магнітного поля. Принагідно зауважимо, що електрична дуга в поперечному магнітному полі отримує власне магнітне поле зворотного знака по відношенню до останнього, яке (власне магнітне поле дуги) забезпечує ті ж процеси саморегулювання що і власне магнітне поле дуги в поперечному потоці середовища-діелектрика.

Таким чином наявність власного потужного магнітного поля, магнітна індукція якого є результатом не тільки сили струму I (що відомо як закон Біо-Саварра), але і динамічного тиску потоку P_d (що невідомо), є наслідком і необхідною умовою існування дуги в екстремальних умовах поперечного потоку середовища-діелектрика. Визначимо магнітну індукцію такого поля. На підставі викладеного та виконаних експериментальних досліджень, а також з огляду на існуючі уявлення в області теорії і практики відомих дуг, можна

зробити висновок, що магнітна індукція такого поля пропорційна силі струму I і динамічному тиску потоку середовища-діелектрика P_d , залежить від напрямку потоку по відношенню до стовпа дуги і може бути представлена виразом, Тл:

$$B = k_1 I P_d \sin \alpha, \quad (2.7)$$

де k_1 - коефіцієнт розмірності (при належному виборі одиниць виміру $k_1=1$); α - кут між напрямком потоку середовища-діелектрика і стовпом дуги; при горінні дуги в поперечному потоці середовища діелектрика $\alpha = 90^\circ$ і тоді $\sin \alpha = 1$.

Мовою векторної алгебри вираз (7) може бути представлено у вигляді

$$\bar{B} = \bar{I} \times \bar{P}_d \quad (2.8)$$

Отриманий вираз (2.8) має принципове значення і важливі наслідки. Сформулюємо в найзагальнішому вигляді його фізичний зміст, взявши до уваги, що I – основна кількісна характеристика електричного поля, P_d – основна кількісна характеристика силового поля.

Співвідношення (2.8) виявляє, по суті, невідому раніше закономірність взаємодії електричного і силового полів, результатом якого є перетворення енергії електричного поля в енергію власного магнітного поля дуги, яке стискає і утримує плазму стовпа дуги високих енергетичних характеристик. Отже, в стовпі запропонованої дуги одночасно досягається і отримання, і утримання плазми високих енергетичних характеристик.

Це означає, що одне явище (отримання в стовпі плазми відповідних характеристик) обов'язково супроводжується іншим явищем (наявністю власного магнітного поля дуги відповідних характеристик). Інакше, скажімо так, кожне з цих явищ є наслідком і продовження іншого, а в цілому - це дві сторони одного і того ж явища, званого електромагнетизмом дугового розряду.

Відповідний аналіз показує, що зазначена закономірність поширюється на всі відомі дуги. У зв'язку з цим зазначимо, що будь-які переміщення відомих дуг, в тому числі і численні приклади так званого аномального зворотного руху дуги [136, с. 306] (описано вище), пояснюються наявністю власного магнітного поля дуги, яке завжди несиметричне і мінливе і яке забезпечує переміщення дуги згідно принципу найменшої дії, сформульованого для дуг як принцип

мінімуму Штеенбека. Саме тому переміщення дуги в просторі є її безумовним властивістю.

На відміну від існуючих уявлень про те, що магнітна індукція є функцією тільки сили струму (закон Біо-Саварра), вираз (2.8) встановлює, що в умовах існування дуги в поперечному потоці середовища-діелектрика магнітна індукція власного магнітного поля дуги є також і функцією динамічного тиску потоку. Однак, якщо врахувати, що електричні та магнітні сили складають частини одного фізичного явища - електромагнітної взаємодії частинок [133, с. 276] і, відповідно, електричні і магнітні ефекти слід розглядати як різні сторони одного і того ж явища, званого електромагнетизмом, зазначена закономірність не суперечить існуючим в цій області уявленням.

Слід нагадати, що будь-яке явище поза зв'язком і взаємозалежністю з іншими явищами стає ірраціональним. У зв'язку з цим відзначимо, що вираз (2.8) певною мірою є аналогічним виразам, що описує закон електромагнітної сили (закон Ампера) і закон електромагнітної індукції (закон Фарадея) з тієї принциповою різницею, що в першому випадку встановлюється, по суті, закон взаємодії електричного і магнітного полів, результатом якого є перетворення енергії електричного поля в енергію силового поля; у другому випадку встановлюється закон взаємодії силового і магнітного полів, результатом якого є перетворення енергії силового поля в енергію електричного поля; вираз (2.8) встановлює закономірність взаємодії електричного і силового полів, результатом якого є перетворення енергії електричного поля в енергію магнітного поля, в зв'язку з чим така закономірність може бути названа законом магнітної індукції.

У аналогіях і спільності форм усіх зазначених закономірностей, в тому, що їх об'єднує і робить схожими, слід шукати спільність фізичної сутності розглянутих явищ, яка, очевидно, може бути сформульована як закономірність взаємоперетворення енергій електричного, магнітного та силового полів. У зв'язку з цим зручно простежити за такими фактами взаємоперетворення енергій електричного E , магнітного B і силового P полів на умовній схемі (рис. 2.10), названої нами трикутником взаємоперетворення енергій електричного, магнітного та силового полів.

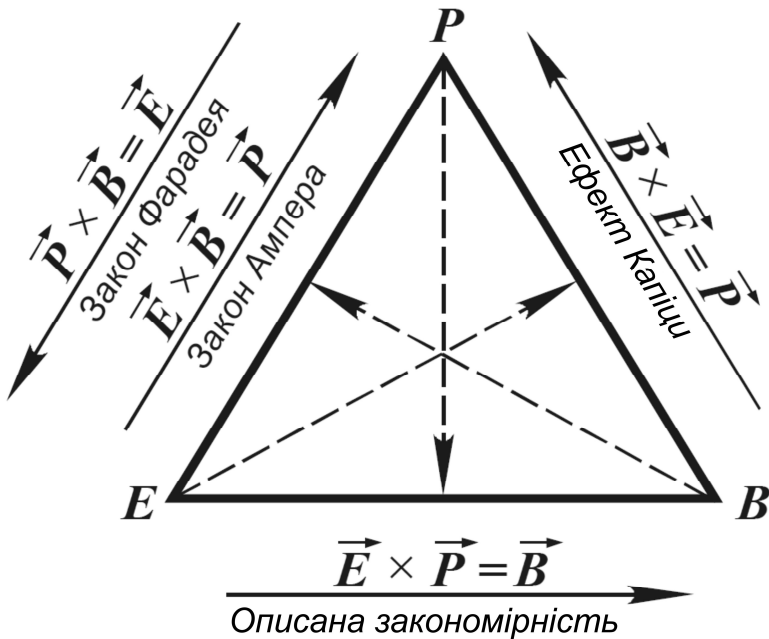


Рис. 2.10. Трикутник взаємоперетворення енергій електричного I , магнітного B і силового P полів

2.3.2.3. Наукова новизна

Результати теоретичних і експериментальних досліджень електричної дуги в поперечному силовому полі в умовах динамічного впливу, наприклад в поперечному потоці середовища-діелектрика, дозволяють сформулювати наукову новизну пропозиції, яка описана [135] і полягає в наступному.

Встановлена невідома раніше закономірність взаємодії електричного поля, матеріальною формою прояву якого є електрична дуга, яка характеризується силою струму I , і силового поля, матеріальною формою прояву якого є, наприклад, потік середовища-діелектрика, що характеризується динамічним тиском P_d , яка полягає в тому, що така взаємодія супроводжується явищем саморегулювання енергетичних характеристик плазми в стовпі дуги, власне, температури T , концентрації елементарних частинок n , тиску p , а також магнітної індукції власного магнітного поля дуги B , які описуються в функції векторного добутку сили струму дуги I на

динамічний тиск P_d поперечного до стовпа дуги силового поля, наприклад потоку середовища-діелектрика, тобто $\bar{I} \times \bar{P}_d$, і одночасно зростають при збільшенні останнього.

Викладена закономірність означає, що при протіканні електричної дуги в поперечному силовому полі в умовах динамічного впливу, наприклад, в поперечному потоці середовища-діелектрика, енергетичні характеристики плазми в стовпі дуги (температура T , концентрація елементарних частинок n , тиск p) регулюються в найширших межах в функції динамічного тиску потоку P_d , а власне магнітне поле дуги стискає і утримує в стовпі дуги отриману плазму заданих, регульованих енергетичних характеристик, починаючи від значень характерних для звичайних зварювальних дуг і закінчуючи плазмою, енергетичні характеристики якої обмежуються лише можливостями застосовуваної техніки (робочою напругою джерела живлення дуги і динамічним тиском потоку середовища-діелектрика). Це дозволяє використовувати таку дугу для різноманітних застосувань в областях науки і нових технологій.

2.3.2.4. Області раціонального застосування

Електричну дугу в поперечному силовому полі слід розглядати, згідно викладеного як якісно новий технологічний засіб для невідомих раніше високоефективних застосувань, зокрема таких. Високотемпературна електрична дуга в поперечному силовому полі за своїми енергетичними характеристиками є унікальним, єдиним з відомих, джерелом енергії, який забезпечує одночасне підвищення температури і тиску плазми в стовпі дуги до найвищих значень, а також її одночасне утримання власним магнітним полем. Енергетичні характеристики плазми в стовпі такої дуги, власне, температура, концентрація елементарних частинок, тиск плазми, регулюються в найширшому діапазоні режимів і обмежуються лише можливостями застосовуваної технології (робочим напруженням джерела живлення і динамічним тиском силового поля), а власне магнітне поле дуги утримує плазму отриманих енергетичних характеристик. До того ж є

можливим в найширшому діапазоні режимів змінювати потужність електричної дуги, як джерела енергії, від сотень ватів до багатьох тисяч кіловат нижче. У зв'язку з цим виникає проблема термоізоляції отриманої високотемпературної плазми і її утримання в стовпі стаціонарної дуги. Цю проблему можна вирішити, наприклад, якщо потік середовища-діелектрика в міжелектродному зазорі формувати так, щоб в приелектродних областях його швидкість дорівнювала або наближалася до нуля при збереженні необхідної швидкості потоку (динамічного тиску) в середній частині стовпа дуги (рис. 2.11). При цьому на відміну від відомих технічних рішень, коли для утримання плазми високих енергетичних характеристик використовуються зовнішні магнітні поля і коли системи такого виду називаються "магнітними пастками", запропоноване технічне рішення згідно викладеної суті розглянутого фізичного явища (див. вираз 2.8) слід назвати "механічної пасткою". Зазначимо, що не менш ефективними "механічними пастками" є загальновідомі схеми одержання звичайної плазмової дуги чи дуги Гердієна.

На умовній схемі, що представлена на рис. 2.12, наведені в функції динамічного тиску поперечного потоку середовища-діелектрика енергетичні характеристики плазми в стовпі дуги (порівняльні, узагальнені, усереднені) для звичайної дуги в повітрі, для дуги Гердієна, для досліджуваної дуги, а також отримані шляхом простої екстраполяції розрахункових значень енергетичних характеристик високотемпературної плазми при тиску плазми в стовпі дуги ~ 2000 МПа її температура $T=10^7$ К.

Як наслідок в стовпі дуги такої дуги створюються, наприклад, умови для синтезу хімічних елементів зовнішнього середовища і електродів згідно таблиці Менделєєва зліва направо. При цьому необхідно враховувати, що стовп дуги створюється з матеріалу зовнішнього середовища і матеріалу електродів, а при використанні відповідних технологічних прийомів може складатися тільки з матеріалу зовнішнього середовища. При цьому управління процесом і, в кінцевому рахунку, реалізація керованого синтезу здійснюється в

найширшому діапазоні режимів і досягається простими засобами, коли кількість вступають у реакцію елементарних частинок регулюється простим зміною сили струму при найширших можливостях зміни складу зовнішнього середовища в міжелектродному зазорі.

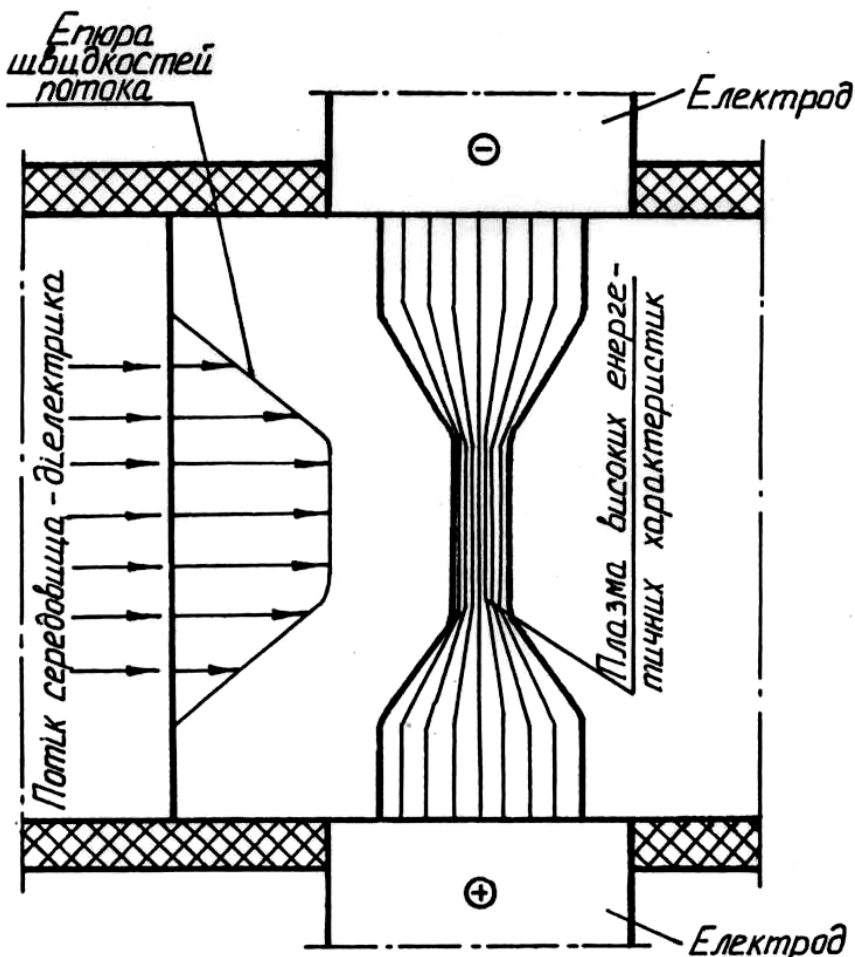
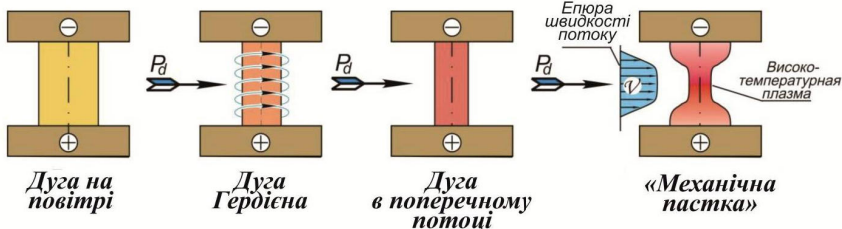
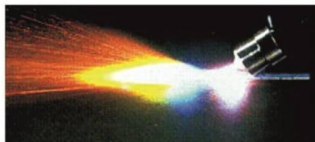


Рис. 2.11. "Механічна пастка"

ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМИ В СТОВПІ ДУГИ (порівняльні, узагальнені, усереднені)



Динамічний тиск поперечного потоку, МПа	$P_d = \frac{\rho v^2}{2}$	0	~ 0,05	1	~ 500
Густина сили струму, кА/см ²	$j = k_1 P_d^\alpha$	3	30	40	> 40
Напруженість електричного поля, В/см	$E = k_2 P_d^\beta$	30	300	3000	~ 50 000
Об'ємна густина теплової потужності кВА/см ³	$K = jE$	90	9000	120000	~ 2 000 000
Концентрація елементарних часток, 1/см ³	$n = C_1 j$	10^{15}	10^{18}	10^{19}	$> 10^{19}$
Температура, К	$T = C_2 E$	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^5$	~ 10^7
Тиск, МПа	$p = C_3 jE$	0,1	10	130	~ 2 000

Рис.2.12.

Висновок.

1. Запропоновано технічне рішення ("механічна" пастка) і описані режими реалізації процесу, що дозволяють отримати й утримати в стовпі електричної дуги плазму енергетичних характеристик T , n , p , необхідних для "запалювання" плазми і протікання реакції синтезу хімічних елементів таблиці Менделєєва зліва направо.

2. Електрична дуга в поперечному силовому полі є високоефективним перетворювачем енергії електричного поля в енергію власного магнітного поля дуги. При цьому в зоні дії такого магнітного поля надається можливим здійснити, наприклад, розщеплення хімічних елементів зовнішнього середовища і електродів згідно таблиці Менделєєва справа наліво і таким чином перетворити, наприклад, воду чи повітря в вуглеводні. При цьому як в першому випадку (синтез хімічних елементів), так і в другому випадку (розщеплення хімічних елементів) за рахунок зміни умов і режимів горіння дуги є можливість управляти цими процесами, забезпечуючи необхідні або прийнятні форми таких перетворень.

3. При протіканні електричної дуги в поперечному силовому полі енергетичні характеристики катодного і анодного джерел тепла на електродах регулюються в найширшому діапазоні режимів, починаючи від значень, характерних для звичайних дуг, типу зварювальних, достатніх для плавлення металу, і закінчуючи значеннями, достатніми для тонкого розмірного випаровування будь-яких струмопровідних матеріалів. Це дозволяє реалізувати найрізноманітніші нові високоефективні технології, зокрема, розмірну обробку металів, різні способи поверхневого зміцнення металів, більш ефективно у порівнянні з відомим підводним різанням металів, плазмове різання металів при відсутності зони термічного впливу, отримання металевих порошків, отримання металевих суспензій, проведення хімічних реакцій і т.ін.

3. ЕЛЕКТРИЧНА ДУГА В ПОПЕРЕЧНОМУ ПОТОЦІ РІДИНИ ЯК ДЖЕРЕЛО ТЕПЛА ДЛЯ РОЗМІРНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ

Відомі електричні дуги непридатні для розмірної обробки металів. Тому сформулюємо основні вимоги до дуги як джерела тепла для розмірної обробки металів, які повинні відрізнити таку дугу від відомих дуг. Вони полягають в тому, що, по-перше, така дуга повинна мати значно більш високі енергетичні характеристики, достатні для локального руйнування металу за рахунок його плавлення і випаровування; по-друге, для керування якісними характеристиками процесу обробки енергетичні характеристики такої дуги повинні легко регулюватись і, по-третє, для забезпечення розмірної обробки, довжина дуги повинна бути мінімально можливою (в межах десятих і сотих часток міліметра). До речі, значною мірою саме остання обставина не дозволяє, зокрема, використати звичайні плазмові дуги для розмірної обробки металів.

Зазначеним вимогам відповідає електрична дуга в поперечному потоці рідини. Саме таку дугу, – електричну дугу в поперечному потоці рідини, – і було використано в якості джерела тепла, в якості «інструмента» обробки при реалізації принципово нового способу ЕРО, який отримав назву розмірної обробки дугою (РОД).

Електричні характеристики дуги, – струм I і напруга, – можуть бути установлені за осцилограмами. Типова осцилограма струму і напруги в поперечному потоці рідини підтверджує безперервне горіння дуги (рис. 3.1), не має принципових відмін від типових осцилограм струму і напруги відомих зварювальних і плазмових дуг і відрізняється більш стабільними значеннями струму і напруги. Порівняно із зварювальними дугами напруга дуг, що горять в поперечному потоці рідини в умовах РОД, дещо вища і в ряді випадків наближується до напруги плазмових дуг для зварювання і різання металів. Струм такої дуги, як і для відомих дуг, може змінюватись від декількох ампер до багатьох тисяч ампер.

Струм I і напруга дуги U безперервно змінюються (рис.3.1). Тому для кожного заданого проміжку часу t існування дуги треба розрізнити максимальну напругу дуги U_{max} , мінімальну напругу U_{min} ,

середню напругу U_{cp} , максимальний струм дуги I_{max} , мінімальний струм I_{min} , середній струм I_{cp} . При цьому максимальному струму I_{max} відповідає мінімальна напруга U_{min} і, навпаки, мініальному струму I_{min} відповідає максимальна напруга U_{max} , що пояснюється використанням джерел живлення технологічним струмом із зовнішніми падаючими характеристиками.

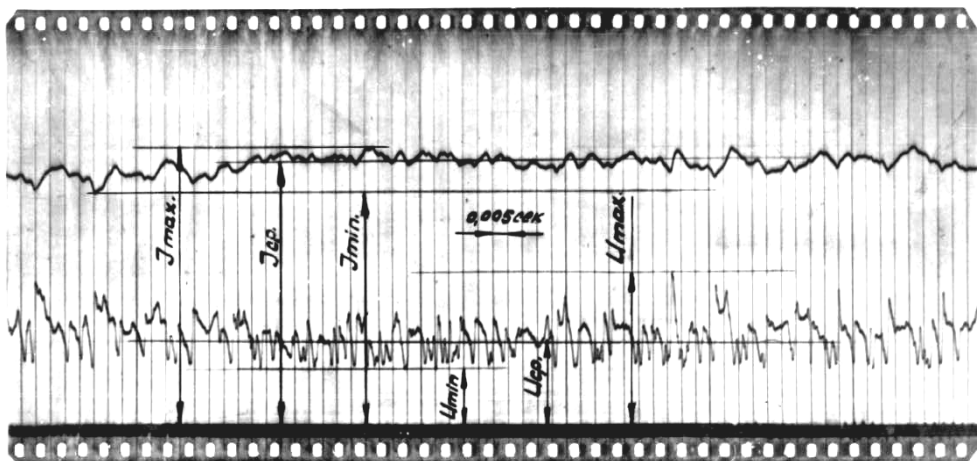


Рис. 3.1. Типова осцилограма струму I і напруги U дуги при РОД

Дуга в поперечному потоці рідини переміщується по поверхні електродів зі значними швидкостями, що досягають кількох дециметрів за секунду. Форма і розміри такої дуги безперервно змінюються. Тому дійсні форма і розміри дуги визначаються при її фотографуванні з малими експозиціями, а також за результатами швидкісної кінозйомки на підставі покадрового візуального дослідження і замірів зображення дуги. Площі поперечних перерізів катодної і анодної областей дуги визначаються на підставі аналізу слідограм на аноді і катоді в результаті безпосередніх замірів відбитків короточасної дуги. Довжина дуги L приймається рівною міжелектродному зазору δ , який визначався за осцилограмами, а також за результати безпосередніх замірів по завершенні експерименту.

Площа поперечного перерізу дуги S є головним чином функцією струму I і динамічного тиску потоку робочої рідини P_d . На рис. 3.2 показана залежність площі поперечного перерізу дуги S в

поперечному потоці водопровідної води між катодом із сталі 45 і анодом із матеріалу МПГ-7 від I і P_d при $I=100...1000A$ і $P_d = 0,01...1MPa$ згідно формули, m^2 :

$$S = 0,22 \cdot 10^{-6} \cdot I^{1,17} \cdot P_d^{-0,39}, \quad (3.1)$$

Приведена залежність дозволяє зробити висновок, що площа поперечного перерізу дуги зростає при збільшенні I і зменшенні P_d . Зазначимо, що порівняно зі звичайними зварювальними і плазовими дугами [141] площа поперечного перерізу дуг в поперечному потоці рідини в умовах РОД при інших рівних умовах (струм і напруга) принаймні в декілька разів менше.

Електрод	Матеріал	Полярність	Робоча рідина
Заготовка	Сталь 45	-	Вода
Інструмент	МПГ-7	+	

$$S = 0,22 \cdot 10^{-6} \cdot I^{1,17} \cdot P_d^{-0,39}$$

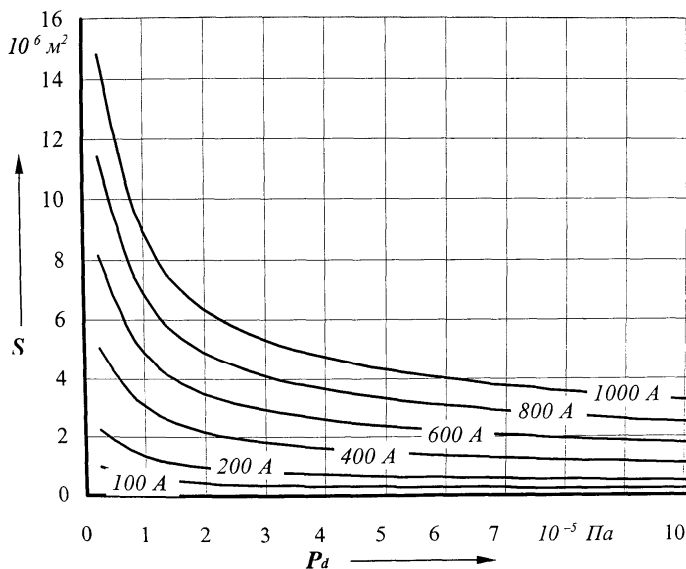


Рис. 3.2. Залежність площі поперечного перерізу S від P_d і I

Довжина дуги L є головним чином функцією напруги дуги U і динамічного тиску потоку робочої рідини P_d . На рис. 3.3 показана залежність довжини дуги L , що горить при струмах $I = 100...1000A$ в поперечному потоці водопровідної води між катодом із сталі 45 і

анодом із матеріалу МПГ-7, від U і P_d при $U = 30...70\text{В}$ і $P_d = 0,01...1\text{МПа}$, згідно формули, м:

$$L = 68,23 \cdot 10^{-6} \cdot U^{1,46} \cdot P_d^{-0,39}, \quad (3.2)$$

Приведена залежність дозволяє зробити висновок, що довжина дуги зростає при збільшенні U і зменшенні P_d . Зазначимо, що порівняно зі звичайними зварювальними і плазовими дугами [125, с. 15...21] довжина дуг в поперечному потоці рідини за інших рівних умов (напруга і струм) в десятки разів менше. Це дозволяє використати таку дугу для достатньо точної розмірної обробки металів.

Електрод	Матеріал	Полярність	Робоча рідина
Заготовка	Сталь 45	-	Вода
Інструмент	МПГ-7	+	

$$L = 68,23 \cdot 10^{-6} \cdot U^{1,46} \cdot P_d^{-0,39}$$

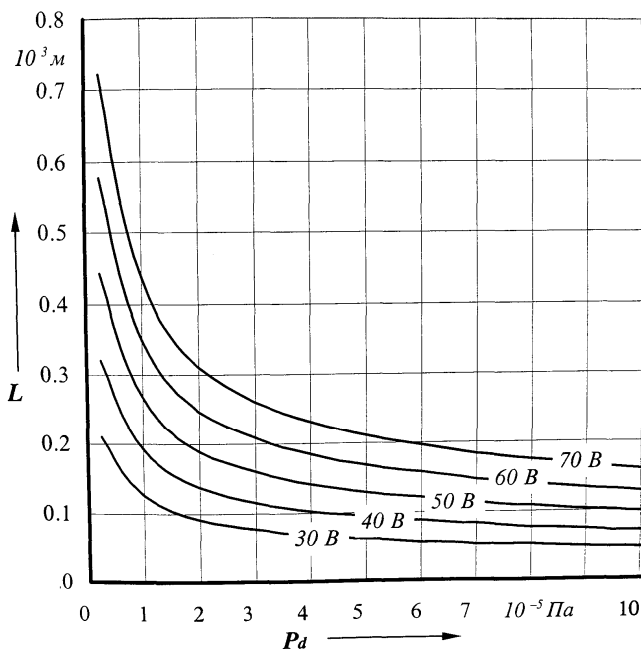


Рис. 3.3. Залежність довжини дуги L від P_d і U

Густина струму в дузі j є головним чином функцією струму дуги I та динамічного тиску потоку робочої рідини P_d . Густина струму в дузі визначалась на підставі замірів струму за

осцилограмами та замірами площ відбитків короткочасної дуги на металевих електродах. На рис. 3.4 показана залежність густини струму j в дузі, що горить в поперечному потоці водопровідної води між катодом із сталі 45 і анодом із матеріалу МПГ-7, від I і P_d при $I = 100 \dots 1000 \text{ A}$ і $P_d = 0,01 \dots 1 \text{ МПа}$, визначається згідно формули, $\text{A}/\text{м}^2$:

$$j = 2,86 \cdot 10^6 \cdot I^{-0,12} \cdot P_d^{0,41} \quad (3.3)$$

Електрод	Матеріал	Полярність	Робоча рідина
Заготовка	Сталь 45	-	Вода
Інструмент	МПГ-7	+	

$$j = 2,86 \cdot 10^6 \cdot I^{-0,12} \cdot P_d^{0,41}$$

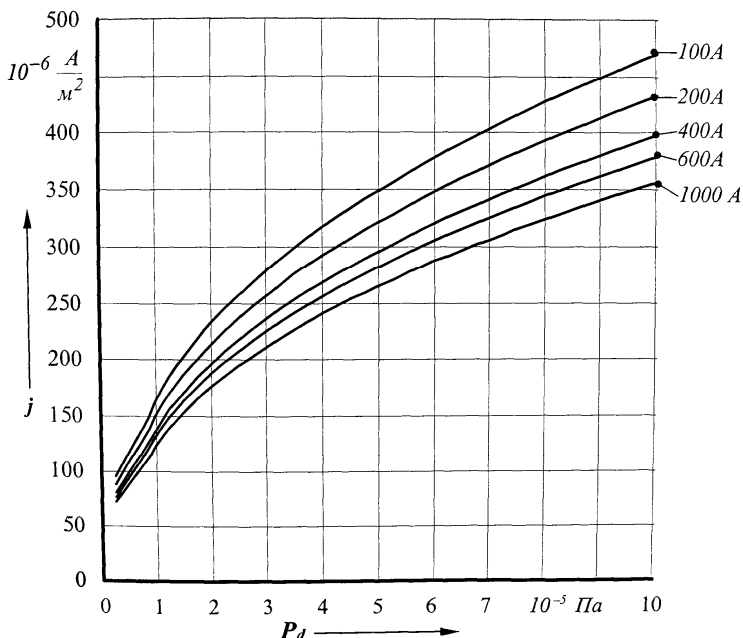


Рис. 3.4. Залежність густини струму j від P_d і I

На рис. 3.5 для тих же умов приведена аналогічна залежність для випадку, коли катод і анод виготовлені із сталі 45. Отримані залежності дозволяють зробити висновок, що в діапазоні зазначених режимів обробки густина струму в дузі порівняно мало залежить від струму і значно залежить від динамічного тиску потоку рідини. При

цьому порівняно зі звичайними зварювальними і плазмовими дугами [125, с.30] густина струму в дугах, що горять в поперечному потоці рідини, за інших рівних умов (струм і напруга) в декілька разів більше і наближується за своїми значеннями до густини струму в стовпі нестационарного іскрового електричного розряду [142, с. 98, 104], зокрема в умовах відомих способів ЕРО [143, с. 35].

Електрод	Матеріал	Полярність	Робоча рідина
Заготовка	Сталь 45	-	Вода
Інструмент	Сталь 45	+	

$$j = 5,58 \cdot 10^6 \cdot I^{-0,09} \cdot P_d^{0,38}$$

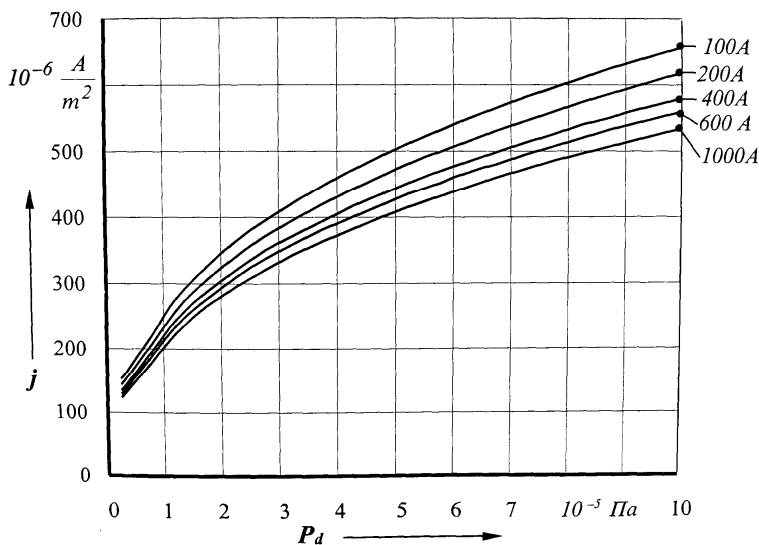


Рис. 3.5. Залежність густини струму j від P_d і I

Про характер розподілу струму по поперечному перерізу дуги можна судити по характеру ерозійної дії дуги на металеві електроди, зокрема, по профілю лунок обробленої поверхні. На рис. 3.6 показано профіль лунок на катоді і аноді із сталі 45 при протіканні дуги в поперечному потоці водопровідної води при струмі $I = 400A$ і динамічному тиску потоку $P_d = 0,1 MPa$. На рис. 3.7, а. для тих же режимів показано профіль лунок на аноді із сталі 45 при використанні

для катода матеріалу МПГ-7, а на рис. 3.7, б. для тих же режимів показано профіль лунок на катоді із сталі 45 при використанні для анода матеріалу МПГ-7.

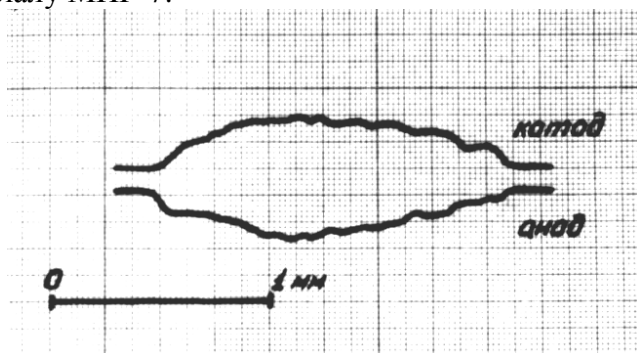


Рис. 3.6. Профіль лунок на катоді і аноді зі сталі 45

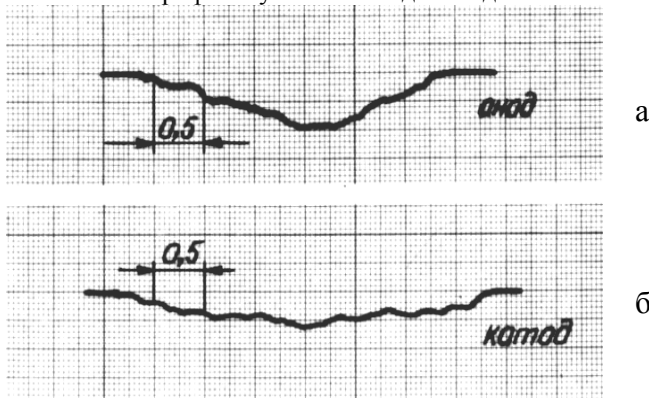


Рис. 3.7. Профіль лунок на аноді (а) і катоді (б) зі сталі 45 при використанні електродів із матеріалу МПГ-7

Приведені профілі лунок дозволяють зробити висновок, що при застосуванні для катода і анода сталі 45 струм як в катодній, так і в анодній плямах розподілено достатньо рівномірно (оскільки лунки мають достатньо рівномірну глибину). Коли застосовують катод із сталі 45 і анод із матеріалу МПГ-7, струм в катодній плямі також розподілено достатньо рівномірно. При використанні анода із сталі 45 і катода із матеріалу МПГ-7 струм в анодній плямі розподілено нерівномірно з явно вираженим максимумом густини струму в центрі (оскільки лунки характеризуються нерівномірною глибиною по ширині при максимальній глибині в центрі).

Сумарне значення катодного і анодного падінь напруги $U_{к+а}$ визначалось методом [125, с. 14] зближення електродів (рис. 3.8). На рис. 3.9 приведена залежність $U_{к+а}$ від I та P_d для дуг в поперечному

потоці водопровідної води між катодом із сталі 45 і анодом із матеріалу МПГ-7 при $I = 100 \dots 1000 \text{ A}$ і $P_d = 0,01 \dots 1 \text{ МПа}$ згідно формули, В:

$$U_{k+a} = 5,33 \cdot I^{0,08} \cdot P_d^{0,04} \quad (3.4)$$

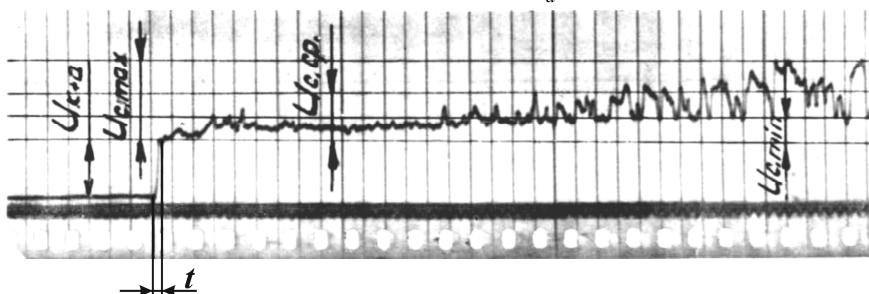


Рис. 3.8. Осцилограма напруги дуги U при зближенні електродів до короткого замикання

Електрод	Матеріал	Полярність	Робоча рідина
Заготовка	Сталь 45	-	Вода
Інструмент	МПГ-7	+	

$$U_{k+a} = 5,33 \cdot I^{0,08} \cdot P_d^{0,04}$$

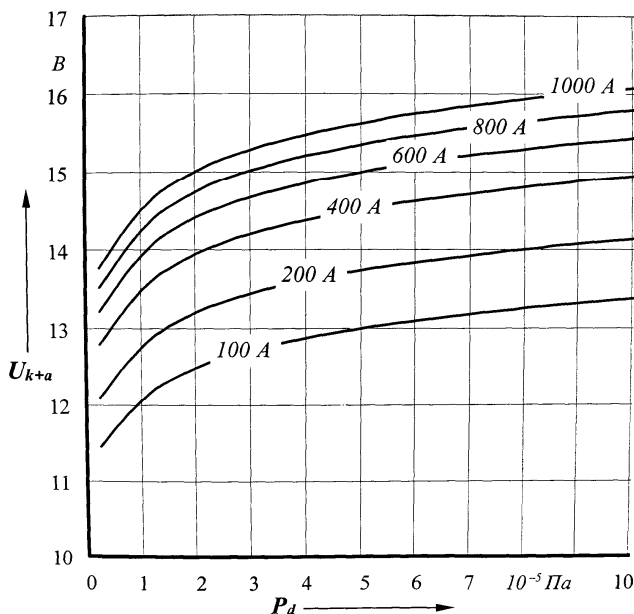


Рис. 3.9. Залежність сумарного значення U_{k+a} від P_d і I

В таблиці 3.1 приведено значення $U_{\kappa+a}$ для різних комбінацій матеріалів електродів для дуг в поперечному потоці водопровідної води і мастила "Індустріальне-12" при $P_d = 0,01...0,5$ МПа та $I = 100...1000$ А, а також для відкритих дуг в повітрі [125, с. 19]. Зазначимо, що в звичайних зварювальних дугах під водою при струмі $I = 100...400$ А і при використанні сталевих електродів $U_{\kappa+a} = 26...35$ В [125, с. 296], що помітно перевищує отриманні значення досліджених дуг.

Таблиця 3.1

Значення $U_{\kappa+a}$ для дуги в поперечному потоці рідини і відкритої дуги на повітрі

Електроди		$U_{\kappa+a}$ (В)		
Катод	Анод	Дуга в поперечному потоці		
		водопровідної води	масла «Індустріальне-12»	
Сталь 45	Сталь 45	13-15	18-20	17-19
Сталь 45	Графіт	14-16	19-21	17-19
Сталь 45	Мідь	12-13	12-14	17-19
Мідь	Сталь 45	14-15	14-15	-
Графіт	Сталь 45	14-16	14-16	-
Мідь	Графіт	14-16	18-20	-
Мідь	Мідь	12-14	13-15	19-22
Графіт	Графіт	20-22	20-22	12-14

Наведені дані свідчать про те, що в діапазоні зазначених режимів обробки в умовах РОД $U_{\kappa+a}$ для звичайних комбінацій матеріалів електродів змінюється в межах 12...21 В, наближується до значень $U_{\kappa+a}$ в умовах відомих способів ЕРО [132, с.15], і часто виявляється меншим, ніж в звичайних зварювальних дугах. Це цілком задовільно узгоджується з існуючою теорією приелектродних областей дуги, згідно якої "підвищення густини струму в приелектродних областях повинно привести до зниження приелектродних падінь напруги" [125, с. 312].

Для графітових електродів $U_{\kappa+a}$ в діапазоні зазначених режимів навпаки помітно зростає, що, проте, також не суперечить існуючим в цій області уявленням оскільки "в ряді випадків, коли електродом є матеріал, що важко випаровується (вольфрам, графіт), стиснення розряду може привести до зростання приелектродного падіння потенціалу" [125, с. 314].

Важливим геометричним параметром дуги є довжина (висота) катодної і анодної областей. Наявність осцилограм напруги дуги "сталий процес – коротке замикання" дозволяє установити сумарну

довжину катодної і анодної областей дуги. Дійсно, такі осцилограми дозволяють при відносному масштабі часу достатньо точно визначити час t переміщення електрода на ділянці сумарної довжини катодної і анодної областей дуги (рис. 3.8). З іншої сторони, осцилографування переміщень електрода дозволяє установити швидкість його руху на цій ділянці. Тому сумарна довжина катодної і анодної областей дуги може бути визначена як добуток швидкості руху електрода на час його руху на ділянці сумарної довжини катодної і анодної областей дуги.

Отримані таким чином розрахункові дані показали, що при горінні дуги в поперечному потоці рідини сумарна довжина катодної і анодної областей дуги в діапазоні досліджених режимів обробки ($I = 100 \dots 1000 \text{ А}$, $P_d = 0,01 \dots 1 \text{ МПа}$) для сталевих електродів складають $0,3 \dots 0,6 \text{ мм}$ проти $1,2 \dots 1,45 \text{ мм}$ для звичайних відкритих дуг в повітрі [125, с. 99, 122]. Якщо брати до уваги, що значення $U_{к+а}$ для дуг в поперечному потоці рідини і для звичайних відкритих дуг в повітрі відрізняється незначно (табл. 3.1), то можна зробити висновок, що напруженість електричного поля в катодній і анодній областях дуг, що горять в поперечному потоці рідини, приблизно в 2...3 рази і більше вища, аніж в звичайних відкритих дугах в повітрі, і зростає при збільшенні динамічного тиску потоку.

Отримані вище експериментально енергетичні характеристики дуги в поперечному потоці рідини дозволяють оцінити об'ємну густину теплової потужності катодного і анодного джерел тепла, а отже, як це зазначалось, можливість і якісну сторону процесу розмірної обробки металів при застосуванні такого джерела тепла. Дійсно, густина струму в дузі, що горить в поперечному потоці рідини, нами визначалась. Вона в 5...10 разів і більше перевищує густину струму відкритих дуг в повітрі і збільшується (зменшується) при збільшенні (зменшенні) динамічного тиску потоку. Напруженість електричного поля окремо в катодній і анодній областях дуги з відомих причин не визначалась. Проте було встановлено, що при горінні дуги в поперечному потоці рідини напруженість електричного поля в приелектродних областях в 2...3 і більше разів вища, ніж в відкритих дугах в повітрі, і збільшується (зменшується) при збільшенні (зменшенні) динамічного тиску потоку.

Це дозволяє зробити висновок, що при горінні дуги в поперечному потоці рідини в умовах РОД об'ємна густина теплової

потужності в катодному і анодному джерелах тепла значно вища (приблизно на порядок), ніж у відкритих дугах в повітрі і рідинах, і регулюється в широких межах за рахунок зміни динамічного тиску потоку; при цьому при збільшенні (зменшенні) динамічного тиску потоку об'ємна густина теплової потужності зазначених джерел тепла збільшується (зменшується). Тому така дуга незалежно від величини струму може бути використана для розмірної обробки металів в широкому діапазоні режимів, починаючи від грубого розмірного плавлення і аж до превалюючого тонкого випаровування металу.

Як показали багаточисленні досліді з дугами, що горять в поперечному потоці рідини в умовах РОД, напруга таких дуг, як і для відомих дуг, типу зварювальних, описується лінійним рівнянням виду:

$$U = a + b \cdot L, \quad (3.5)$$

де $a = U_{к+a}$, $b = E = \frac{U_c}{L}$.

Це дозволяє, зокрема, спростити методіку знаходження розподілу напруги по довжині дуги. Так, якщо відомі значення напруг двох дуг U_1 і U_2 при довжинах дуг L_1 і L_2 при $I = const$, то:

$$b = \frac{(U_2 - U_1)}{(L_2 - L_1)} \quad (3.6)$$

$$a = U_1 - b \cdot L_1 = U_2 - b \cdot L_2 \quad (3.7)$$

Зазначимо, що розподіл напруги по довжині дуги в поперечному потоці рідини в умовах РОД наближується, в відомих межах, до розподілу напруги по довжині зварювальних і плазмових дуг.

Технічні можливості дуги як джерела тепла для розмірної обробки металів визначаються, по-перше, її енергетичними характеристиками і можливостями їх регулювання, що визначає можливість і якісну сторону процесу обробки; по-друге, можливостями реалізації відповідних технологічних схем формоутворення; по-третє, можливостями керування потужністю, яка вводиться в зону обробки, що визначає продуктивність процесу.

Порівняємо за цими показниками електричну дугу в поперечному потоці рідини з нестационарними (іскровими, імпульсними) електричними розрядами, які реалізуються в умовах відомих способів ЕРО.

За своїми енергетичними характеристиками (густина струму, напруженість електричного поля, сумарне значення катодного і анодного падінь напруги), а також за своїм ефектом теплової дії на метал, зокрема, за зоною термічного впливу, дуга в поперечному потоці рідини, як це показано, наближується до нестационарного електричного розряду, який реалізується в умовах відомих способів ЕРО. Це означає, що стаціонарна електрична дуга в поперечному потоці рідини і нестационарний електричний розряд в умовах ЕРО як джерела тепла для розмірної обробки металів в відомих межах рівноцінні. Є, проте, і суттєві відміни, різні і технологічні можливості цих джерел тепла.

Дійсно, при горінні дуги в поперечному потоці рідини її енергетичні характеристики, наприклад, густина струму, визначаються динамічним тиском потоку і досить стабільні, принаймні можуть коливатись в досить вузьких межах і не опускаються нижче відповідного рівня, обумовленого динамічним тиском потоку, в той час, як енергетичні характеристики нестационарного електричного розряду, є, як відомо, функцією часу, змінюються в дуже широких межах, а в кінцевій стадії протікання розряду взагалі виявляються недостатніми для локального руйнування металу. Таким чином стаціонарна електрична дуга в поперечному потоці рідини, яка реалізується в умовах ЕРО, порівняно з нестационарним електричним розрядом має дуже важливу перевагу: вона забезпечує стабільні енергетичні характеристики, що як було показано, регулюються легко, плавно і в найширших межах за рахунок зміни динамічного тиску потоку. Це забезпечує кількісну та якісну сторону процесу обробки в широкому діапазоні режимів і, зокрема дає можливість реалізувати високопродуктивну обробку (десятки тисяч $\text{мм}^3/\text{хв}$) на великих струмах (сотні і тисячі ампер) при достатньо високій якості обробки і глибині зони термічного впливу в межах сотих часток міліметра або навіть при повній її відсутності. Зазначимо, що відомі способи ЕРО, які ґрунтуються на використанні нестационарних електричних розрядів, мають дуже значні обмеження по продуктивності [144, с. 35]. Забезпечуються при цьому і інші переваги, зокрема, майже вдвічі зменшується енергоємність процесу, в декілька разів знижується вартість джерел живлення електричним струмом.

Необхідність протікання рідини поміж електродами дещо

ускладнює реалізацію електричної дуги в поперечному потоці рідини, проте не настільки, щоб це створило принципові обмеження при здійсненні відповідних технологічних схем формування.

Не можна не торкнутись можливостей використання такої дуги для інших технологічних цілей і, перш за все, для таких, що супроводжують процес РОД в єдиному технологічному ланцюгу. Зокрема, така дуга може бути використана для поверхневого зміцнення металів [77, 103, 110, 113, 115], для отримання металевих порошків відповідного ступеню дисперсності [70, 80, 81, 122, 123], для плазмового різання металів [74], для підводного різання металів [89], для одержання металевих суспензій [99], для проведення хімічних реакцій, для отримання плазми високих енергетичних характеристик, і т. і.

3.1. Висновки

3.1.1. При горінні дуги в поперечному потоці рідини (і будь-якого іншого середовища-діелектрика) при збільшенні (зменшенні) динамічного тиску потоку геометричні розміри дуги (площа поперечного перерізу і довжина) зменшуються (збільшуються), а енергетичні характеристики дуги, які визначаються перш за все напруженістю електричного поля і густиною струму, зростають (зменшуються), що треба розглядати як результат саморегулювання геометричних і енергетичних характеристик дуги в функції динамічного тиску потоку рідини. При цьому енергетичні характеристики дуги регулюються легко, плавно і в широких межах, значно перевищують енергетичні характеристики відомих зварювальних і плазмових дуг і відповідають енергетичним характеристикам нестационарного електричного розряду, який реалізується в умовах відомих способів ЕРО. Це дозволяє використати таку дугу для розмірної обробки металів та розглядати її як якісно нове джерело тепла для науки і нових технологій.

3.1.2. За своїми енергетичними характеристиками, а також за своїм ефектом теплової дії на метал, зокрема, за глибиною зони термічного впливу, дуга в поперечному потоці рідини відповідає нестационарному електричному розряду, що реалізується в умовах відомих способів ЕРО, проте, порівняно з останнім має дуже важливу перевагу: вона забезпечує достатньо стабільні енергетичні характеристики, що легко регулюються, а отже забезпечує як

кількісну, так і якісну сторони процесу обробки в широкому діапазоні режимів, зокрема дає можливість реалізувати високопродуктивну обробку (десятки тисяч мм³/хв) на великих струмах (сотні і тисячі ампер) при високій якості обробки і зоні термічного впливу в межах сотих часток міліметра або навіть при повній її відсутності. Забезпечуються при цьому і інші переваги, зокрема, приблизно вдвічі зменшується енергоємність процесу, в декілька разів зменшується вартість джерел живлення електричним струмом.

3.1.3. Стаціонарна електрична дуга в поперечному потоці рідини (або іншого середовища-діелектрика) може бути також високоєфективно використана для нових технологічних цілей, таких як поверхневе зміцнення металів, отримання металевих порошків відповідного степеню дисперсності, плазмове різання металу, підводного різання металу, одержання металевих суспензій, проведення хімічних реакцій, одержання і утримання в стовпі дуги плазми високих енергетичних характеристик і т. і.

4. ФІЗИЧНИЙ МЕХАНІЗМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕРОЗІЇ В УМОВАХ РОД

Фізичний механізм електричної ерозії металів в умовах РОД (стаціонарною електричною дугою в поперечному потоці рідини) характеризується сукупністю взаємопов'язаних, швидкоплинних фізичних процесів, основними з яких є:

- Процеси виділення енергії в стовпі дуги і на електродах, які визначаються перш за все якісними характеристиками джерел тепла на електродах і в стовпі дуги.
- Процеси ерозії електродів, що можуть бути охарактеризовані динамікою подій в просторі і часі.
- Процеси евакуації продуктів ерозії, які повинні розглядатись в просторі і часі з врахуванням кількісних та якісних характеристик.

Опис фізичного механізму електричної ерозії в умовах РОД повинен базуватись на кількісних та якісних характеристиках зазначених процесів в їх сукупності, взаємозв'язку і взаємозалежності, повинен відображувати динаміку цих процесів в

просторі і часі, що дозволить, в кінцевому підсумку, отримати феноменологічну модель фізичного механізму електричної ерозії. З врахуванням зазначеного та на підставі аналізу і узагальнення отриманих експериментальних та теоретичних даних викладемо найбільш суттєві ознаки фізичного механізму електричної ерозії в умовах РОД [4, 5, 34].

4.1. Про якість джерел тепла на електродах і полярність електричної ерозії

Процеси виділення енергії в стовпі дуги та на електродах в умовах РОД нами вже розглядались (див. Розділ 2). Згідно викладеного дугу розглядають як суму трьох самостійно діючих джерел тепла на катоді, аноді і стовпі дуги. При цьому якісні характеристики (якість) джерела тепла на катоді визначають можливість і якісну сторону процесу ерозії (обробки) катода, а якісні характеристики (якість) джерел тепла на аноді – можливість і якісну сторону процесу ерозії (обробки) анода. Порівняльні кількісні та якісні оцінки джерел тепла на катоді і аноді, в свою чергу, дозволяють зробити висновки про полярність електричної ерозії, оскільки, як відомо, ефект електричної ерозії є полярним, тобто як кількісно так і якісно ерозія катода і анода відрізняються.

Зупинимось спочатку на існуючих уявленнях про якість джерел тепла окремо на катоді і окремо на аноді. Розглянемо деякі результати спроб ретельного аналізу енергетичних явищ на електродах, заснованого на існуючих класичних уявленнях про елементарні процеси в електричній дузі. На погляд Л. Леба [145], “надзвичайно високі концентрації енергії в катодній плямі і прилеглій до неї контрагованій плазмі роблять взагалі проблематичним для поверхні плями застосування таких понять, як робота виходу електронів, теплопровідність, температура, теплота випаровування, тиск і т. і.” І. Г. Кесаєв стверджує: “Складання балансу енергії для катода при сучасному рівні знань пов’язано зі значною невизначеністю при виборі величин, що входять до нього, внаслідок чого цей метод вирішення задачі є заздалегідь хибним” [146]. Треба

відразу ж зазначити, що “при вивченні електричних дуг явищам біля анода приділялось значно менше уваги, ніж явищам біля катода” [145], в зв’язку з чим складання балансу енергії для анода тим більш ускладнене.

Що ж до порівняльних характеристик джерел тепла на катоді і аноді, то для звичайних дуг типа зварювальних “анодна область, на погляд більшості дослідників, має більшу довжину (висоту) та об’єм, ніж катодна. Тому концентрація енергії в цій області звичайно менша, ніж на катоді, а кумулятивні процеси при її руйнуванні повинні в більшості випадків протікати більш мляво [145]”. Відомо також, що “анодна пляма має більшу тенденцію залишатись нерухомою, ніж катодна пляма” [142]. Крім того, якість джерел тепла на катоді і аноді значною мірою визначається теплофізичними константами матеріалу окремо на катоді і окремо на аноді. Так, наприклад, виявляється, що, на відміну від сталевих, тугоплавкі катода, наприклад з вольфраму, руйнуються значно менш інтенсивно, ніж аноди. І, нарешті, Р. Еккер зазначає [144] “...приелектродні області відлякують експериментаторів та теоретиків великою різноманітністю форм існування... Нестачі в кількості робіт нема, недостає тільки ясності та об’єктивності.”

Із викладеного можна зробити важливий, на наш погляд, висновок: скласти достовірний баланс енергії для катодної області і окремо для анодної області дуги, тобто дати кількісну і якісну характеристику джерел тепла окремо на аноді і окремо на катоді, використовуючи існуючі класичні уявлення про елементарні процеси в дузі, теперішнього часу неможливо. Тому для вивчення якості джерел тепла на електродах треба, принаймні зараз, використати інші засоби. Зокрема, якість джерел тепла на електродах може бути охарактеризована об’ємною густиною теплової потужності в катодному та анодному джерелах тепла [4], яка, в свою чергу, визначається густиною струму та напруженістю електричного поля відповідно в катодній та анодній областях дуги.

Густина струму в дузі, що горить в поперечному потоці рідини,

нами визначена. Вона в 5...10 і більше разів перевищує густину струму відкритих дуг і збільшується (зменшується) при збільшенні (зменшенні) динамічного тиску потоку. При цьому напруженість електричного поля в приелектродних областях, як зазначалось, в 2...3 рази вища, ніж у звичайних дугах в повітрі, і збільшується (зменшується) при збільшенні (зменшенні) динамічного тиску потоку. Це дозволяє зробити висновок, що при горінні дуги в поперечному потоці рідини об'ємна густина теплової потужності в катодному і анодному джерелах тепла значно вища (на порядок і більше), ніж у звичайних дугах в повітрі, і регулюється в широких межах за рахунок зміни динамічного тиску потоку; при цьому при збільшенні (зменшенні) динамічного тиску потоку об'ємна густина теплової потужності зазначених джерел тепла збільшується (зменшується). Тому така дуга, на відміну від звичайних дуг в повітрі, може бути використана для розмірної обробки металу.

Проте, в кінцевому підсумку, про придатність такої дуги для розмірної обробки металу можна судити лише за характером її теплової дії на електроди, зокрема по профілю лунок обробленої поверхні та по величині і структурі зон термічного впливу відповідно на катоді і аноді. Розглянемо з цією метою деякі характерні приклади.

На рис. 4.1 показано профілі одиничних лунок обробленої поверхні на катоді і аноді із сталі 45 при горінні дуги в поперечному потоці води при струмі $I = 400\text{A}$ і при різних динамічних тисках потоку P_d , а саме: а) $P_d = 0,1\text{МПа}$; б) $P_d = 0,4\text{МПа}$; в) $P_d = 1\text{МПа}$. Наведені профілі лунок показують, що площі поперечних перерізів “стружки” на катоді і аноді відрізняються незначно, причому при збільшенні P_d розміри “стружки” в горизонтальному напрямку зменшуються помітно, а в вертикальному напрямку – незначно. На рис. 4.2 для тих же умов показано зміну товщини зони термічного впливу H на катоді і аноді в функції динамічного тиску потоку P_d . Отримана залежність свідчить, що товщини зон термічного впливу на катоді і аноді приблизно однакові, помітно зменшуються при збільшенні P_d і при достатньо значних P_d практично відсутні.

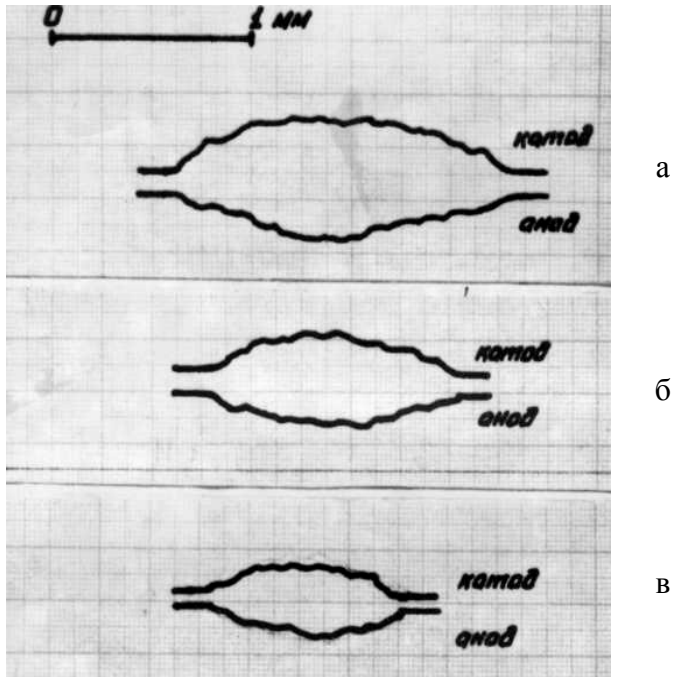


Рис. 4.1. Профілі одиничних лунок на катоді і аноді із сталі 45

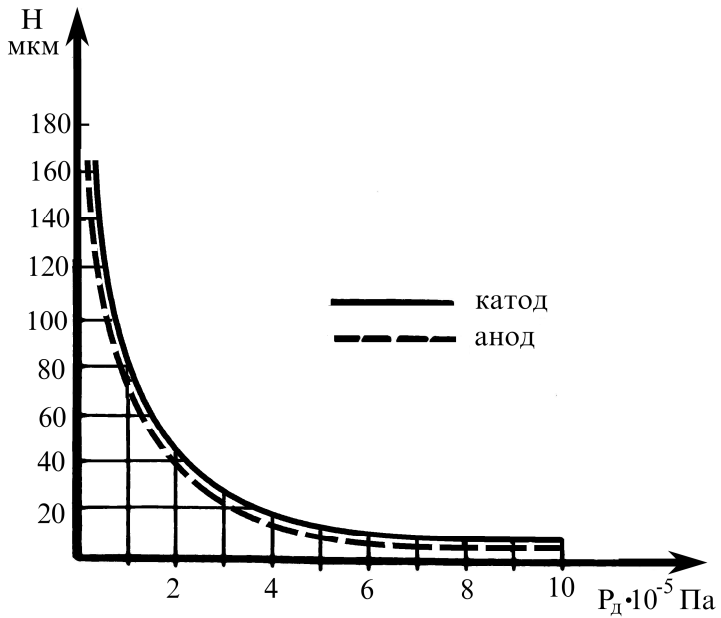
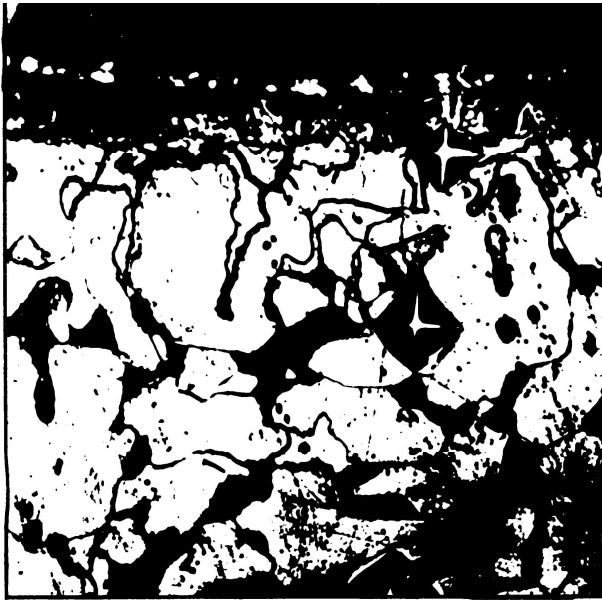
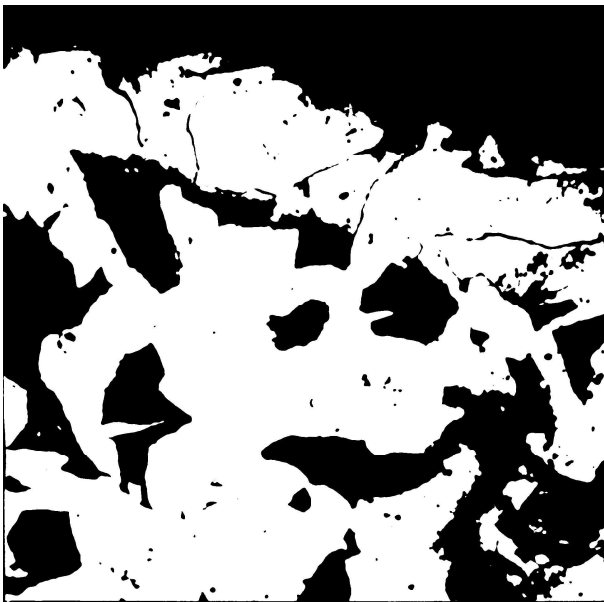


Рис. 4.2. Залежність товщини зони термічного впливу H на катоді і аноді із сталі 45 від P_d



а.



б.

Рис. 4.3. Мікροструктура зони термічного впливу на катоді (а.) і аноді (б.) із сталі 45 (x500)

Зазначимо, що по структурі зони термічного впливу на катоді і аноді можуть суттєво відрізнятися. На рис. 4.3 показано знімки мікроструктур зон термічного впливу на катоді і на аноді для вищенаведених умов обробки при $P_d = 0,4$ МПа. На знімках видно, що зона термічного впливу на аноді не тільки дещо менша, але також не має характерного для електроерозійної обробки поверхневого шару підвищеної твердості (оскільки зерна фериту виходять до периферії шліфу), що зокрема, полегшує подальшу механічну обробку.

В діапазоні досліджених режимів обробки отримані дані дозволяють достатньо достовірно судити про якість джерел тепла на електродах, а отже про полярність електричної ерозії та технологічні режими, яким треба надати перевагу. Так, оскільки ерозовані об'єми і товщина зони термічного впливу на катоді та аноді відрізняються незначно, можна зробити висновки, що якісні та кількісні характеристики катодного і анодного джерел тепла, в відомих межах, однакові. Зменшення товщини зони термічного впливу практично до нуля при відповідному збільшенні P_d дозволяє зробити висновок, що при горінні дуги в поперечному потоці рідини ерозія електродів може відбуватись в широкому діапазоні режимів, починаючи від розмірного плавлення і кінчаючи розмірним випаровуванням і досягається це відповідним регулюванням динамічного тиску потоку. При виборі полярності електродів та режимів обробки треба в цьому випадку враховувати конкретні технологічні задачі. Так, при необхідності подальшої механічної обробки, коли поверхневий шар підвищеної твердості небажаний, деталь повинна бути анодом (пряма полярність), а обробка повинна здійснюватись при відповідних P_d .

При використанні одного з електродів із сталі (ЕЗ) і другого електрода з графіту (ЕІ) якість джерела тепла на ЕЗ, а, відповідно, кількісна та якісна сторони процесу обробки визначаються значною мірою полярністю електродів. При цьому по площі катодного джерела тепла (якщо ЕЗ є катод) теплова потужність розподілена достатньо рівномірно, тоді як по площі анодного джерела тепла (якщо ЕЗ є анод) вона розподілена нерівномірно, з явно вираженим

максимумом в центрі, внаслідок чого шорсткість анода значно перевищує шорсткість катода. Це видно на рис. 4.1, де показано профілі лунок на катоді і аноді з сталі 45 при використанні ЕІ з графіту МПГ-7 при струмі $I = 400\text{А}$ і динамічному тиску потоку води $P_d = 0,1\text{МПа}$. Зазначимо, що при цьому анодне джерело тепла забезпечує значно більш високу продуктивність (приблизно в 1,5...1,8 рази), ніж катодне. Тому висновок для цього випадку може бути такий: якщо треба забезпечити високу якість обробки, то слід застосовувати зворотну полярність; для забезпечення більш високої продуктивності треба застосовувати пряму полярність.

Як зазначалось, якість джерел тепла на електродах значною мірою визначається теплофізичними константами матеріалу електродів. Зокрема, відомо, що на відміну від сталевих тугоплавкі катода, наприклад, із твердого сплаву, руйнуються значно менш інтенсивно, ніж аноди. Тому тверді сплави в умовах РОД обробляються тільки на прямій полярності.

Треба враховувати, що якість джерел тепла на електродах може визначатись і бути різною в зв'язку з різними гідродинамічними режимами руху рідини по висоті міжелектродного зазору. Це стосується перш за все ділянок, де відбувається зміна напрямку течії робочої рідини (рис. 4.4) [147]. Так, наприклад, при реалізації процесу поміж сталевими електродами одного діаметра при $P_d = 0,4\text{МПа}$ при відносному зсуві електродів – нехай навіть на десяті долі міліметра (рис. 4.5, *a*), спостерігається явно виражена нерівномірна ерозія електродів (рис. 4.5, *б*). Особливо це помітно на діаметрально протилежних ділянках. Такого не спостерігається, наприклад, при відсутності зсуву електродів або ж при звичайному прошиванні. Це означає, що визначальними в цьому випадку є різні гідродинамічні режими течії робочої рідини по висоті міжелектродного зазору, які обумовлюють різну якість джерел тепла на електродах, а отже різні кількісні та якісні характеристики процесу ерозії електродів. Отримує пояснення також факт інверсії електричної ерозії.

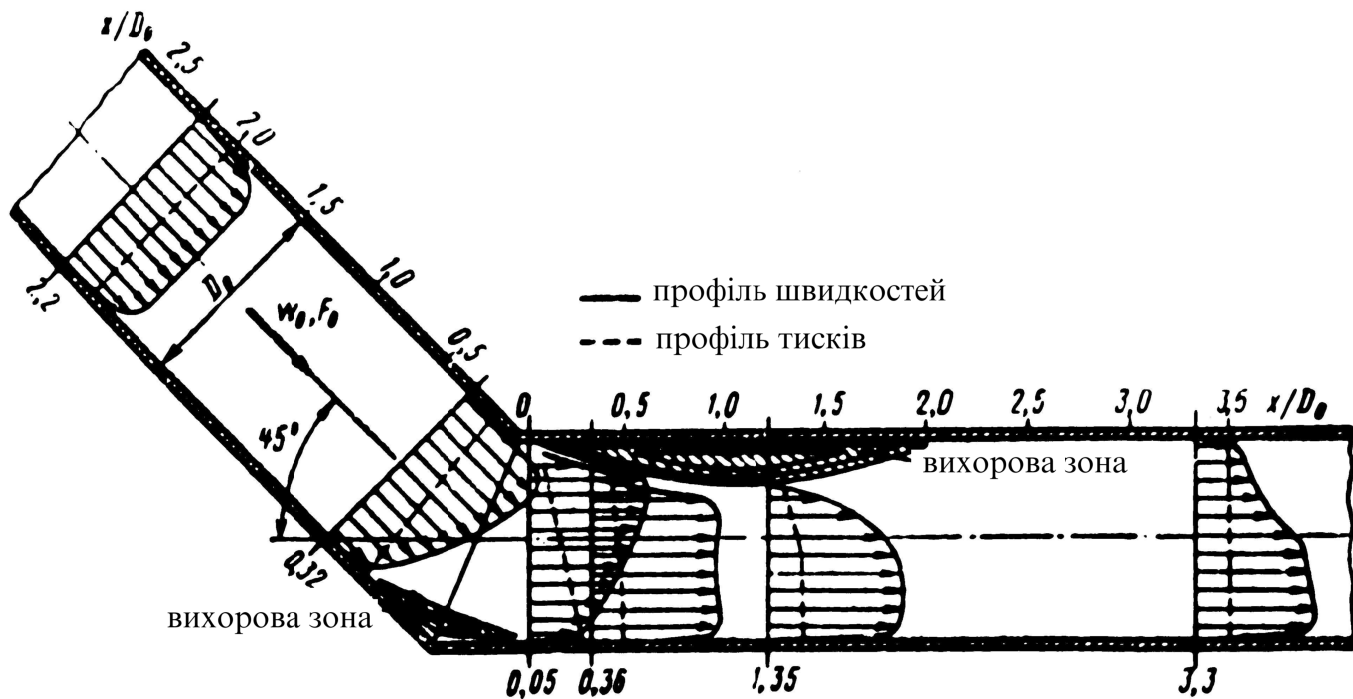
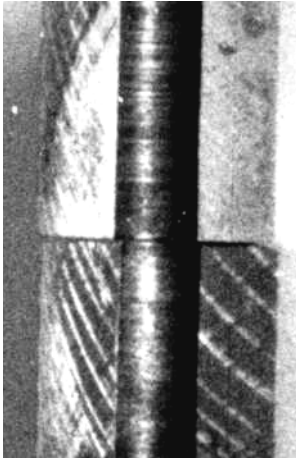
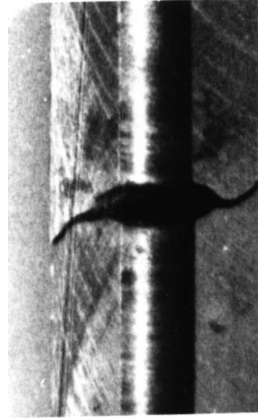


Рис. 4.4. Епюра швидкостей і тисків потоку рідини в вигнутих каналах



а)



б)

Рис. 4.5. Характер зносу електродів зі сталі при їх відносному зсуві

Визначимо згідно існуючих уявлень в області фізики теплових процесів деякі якісні характеристики джерел тепла на електродах в умовах РОД та їх відповідність експериментальним даним для електродів із заліза та сталей.

Теплоту заліза, яка витрачається на його нагрівання при переведенні від початкового стану (25°C) до кінцевого (температура кипіння), коли метал знаходиться в газоподібному стані знаходимо за виразом:

$$\begin{aligned}
 Q = & \int_{298\text{K}}^{1033\text{K}} C_{p,\alpha}(T)dT + L_{\alpha\rightarrow\beta} + \int_{1033\text{K}}^{1184\text{K}} C_{p,\beta}(T)dT + L_{\beta\rightarrow\gamma} + \int_{1184\text{K}}^{1674\text{K}} C_{p,\gamma}(T)dT + L_{\gamma\rightarrow\delta} \\
 & + \int_{1674\text{K}}^{1812\text{K}} C_{p,\delta}(T)dT + L_{nl} + \int_{1812\text{K}}^{3343\text{K}} C_{p,p}(T)dT + L_g \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

де $C_{p,\alpha}$, $C_{p,\beta}$, $C_{p,\gamma}$, $C_{p,\delta}$, $C_{p,p}$ – теплоємності, відповідно, твердого заліза у модифікаціях α , β , γ і δ та рідкого заліза; $L_{\alpha\rightarrow\beta}$, $L_{\beta\rightarrow\gamma}$, $L_{\gamma\rightarrow\delta}$ – теплота відповідних фазових перетворень; L_{nl} , L_g – теплота плавлення і випаровування.

Залежність теплоємності від температури характеризується рівнянням [148, с. 228]:

$$C_p = a + v \cdot 10^{-3}T + C \cdot 10^5 T^{-2} \quad (4.2)$$

Значення коефіцієнтів a , v і c , а також теплота фазових перетворень для заліза наведені у таблиці 4.1 [148, с. 228].

Таблиця 4.1

Коефіцієнт температурної залежності теплоємності ($\text{Дж/г}\cdot\text{ат}\cdot\text{К}$) та теплоти фазових перетворень заліза ($\text{Дж/г}\cdot\text{ат}$)

Модифікація заліза	$T_{i,n} - T_{i,k}$	a_i	v_i	C_i	L_i
α	298...1033	4,18	5,92	0	2760
β	1033...1184	9,0	0	0	920
γ	1184...1674	1,84	4,66	0	880
δ	1674...1812	10,5	0	0	15490
<i>рідке</i>	1812...3343	10,0	0	0	374300

Після підстановки (4.2) в (4.1) та інтегрування отримуємо:

$$Q = \sum_{i=1}^5 \left\{ (T_{i,k} - T_{i,n}) \cdot [a_i + 0,5 \cdot v_i \cdot 10^{-3} \times (T_{i,n} + T_{i,k}) + C_i \cdot 10^5 / (T_{i,n} \cdot T_{i,k})] + L_i \right\} \quad (4.3)$$

де i – номер температурної ділянки; $T_{i,n}$ та $T_{i,k}$ – початкова і кінцева температури на i -тій ділянці.

Результати розрахунку за формулою (4.3) при використанні даних табл. 4.1 наведені у табл. 4.2 та на рис. 4.6.

Таблиця 4.2

Залежність тепловмісту заліза від температури

T, K	298	500	700	900	1033	1033	1184	1184
$Q, \text{Дж/г}\cdot\text{ат}$	0	1322	2868	4651	5968	8728	10087	11007

T, K	1400	1674	1674	1812	1812	2000	2200
$Q, \text{Дж/г}\cdot\text{ат}$	12705	15172	16052	17500	32991	34871	36871

T, K	2400	2600	2800	3000	3200	3343	3343
$Q, \text{Дж/г}\cdot\text{ат}$	38871	40871	42871	44871	46871	48301	422600

При РОД, як зазначалось, електрична ерозія незалежно від струму відбувається в широкому діапазоні режимів, починаючи від розмірного плавлення і аж до тонкого розмірного випаровування. Тому джерела тепла на електродах за таких умов можуть бути охарактеризовані діапазонами температур $T = 1812 \dots 3343 \text{ K}$ і теплоти $Q = 32991 \dots 422600 \text{ Дж/г}\cdot\text{ат}$ (див. рис. 4.6) відповідно при динамічних тисках потоку робочої рідини в межах $P_d = 0,01 \dots 0,5 \text{ МПа}$ (див. рис. 4.2). Це дозволяє, зокрема, оцінити питомі витрати електроенергії та продуктивність процесу, які відповідають експериментальним даним, а також використати отримані дані як вихідні для визначення функції температурного поля в зоні дії зазначених джерел тепла, що, в свою чергу, дозволяє оцінити величину зони термічного впливу при РОД.

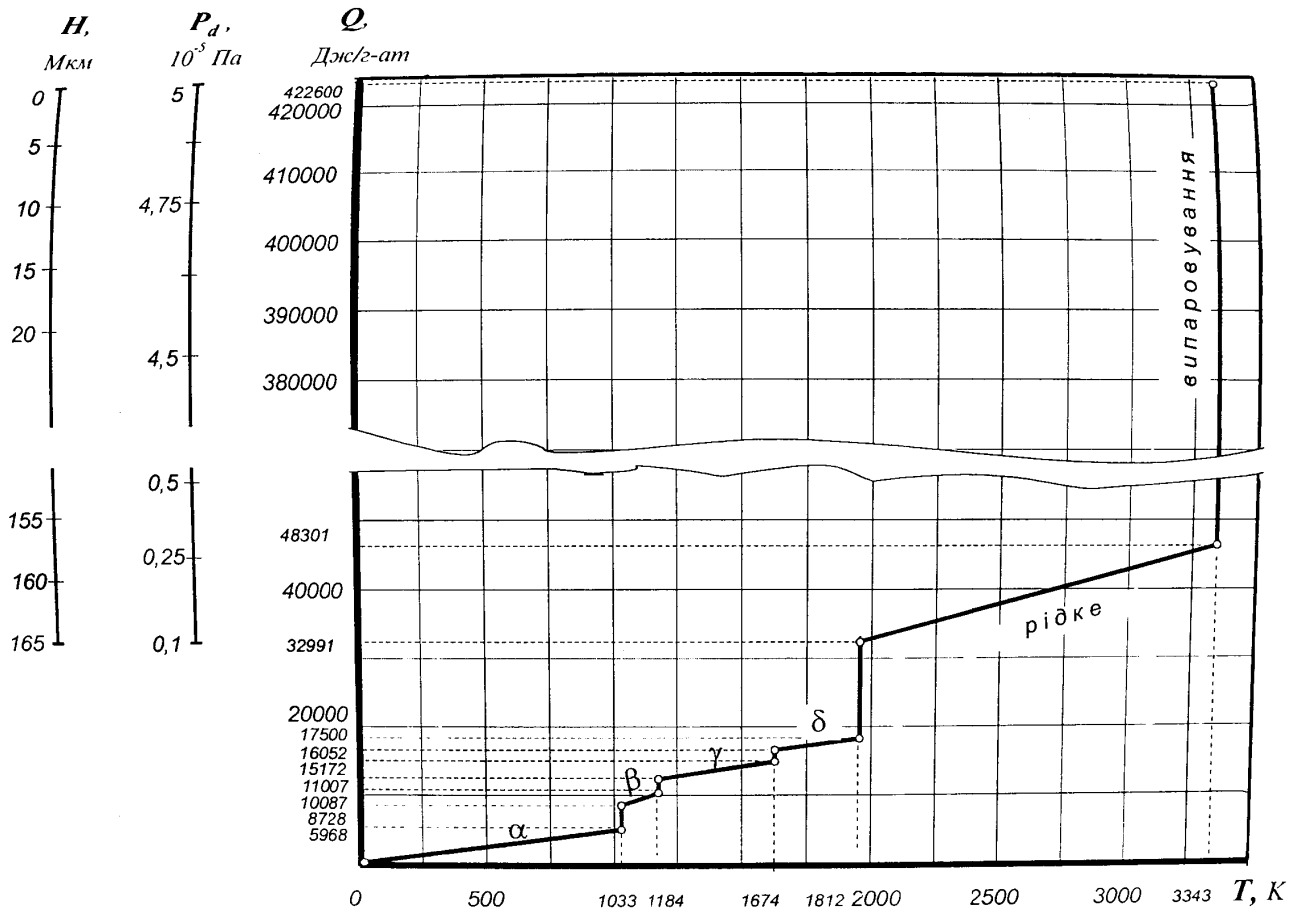


Рис. 4.6. Якісні характеристики джерел тепла на сталевих електродах

За умови електричної ерозії розмірним плавленням за деяких припущень одержуємо умови класичної задачі на нестационарну теплопровідність крізь плоску напівнескінченну стінку при граничних умовах першого роду (рис. 4.7).

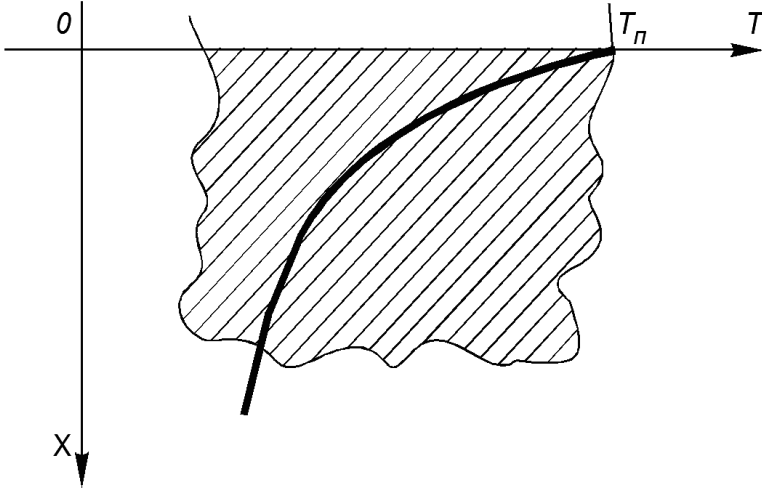


Рис. 4.7. Температурне поле в зоні дії джерела тепла
Математичне формулювання задачі:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, & 0 \leq x < \infty; \\ T(0, \tau) = T_n; \\ T(x, 0) = T_o, & 0 < x < \infty \end{cases} \quad (4.4)$$

де T_n і T_o – температура поверхні і початкова температура;
 $a = 6,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – коефіцієнт температуропровідності [149].

Розв’язок задачі (4.4) є відомим [149]:

$$\Theta = \frac{T_n - T}{T_n - T_o} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{U=0}^U e^{-U^2} dU \quad (4.5)$$

де U – комплексна безрозмірна змінна, яка визначається заданими значеннями параметрів x і τ

$$U = x / (2\sqrt{a \cdot \tau}) \quad (4.6)$$

Визначимо за допомогою рівнянь (4.5) і (4.6) глибину зони термічного впливу згідно зазначених умов при $\tau = 0,005\text{с}$ (див. рис. 4.12) при $T_n = T_{nl} = 1812\text{К}$, $T_o = 303\text{К}$, і $T = 1073\text{К}$. При цьому

$\Theta = 0,4762$; $U = 0,451$ [150, с. 517]. В підсумку отримуємо:

$$x = U \cdot 2\sqrt{a \cdot \tau} = 1,65 \cdot 10^{-4}$$

Одержане значення x відповідає експериментальному (див. рис. 4.2) при динамічному тиску потоку рідини в зоні обробки $P_d = 10^4$ Па та дозволяє приблизно визначити глибину зони термічного впливу H згідно зазначених умов при динамічному тиску потоку в межах $P_d = 0,01 \dots 0,5$ МПа (див. рис. 4.6).

4.2. Динаміка процесу електричної ерозії

За візуальними оцінками інтегральний ерозійний ефект при РОД і при традиційних способах електроерозійної обробки в відомих межах є аналогічним. Можна помітити, зокрема, що оброблена поверхня являє собою сукупність великої кількості лунок (рис. 4.8, 4.9). Це свідчить про дискретний характер руйнування металу і про те, що інтегральний ерозійний ефект створюється сукупністю елементарних ерозійних актів, які відбуваються послідовно один за одним. Є, проте, і відміни: при РОД лунки, частіше, розташовані в певній послідовності і утворюють сліди від розряду, звичайно, в напрямку течії рідини, що свідчить про те, що мають місце закономірності в переміщенні розряду по поверхні електродів; при цьому сліди часто перериваються в одному місці і поновлюються в іншому, що свідчить про дію вибіркового механізму процесу ерозії. Тому вимагають пояснення, по-перше, факт дискретного руйнування металу при наявності постійно діючих джерел тепла на електродах (оскільки реалізується постійно протікаючий електричний розряд), по-друге, причини і закономірності переміщення розряду по поверхні електродів, і, по-третє, вибіркового механізму процесу ерозії.

Щоб пояснити це, розглянемо динаміку елементарного ерозійного акту. Очевидно, що кожному елементарному ерозійному акту повинна відповідати своя характерна елементарна ділянка на осцилограмі струму і напруги (рис. 4.11), а частота повторення елементарних ерозійних актів повинна відповідати частоті повторення характерних елементарних ділянок осцилограми.



Рис. 4.8. Сліди на поверхні, яка отримана РОД



Рис. 4.9. Профіль обробленої поверхні поперек (а) і вздовж (б) слідів

Щоб пояснити це, розглянемо динаміку елементарного ерозійного акту. Очевидно, що кожному елементарному ерозійному акту повинна відповідати своя характерна елементарна ділянка на осцилограмі струму і напруги (рис. 4.10), а частота повторення елементарних ерозійних актів повинна відповідати частоті повторення характерних елементарних ділянок осцилограм.

Визначимо на осцилограмі характерну елементарну ділянку. Це може бути, наприклад, ділянка тривалістю T (див. рис. 4.10). Вона характеризується (рис. 4.11) зростанням напруги від U_{min} до U_{max} за час T_1 (передній фронт) і спадом напруги від U_{max} до U_{min} за час T_2 (задній фронт). Струм же, навпаки, на ділянці T_1 зменшується відповідно від I_{max} до I_{min} , а на ділянці T_2 збільшується від I_{min} до I_{max} , що можна пояснити використанням джерел живлення технологічним струмом із зовнішньою падаючою характеристикою.

Отже, за час елементарного ерозійного акту напруга дуги спочатку зростає на величину ΔU_1 , а потім знижується на величину ΔU_2 . Розглянемо фізичну природу цього явища.

При горінні дуги в зв'язку з плавленням та випаровуванням матеріалу електродів в зоні дії катодного і анодного джерел тепла міжелектродний зазор, а, відповідно, і довжина дуги збільшуються, а в стовп дуги з електродів в великій кількості надходять частки малих енергій, чим, власне, і пояснюється збільшення напруги дуги від U_{min} до U_{max} за час T_1 .

На рис. 4.12 показано кадри швидкісної кінозйомки (4000 кадр/с) стаціонарної електричної дуги в поперечному потоці води при динамічному тиску $P_d = 0,3 \text{ МПа}$ і струмі $I = 300 \text{ А}$ поміж мідним анодом (згори) і графітовим катодом (збільшення дуги $\times 20$; збільшення електродів з розташованою поміж ними дугою $\times 2$), що дозволяє пояснити механізм переміщення дуги на ближню ділянку та факт зміни електричних параметрів розряду, що спостерігається при цьому.

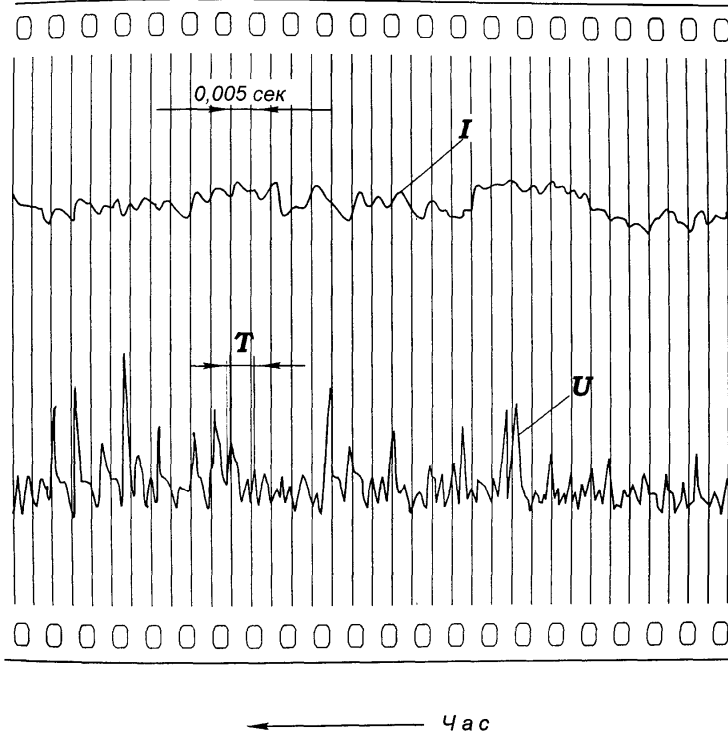


Рис. 4.10. Осцилограма струму I і напруги U дуги

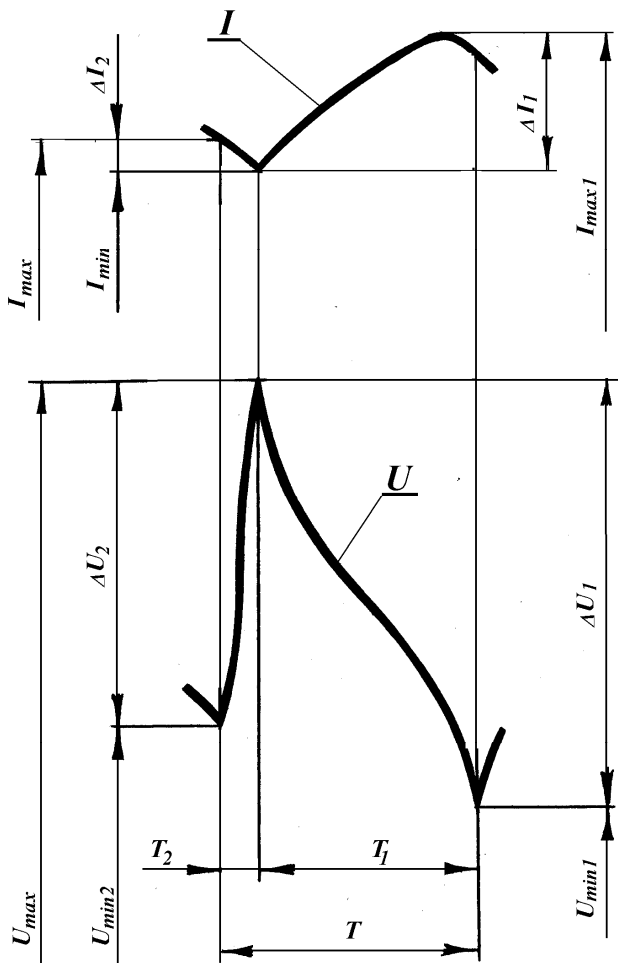


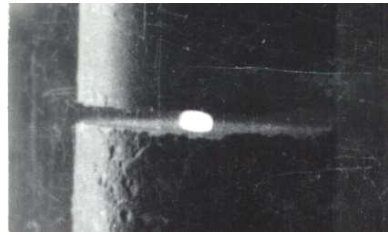
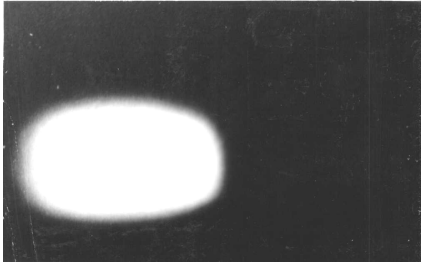
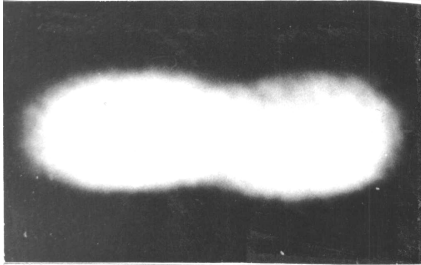
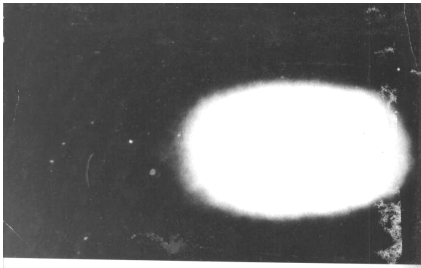
Рис. 4.11. Елементарна ділянка осцилограми струму I і напруги U дуги

Кадр перший: горить одна дуга при U_{max} .

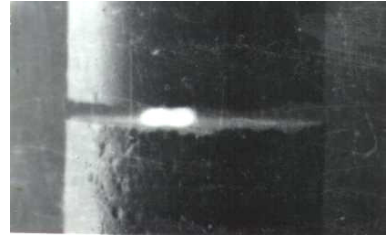
Кадр другий: продовжує горіти попередня (перша) дуга, а на ближній ділянці запалюється нова (друга) дуга, що відповідає зниженню U_{max} .

Кадр третій: гасне перша дуга і горить тільки друга дуга, що відповідає падінню напруги до U_{min} .

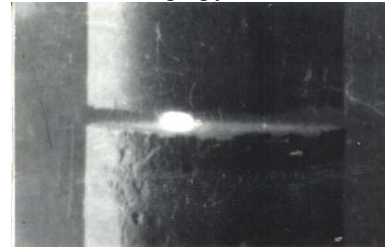
Як бачимо, при переміщенні дуги на нову ділянку, існують, власне, дві дуги: попередня (перша) і нова (друга), яка шунтує першу, що обумовлює зменшення електричного опору в ланцюгу струму. Як наслідок, напруга в ланцюгу струму зменшується. Тільки після цього перша дуга гасне, а друга продовжує існувати.



кадр перший



кадр другий



Кадр третій

Рис. 4.12. Кадри швидкісної кінозйомки дуги при переміщенні її на ближню ділянку. Елементарний ерозійний акт завершився. Надалі буде новий елементарний ерозійний акт, хоча і в дещо іншій якості, оскільки внаслідок ряду причин всі його характерні параметри (U_{max} , U_{min1} , U_{min2} , ΔU_1 , ΔU_2 , I_{max1}) будуть відрізнятись від параметрів попереднього акту. Відзначимо, що найчастіше дуга рухається в напрямку течії робочої рідини (тобто в напрямку найменшого опору).

Слід зазначити, що розглянутий механізм переміщення дуги на найближчу ділянку не є єдиноможливим. На рис. 4.13 приведено типові кадри швидкісної кінозйомки (4000кадр/с) дуги в поперечному потоці води (збільшення дуги $\times 20$; збільшення електродів з розташованою поміж ними дугою $\times 2$), які підтверджують, що нова дуга може загорітись на деякій відстані від раніше існуючої. Кадр перший: горить одна дуга (перша). Кадр другий: горить перша дуга і на деякій відстані від неї запалюється друга. Кадр третій: гасне перша дуга і горить тільки друга дуга. Тобто, як і в попередньому випадку, коли дуга запалюється на ближній ділянці, в даному випадку в

перехідний період, коли розряд виникає на новому місці, існують одночасно дві дуги і, отже, механізм шунтування дуг залишається тим же. Більше того, в цей момент можливе існування навіть декількох дуг (рис. 4.14).

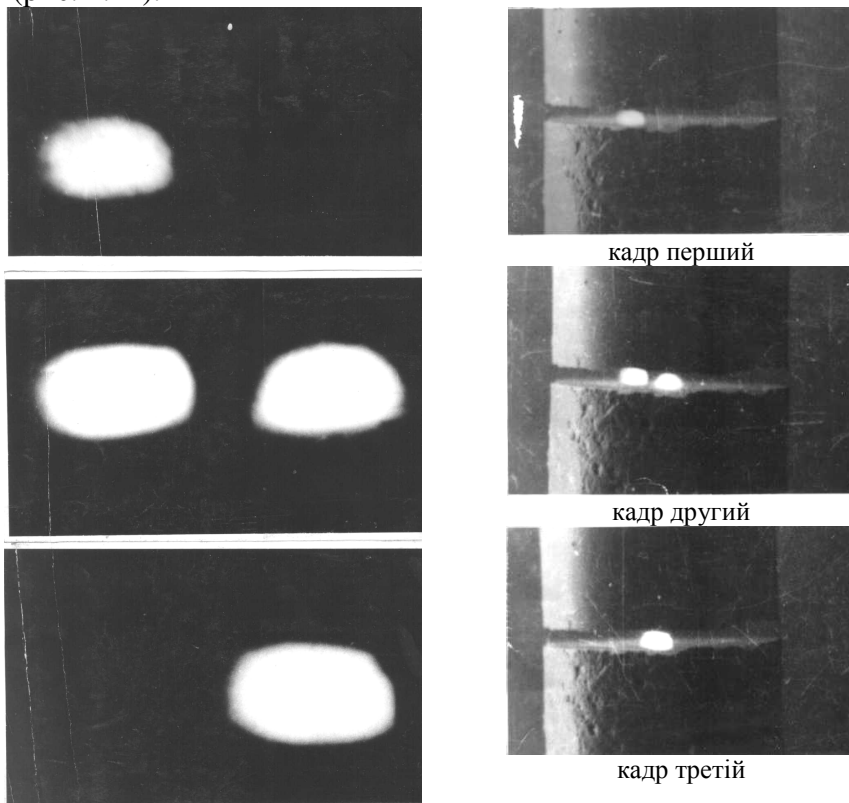


Рис. 4.13. Кадри швидкісної кінозйомки дуги при переміщенні її на віддалену ділянку

Описаний процес, таким чином, характеризується безперервним підведенням енергії в зону обробки, безперервним горінням дуги і безперервним існуванням джерел тепла на електродах. Отже, безперервною є теплова дія розряду на електроди і безперервно проходить процес ерозії. Проте це не свідчить про безперервне руйнування металу з однаковою інтенсивністю, оскільки, згідно викладеного, фізична природа існування безперервно протікаючої (стаціонарної) електричної дуги передбачає дискретний характер її переміщення по поверхні електродів (дуга після деякого стояння на місці переміщується на іншу ділянку), а, отже, і дискретний характер процесу ерозії, що є, власне, безумовною властивістю дуги.

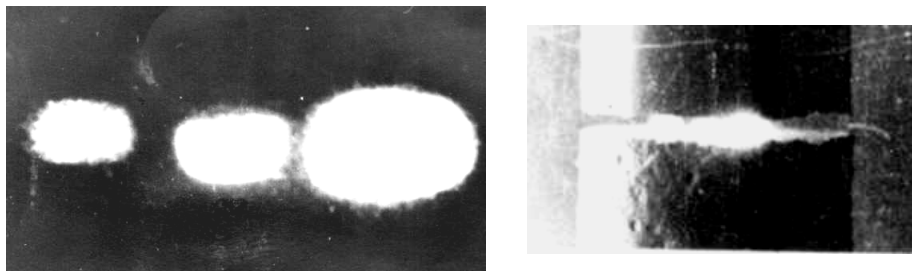


Рис. 4.14. Кадри швидкісної кінозйомки, що показують можливість існування декількох дуг одночасно

Важливими характеристиками процесу є частота повторення елементарних ерозійних актів і швидкість переміщення розряду по поверхні електродів. Ці характеристики є функцією струму, динамічного тиску потоку, складу робочої рідини, матеріалу і полярності електродів і в самому загальному випадку помітно збільшуються при збільшенні динамічного тиску потоку рідини.

Частота повторення елементарних ерозійних актів може бути легко визначена по осцилограмах і в діапазоні досліджених режимів обробки ($P_d < 1 \text{ МПа}$) складає декілька сотень герц. Швидкість переміщення розряду по поверхні електродів може бути визначена по даних швидкісної кінозйомки, а також на підставі співставлення довжини слідogram і відповідних ділянок осцилограм (при наявності відміток часу). Середня швидкість переміщення розряду можна визначити по формулі:

$$\omega = \frac{V_k}{f_k \cdot t} = \frac{V_a}{f_a \cdot t} \quad (4.7)$$

де V_k і V_a – ерозовані об'єми відповідно катода і анода; f_k і f_a – середня площа поперечного перерізу “стружки” відповідно на катоді і аноді; визначається на підставі аналізу слідogram; t – тривалість процесу ерозії.

Швидкість переміщення розряду в діапазоні досліджених режимів обробки складає декілька дециметрів в секунду, що приблизно на порядок менше швидкості течії рідини.

4.3. Процеси евакуації продуктів ерозії

Перш за все зазначимо, що фізичний механізм евакуації продуктів ерозії в умовах процесу РОД і при відомих способах ЕРО в відомих межах є аналогічним, але значно більш інтенсивним, що обумовлено значно більш високими швидкостями робочої рідини. Зокрема, треба розрізняти два етапи евакуації продуктів ерозії: із лунки та із міжелектродного зазору. Видалення металу із лунки відбувається головним чином при протіканні розряду. Метал із лунки в залежності від режимів обробки може видалятися як в рідкому, так і газоподібному стані. Видалені частки металу мають звичайно сферичну форму (рис. 4.15).

При збільшенні струму обробки зростає загальна кількість часток, а крива розподілу зміщується в сторону більших діаметрів. Останнє, зокрема, підтверджується рис. 4.16. При збільшенні динамічного тиску потоку, що відповідає реалізації більш високих енергетичних характеристик розряду, все більша маса металу видаляється в більш диспергованому стані (за рахунок випаровування). Це підтверджує рис. 4.17.

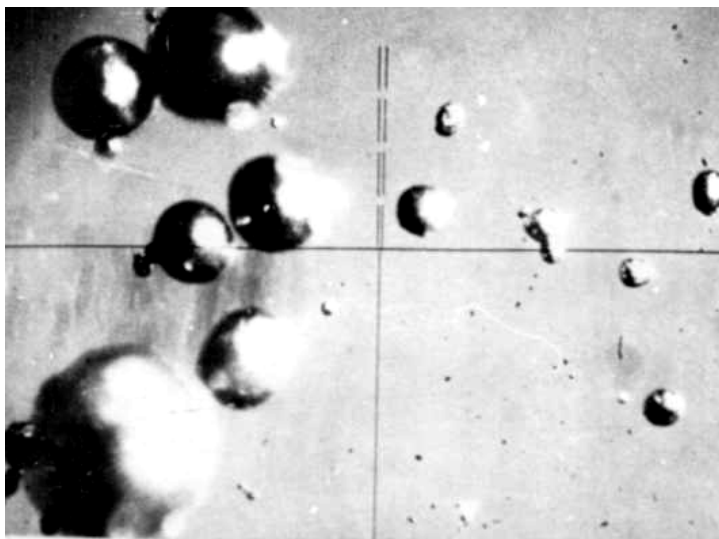


Рис. 4.15. Продукти ерозії

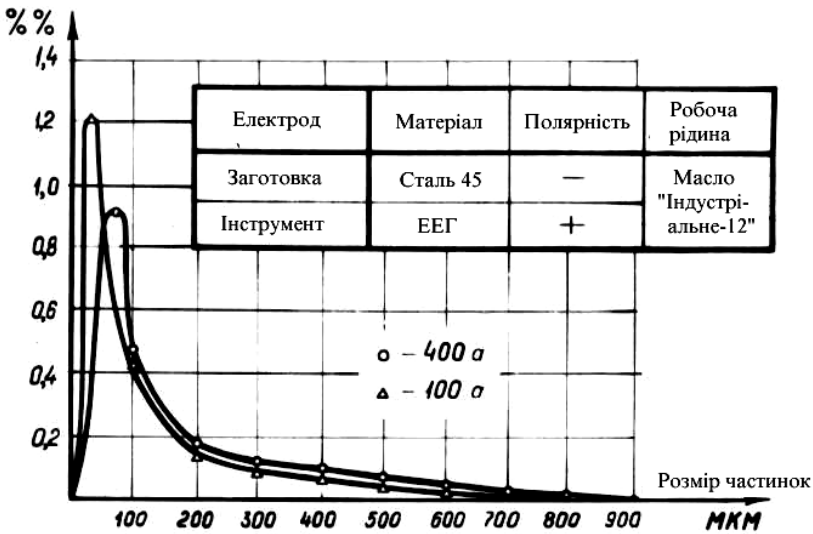


Рис. 4.16. Фракційний склад шламу

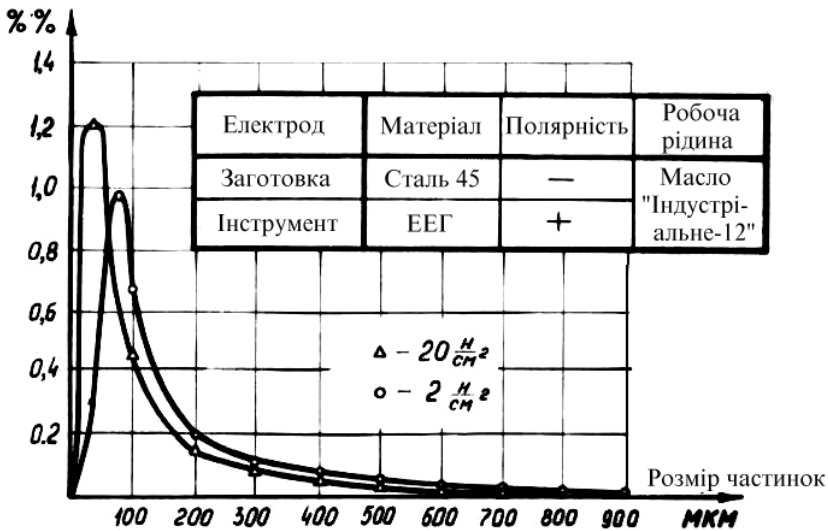


Рис. 4.17. Фракційний склад шламу

В умовах РОД дуга горить в потужному поперечному потоці рідини. Тому візуально майже не спостерігається виникнення і розширення газової порожнини навколо дуги, хоча очевидно, що поміж стовпом дуги і протікаючим потоком рідини завжди існує достатньо тонкий проміжний шар газу, що безперервно поновлюється і який є продуктом розкладу робочої рідини. Це підтверджується достатньо інтенсивним газовиділенням, причому останнє виявляє себе тим більше, чим менше потужність потоку робочої рідини. В

результаті теплової дії розряду робоча рідина (наприклад, масло) розкладається з утворенням рідких і твердих складових.

Таким чином, в процесі обробки в міжелектродну порожнину надходять частки матеріалу електродів та газоподібні, рідкі і тверді продукти розкладу робочої рідини. Тому міжелектродна порожнина повинна бути достатніх розмірів з тим, щоб продукти ерозії, які знаходяться в ній, не підлягали повторному диспергуванню, що могло б понизити продуктивність процесу, та щоб не створювались умови для коротких замикань, що привело б до несталості процесу. Це досягається вибором таких режимів обробки, при яких частки, що видаляються мають значно менші розміри, ніж міжелектродний зазор. В кінцевому підсумку, ця умова досягається відповідними значеннями напруги дуги і динамічного тиску робочої рідини, які в умовах РОД є доволі значними.

Із міжелектродної порожнини продукти ерозії легко видаляються потужним потоком робочої рідини. Видаленню продуктів ерозії як із лунки, так і з міжелектродної порожнини сприяють механічні ударні хвилі в рідині, які виявляють себе при зміні геометричних і енергетичних параметрів розряду і які є результатом механічної взаємодії розряду з рідиною.

Певний науковий і практичний інтерес являє дослідження швидкості охолодження продуктів ерозії (порошків), що дозволяє, хай опосередковано, судити, наприклад, про процеси, які проходять в зоні термічного впливу, і, до того ж, дає деяку інформацію для розуміння фізичного механізму процесу в цілому. Виконані рентгенографічним методом дослідження [32] з використанням відповідних методик [151, 136, 152, 153, 154] показали, що охолодження таких порошоків відбувається зі швидкістю $10^4 \dots 10^6$ град/сек. Таку швидкість охолодження порошоків необхідно розглядати як важливий технологічний фактор, який дозволяє отримати метастабільні стани, що забезпечують якісно нові властивості порівняно з вихідним металом електродів.

На рис. 4.18 показано, відповідно, мікроструктура литого сплаву $Al-9,2\%Mn$ (а) і мікроструктура порошку того ж сплаву (б). Порівняно з вихідною, структура отриманого порошку має суттєві відміни, зокрема, первинні включення інтерметалевого стану в порошках мають високу дисперсність і рівномірно розподілені. Тобто, отримані порошки повинні мати якісно нові властивості. І дійсно, такі

порошки мають підвищені механічні і в більшості випадків, підвищені жароміцні властивості. Тому надалі можна передбачити широке практичне застосування таких порошків.

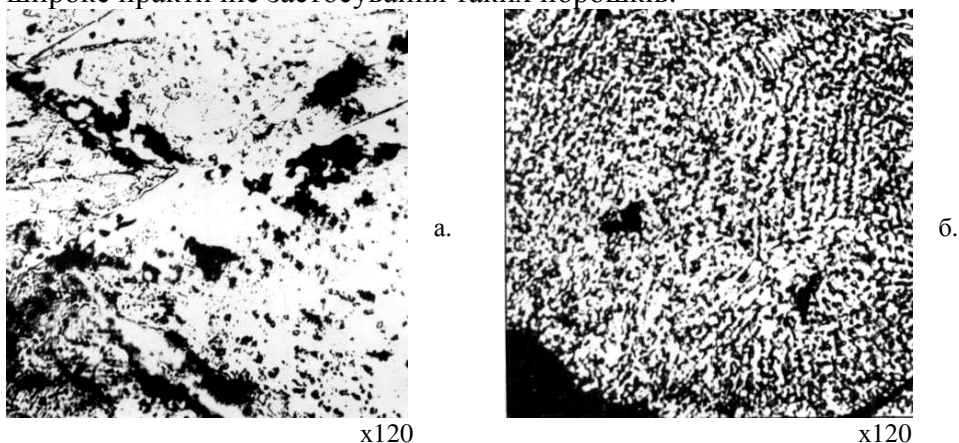


Рис. 4.18. Мікроструктура сплаву Al-9,2 % Mn:
а) зразок-заготовка; б) порошок

4.4. Феноменологічна модель фізичного механізму електричної ерозії в умовах РОД

На основі аналізу і узагальнень отриманих експериментальних і теоретичних даних викладено найбільш суттєві ознаки фізичного механізму процесу в їх сукупності, взаємозв'язку і взаємозалежності і тим самим опишемо з точки зору простої суті феноменологічну модель фізичного механізму електричної ерозії в умовах РОД.

Згідно діючих уявлень, електричну дугу треба розглядати як суму трьох самостійно діючих джерел тепла в катодній області, анодній області і стовпі дуги. При цьому катодне джерело тепла розташовано в плоскому шару на поверхні катода, анодне джерело тепла – в плоскому шару на поверхні анода, а стовп дуги є об'ємним джерелом тепла. Катодне джерело тепла здійснює ерозію катода, анодне джерело тепла здійснює ерозію анода, стовп дуги на ерозію електродів помітно не впливає, проте визначає енергетичні процеси, а отже, якісні характеристики джерел тепла на електродах.

Можливість і якісна сторона процесу РОД визначаються, таким чином, якісними характеристиками (якістю) джерел тепла на електродах, зокрема, об'ємною густиною теплової потужності, яка, в свою чергу, визначається густиною струму і напруженістю електричного поля відповідно на ділянках катодного і анодного

джерел тепла. Порівняльні кількісні та якісні характеристики джерел тепла на катоді і аноді, в свою чергу, дозволяють судити про полярність електричної ерозії, якій треба надати перевагу.

При протіканні стаціонарної електричної дуги в поперечному потоці рідини регулювання енергетичних характеристик катодного і анодного джерел тепла (густини струму, напруженості електричного поля, об'ємної густини теплової потужності) здійснюється в широких межах за рахунок регулювання динамічного тиску потоку, причому при збільшенні (зменшенні) динамічного тиску потоку енергетичні характеристики катодного і анодного джерел тепла зростають (зменшуються). В зв'язку з цим є можливість легко (за рахунок регулювання швидкості потоку робочої рідини) керувати якістю джерел тепла на електродах, а отже і якістю процесу ерозії, здійснюючи обробку незалежно від струму в широкому діапазоні режимів, починаючи від грубого розмірного плавлення і закінчуючи превалюючим тонким розмірним випаровуванням.

За візуальними оцінками, оброблена РОД поверхня являє собою сукупність великого числа лунок, що підтверджує дискретний характер руйнування металу, а також те, що інтегральний ерозійний ефект створюється сукупністю слідуєчих один за одним елементарних ерозійних актів. Лунки частіше розташовуються в певній послідовності і утворюють сліди від розряду, звичайно в напрямку протікання рідини, що свідчить про закономірності переміщення розряду по поверхні електродів. Оскільки сліди часто перериваються в одному місці і з'являються в іншому, можна казати про дію вибіркового механізму процесу ерозії.

В зв'язку з цим вимагають пояснення, по-перше, факт дискретного руйнування металу при наявності постійно діючих джерел тепла на електродах (оскільки реалізується безперервно протікаючий стаціонарний електричний розряд), по-друге, причини і закономірності переміщення розряду по поверхні електродів і, по-третє, вибіркового механізму процесу ерозії. Розглянемо для цього протікання елементарного ерозійного акту.

При протіканні розряду в зв'язку з плавленням і випаровуванням матеріалу електродів в зоні дії катодного і анодного джерел тепла міжелектродний зазор, а отже і довжина дуги збільшується, а в стовп дуги з електродів в великій кількості надходять частки малих енергій, що призводить до підвищення

напруги на дузі. Дуга, як відомо, являє собою саморегулюючу систему. Згідно принципу мінімуму Штеенбека, в результаті процесів саморегулювання із всіх режимів горіння дуги, що реалізуються, сталим є такий, при якому напруга на дузі буде мінімальною.

Це означає, що, якщо при протіканні розряду в якій-небудь точці “А” поміж електродами напруга на дузі збільшується, то таким чином збільшується вірогідність того, що десь в іншій точці “В” поміж електродами напруга горіння дуги може виявитись меншою. Тоді процес в точці “А” припиняється, а в точці “В” починається. Частіше розряд переміщується на ближню ділянку в напрямку течії рідини (тобто по лінії найменшого опору). Переміщення дуги на нову ділянку супроводжується існуванням двох дуг: попередньої (першої) дуги і нової (другої) дуги, яка шунтує першу. Як наслідок, напруга на дузі знижується.

Таким чином електроерозійний процес в умовах РОД характеризується безперервним підведенням енергії в зону обробки, безперервним протіканням розряду і безперервним існуванням джерел тепла на електродах. Отже безперервною є теплова дія розряду на електроди і безперервно протікає процес ерозії. Проте, згідно викладеного, фізична природа існування стаціонарної електричної дуги передбачає дискретний характер її переміщення по поверхні електродів (дуга після деякого вистоювання на місці переміщується на іншу ділянку), а отже, перерваний, дискретний характер процесу ерозії, що є безумовною властивістю дуги.

Треба розрізнати два етапи евакуації продуктів ерозії: із лунки та з міжелектродного зазору. Видалення металу із лунки відбувається головним чином при протіканні розряду. Метал із лунки в залежності від режимів обробки може видалятися як в рідкому, так і в газоподібному станах, причому при збільшенні динамічного тиску потоку робочої рідини в зоні обробки, що відповідає реалізації більш високих енергетичних характеристик розряду, все більша маса металу видаляється в сильно диспергованому стані (за рахунок випаровування). Із міжелектродної порожнини продукти ерозії легко видаляються потужним потоком робочої рідини.

Отже, згідно викладеного, фізична модель електричної дуги в умовах РОД і, відповідно, фізична модель процесу РОД в цілому описуються простим співвідношенням:

$$y = kI^\alpha P_d^\beta$$

де y – будь-який технологічний показник (характеристика) процесу, наприклад, продуктивність, шорсткість, глибина зони термічного впливу та інше; k – коефіцієнт розмірності; I – сила струму, А; застосовується в межах від декількох ампер до кількох тисяч ампер, визначає продуктивність обробки і таким чином, по суті, відображає кількісну сторону процесу; P_d – динамічний тиск потоку, Па; вибирається в межах від 1...2кПа до 1МПа і більше, визначає якість обробки (шорсткість, глибину зони термічного впливу, точність) і таким чином, по суті, відображає якісну сторону процесу; α і β – показники ступеня, різні для різних технологічних характеристик.

Така, в першому наближенні, феноменологічна модель фізичного механізму електричної ерозії в умовах РОД, що відповідає існуючим уявленням в області стаціонарної електричної дуги та підтверджується сукупністю отриманих експериментальних даних.

4.5. Висновки

4.5.1. Можливості та якісні і кількісні характеристики процесу РОД визначаються якісними характеристиками (якістю) джерел тепла на електродах, перш за все, об'ємною густиною теплової потужності. Остання, в свою чергу, визначається динамічним тиском потоку робочої рідини, а також, в відомих межах, полярністю електродів. В зв'язку з цим є можливим легко (за рахунок регулювання швидкості потоку робочої рідини) керувати якістю джерел тепла на електродах, а отже і якістю процесу ерозії, здійснюючи обробку незалежно від струму в широкому діапазоні режимів, починаючи від грубого розмірного плавлення і аж до превалюючого тонкого розмірного випаровування.

4.5.2. Фізичний процес електричної ерозії при РОД характеризується безперервним підведенням енергії в зону обробки, безперервним горінням дуги і безперервним існуванням джерел тепла на електродах. Отже безперервною є тепла дія розряду на електроди і безперервно проходить процес ерозії. При цьому фізична природа існування стаціонарної електричної дуги обумовлює дискретний характер її переміщення по поверхні електродів, а отже, і дискретний характер процесу ерозії, що є безумовною властивістю дуги.

4.5.3. Треба розрізняти два етапи евакуації продуктів ерозії: із лунки та з міжелектродного зазору. Видалення металу із лунки

відбувається головним чином при протіканні розряду. Метал із лунки в залежності від режимів обробки може видалятися як в рідкому стані, так і в газоподібному стані (за рахунок випаровування) при збільшенні і відповідних значеннях динамічного тиску потоку робочої рідини. Із міжелектродної порожнини продукти ерозії легко видаляються потужним потоком робочої рідини.

4.5.4. Описано феноменологічну модель фізичного механізму електричної ерозії в умовах РОД, що відповідає існуючим уявленням в області стаціонарної електричної дуги та підтверджується сукупністю отриманих експериментальних даних.

5. ТЕХНОЛОГІЯ РОД

5.1. Технологічні схеми формоутворення

При забезпеченні основної умови реалізації процесу, яка полягає в тому, що обробка здійснюється електричною дугою в поперечному потоці середовища-діелектрика при динамічному тиску останнього не менше 1...2кПа, РОД, як і відомі способи ЕРО, дозволяє здійснити майже всі технологічні схеми формоутворення, характерні для обробки металів різанням (так звана обробка непрофільованим електродом).

Реалізація конкретних технологій РОД та розробка відповідних технологічних схем формоутворення вимагає індивідуальних підходів та застосування найрізноманітніших технологічних прийомів. Це потребує уніфікації цих прийомів та розробки відповідних рекомендацій. На підставі аналізу і узагальнень теоретичних та експериментальних досліджень і практичної реалізації процесу РОД викладемо ці технологічні прийоми у вигляді правил реалізації процесу РОД або, що те ж, але згідно діючої термінології, у вигляді переліку та опису способів РОД.

5.1.1. Спосіб РОД, згідно якого потік робочої рідини підводять до передньої формоутворюючої поверхні електрода 1 (рис. 5.1), а відводять від задньої робочої поверхні електрода, що прилягає до менш чистої за умовами виготовлення поверхні заготовки або в сторону припуску на подальшу обробку, напуску чи відходу.

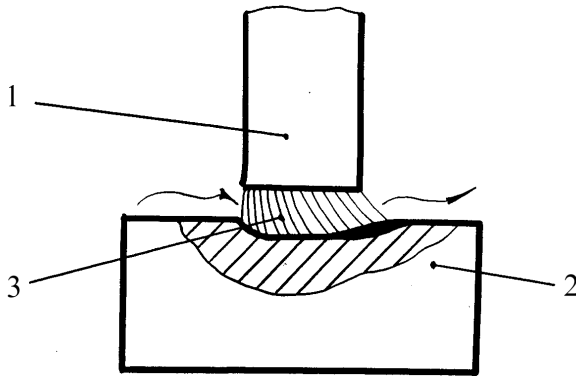


Рис. 5.1. Структура електричної дуги в поперечному потоці рідини

Рідину подають поміж електродом 1 і заготовкою 2 примусово потоком в напрямку, по суті, поперечному до осі стовпа електричної дуги 3.

При цьому в умовах реального процесу (рис. 5.2) на електроді 1 треба розрізняти такі елементи: передня поверхня 4, передня формоутворююча поверхня 5, торцева робоча поверхня 6, задня робоча поверхня 7 і задня поверхня 8. В місцях перетину передньої і торцевої поверхні електрода розташована передня формоутворююча кромка 9, а в місцях перетину задньої і торцевої поверхонь – задня робоча кромка 10.

Таке технічне рішення дозволяє оптимально використати стаціонарну електричну дугу в поперечному потоці рідини як джерело тепла для розмірної обробки металів, оскільки така дуга має несиметричну енергетичну структуру, а саме, зі сторони потоку, який набігає на неї, її енергетичні характеристики вищі, її “ріжучі” властивості кращі, ніж з задньої сторони, де потік залишає електрод. До того ж в напрямку потоку, що рухається, якість обробленої поверхні погіршується ще й через продукти ерозії, які рухаються разом з потоком.

Отже, дуга зі сторони потоку, що набігає на неї, формує якісну кромку 14 і якісно оброблену поверхню 11, в той час як зі сторони задньої поверхні електрода, де потік залишає електрод, формується менш якісна поверхня 12. Таким чином, коли потік робочої рідини підводять до формоутворюючої поверхні 5 електрода, то саме тут формується якісна кромка 14, а надалі і якісна поверхня 11, в той час

як зі сторони задньої поверхні 8 електрода формується менш якісна поверхня 12. Відзначимо, що якість обробленої поверхні 11 при цьому не поступається досягнутій при традиційних способах електроерозійної обробки.

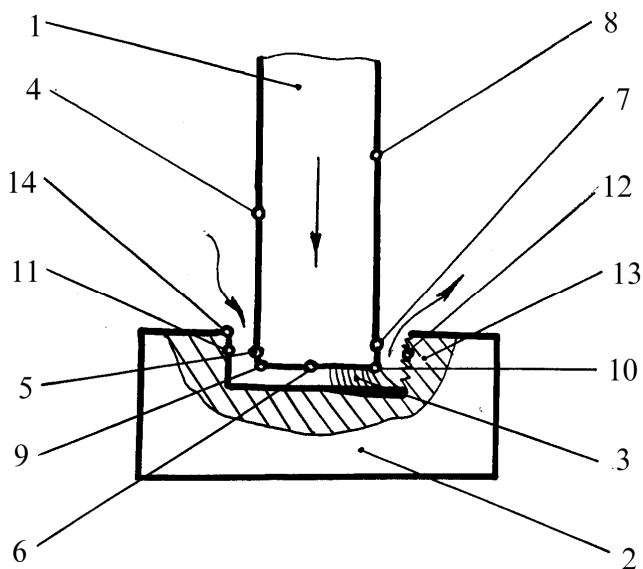


Рис. 5.2. Схема реального процесу

5.1.2. Спосіб РОД, згідно якого для підвищення якості обробленої поверхні, зменшення розбризкування робочої рідини, гасіння світлових і звукових ефектів на задню робочу поверхню 7 електрода 1 (рис. 5.3) подають додатковий потік робочої рідини, по суті, перпендикулярно до основного потоку в аксіальному (паралельному поздовжній осі електрода) і тангенціальному (по дотичній до бічної поверхні електрода з круглим поперечним перерізом) напрямках, або ж в зустрічному напрямку до основного потоку. Це дозволяє локалізувати зону обробки за рахунок її затоплення робочою рідиною, в зв'язку з чим такий додатковий потік робочої рідини називають потоком затоплення. Напрямок додаткового потоку рідини визначається вимогами реалізації конкретної технологічної схеми формоутворення.

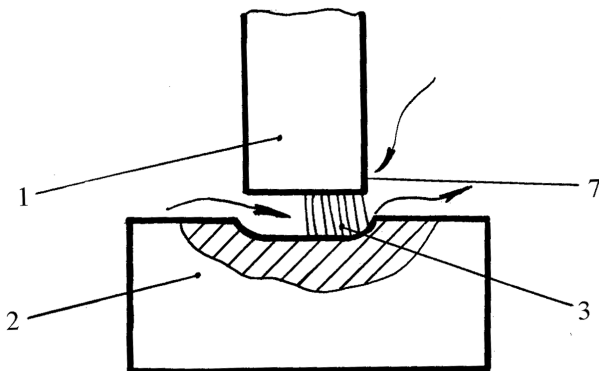


Рис.5.3. Схема процесу з додатковим потоком затоплення

5.1.3. Спосіб РОД, згідно якого ефект збереження швидкості потоку рідини, що залишає електрод зі сторони його задньої робочої поверхні 7 електрода 1, а отже і забезпечення високої якості обробленої поверхні досягають за рахунок того, що потік робочої рідини формують при її відводі через сопло 15 (рис. 5.4) або щілину тільки всмоктуванням, тільки нагнітанням або ж комбінацією нагнітання і всмоктування. Таке технічне рішення забезпечує не тільки якісне формоутворення поверхні, що обробляється, але й дозволяє оптимізувати витрату робочої рідини. При цьому вибір варіанту формування потоку робочої рідини (тільки всмоктуванням, тільки нагнітанням або ж комбінацією нагнітання та всмоктування) повністю визначається вимогами реалізації конкретної технологічної схеми формоутворення.

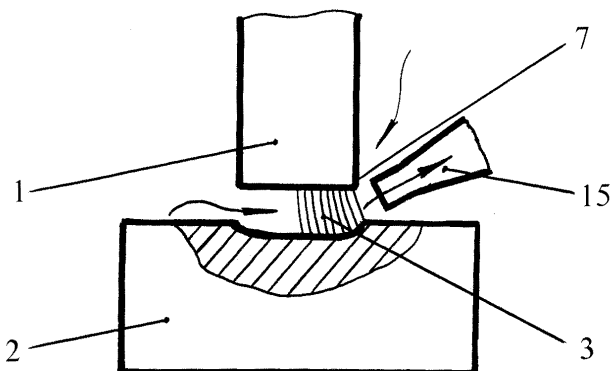


Рис.5.4. Схема процесу при відведенні рідини через сопло

5.1.4. Спосіб РОД, згідно якого для локалізації зони обробки з метою підвищення якості обробленої поверхні, зменшення розбризкування робочої рідини та зменшення світлових і звукових

ефектів зі сторони задньої робочої поверхні 7 електрода 1 (рис. 5.5) створюють гідравлічний опір розтіканню рідини у вигляді ущільнення 16, яке прикріплене до стінки 17. При цьому в зону обробки подається більша кількість рідини, ніж іде на вільний злив під ущільнення 16. Як наслідок, інша частина рідини затоплює робочу зону обробки, створюючи ванну і зливається, наприклад, через стінку 17 або контрольний отвір в ній.

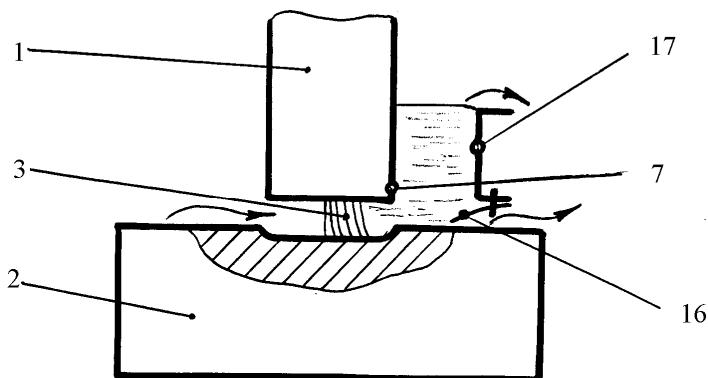


Рис. 5.5. Схема процесу при затопленні зони обробки

5.1.5. Спосіб РОД, згідно якого для покращення якості обробленої поверхні зі сторони задньої поверхні 7 електрода 1 (рис. 5.6), достатньо зберегти швидкість потоку робочої рідини, що залишає електрод. Для цього зі сторони задньої робочої поверхні 7 електрода встановлюють додаткові елементи 18, наприклад, одну накладку (див. рис. 5.6) або дві накладки (рис. 5.7). Додаткові елементи 18 формують щілину для відведення робочої рідини, висоту якої приймають рівною, або дещо більшою висоти міжелектродного зазору.

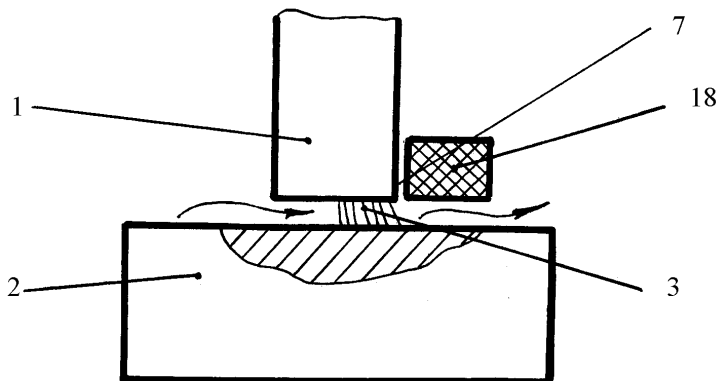


Рис. 5.6. Схема процесу при застосуванні додаткового елемента

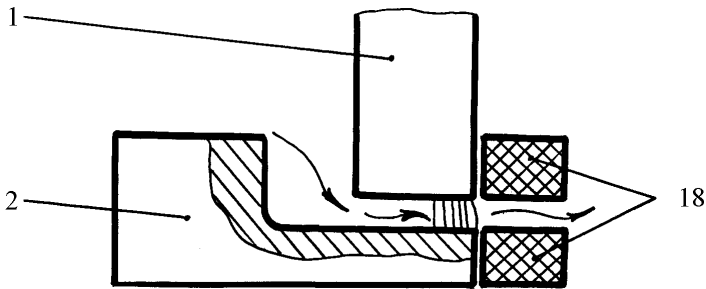


Рис.5.7. Схема процесу при застосуванні двох додаткових елементів

5.1.6. Спосіб РОД, коли враховують, що якість обробленої поверхні в умовах даного способу визначається, перш за все, характером взаємодії дуги з потоком робочої рідини. Тому, формуючи потік відповідних характеристик, зокрема забезпечуючи більш рівномірну течу робочої рідини в міжелектродному зазорі, можна покращити якість обробленої поверхні. З цією метою потік робочої рідини формують при її течі в звужуючу щілину, що утворюється оброблюваною поверхнею заготовки 2 (рис. 5.8) і нахиленою торцевою неробочою поверхнею 19 електрода 1, яку доцільно розташувати під кутом $\alpha=70\dots85^\circ$. При цьому шорсткість обробленої поверхні зменшується на один-два квалітети при інших рівних умовах порівняно з технологічними схемами формоутворення з плоскою торцевою поверхнею.

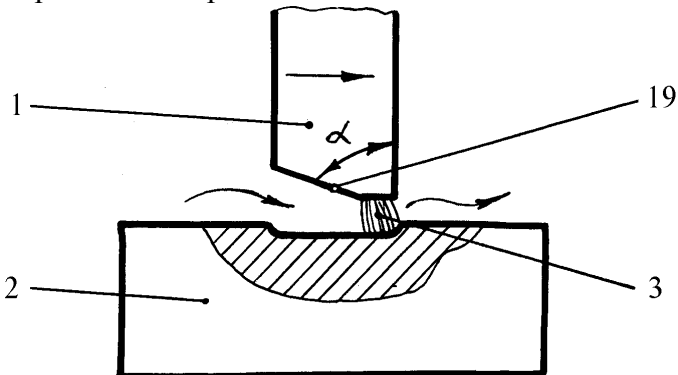


Рис. 5.8. Схема процесу при течі рідини в звужуючу щілину

5.1.7. Спосіб РОД, згідно якого для прошивання наскрізних щілин в тонких листових заготовках застосовують електрод 1 зі скошеною нахиленою або вигнутою торцевою робочою поверхнею 20 (рис. 5.9). Після заглиблення в заготовку 2 гострою кромкою

електрода 1 і його подальшому русі донизу довжина траси прокачування робочої рідини через міжелектродний зазор залишається приблизно однаковою і є невеликою. Під оброблюваним отвором передбачають порожнину 21 з робочою рідиною. Скіс торцевої робочої поверхні може бути як одnobічним (див. рис. 5.9), так і двобічним (рис. 5.10), а кут β (див. рис. 5.9) електрода 1 може коліватись в широких межах, в середньому 60° ; крім того торцева робоча поверхня 20 електрода 1 може бути вигнута в різних варіантах – і все це, в кінцевому підсумку, визначається вимогами реалізації конкретної технологічної схеми формоутворення.

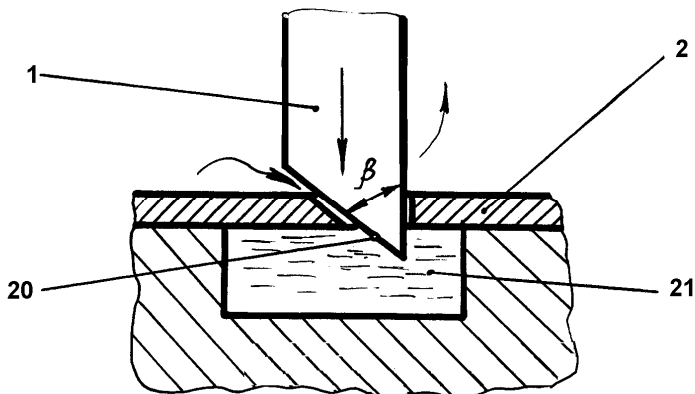


Рис. 5.9. Схема процесу обробки вузької щілини

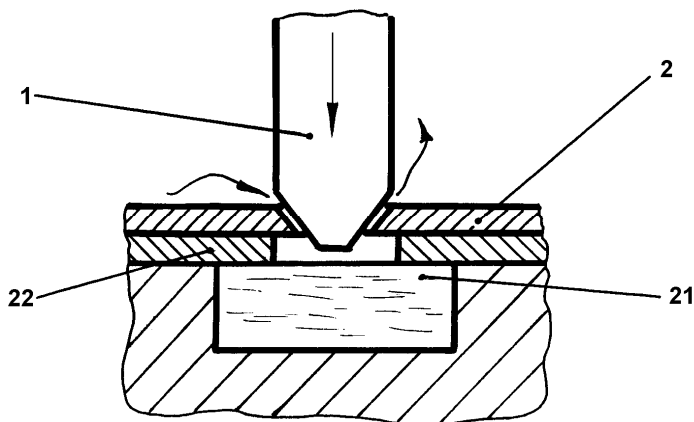


Рис. 5.10. Схема процесу обробки при наявності підкладки

5.1.8. Спосіб РОД, згідно якого для забезпечення якості нижньої кромки наскрізного отвору, обробку здійснюють на

металевій чи гумовій підкладці 22 (див. рис. 5.10), якою, зокрема, може бути одна з попередньо прошитих заготовок, звичайно перша, яка стає, таким чином, довготривалим оснащенням для прошивання інших заготовок.

5.1.9. Спосіб РОД, згідно якого для підвищення продуктивності та якості обробленої поверхні при наскрізному прошиванні під отвором, який отримують, передбачають порожнину 21, яку з'єднують зі зливом (рис. 5.11), а в головній зливній магістралі створюють додатковий гідравлічний опір, т. з. протитиск, наприклад, за допомогою крана (на схемі умовно не показано). Величина протитиску, яка звичайно коливається в межах 1...10атм, повністю визначається умовами реалізації конкретної технологічної схеми формоутворення.

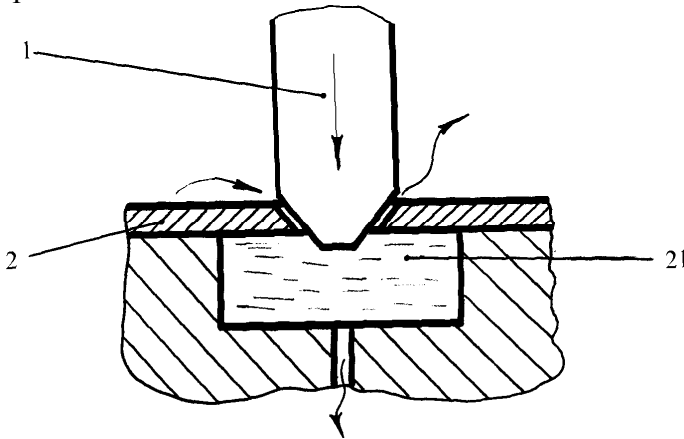


Рис. 5.11. Схема процесу обробки підкладки з притиском

5.1.10. Спосіб РОД, коли буває потрібно видалити підвищений припуск (напуск) або відхід. В цьому випадку простим за використанням, продуктивним та економічним в енергетичному відношенні, оскільки руйнування металу здійснюється за рахунок локального плавлення видовженою дугою, є збільшення тільки напруги дуги до $U = 35...70\text{В}$, тільки струму дуги до $I = 300...1000\text{А}$, або ж одночасно струму і напруги до вказаних значень. Як наслідок, може бути видалений підвищений припуск (напуск) або відхід (до 5...10 мм і більше) (рис. 5.12).

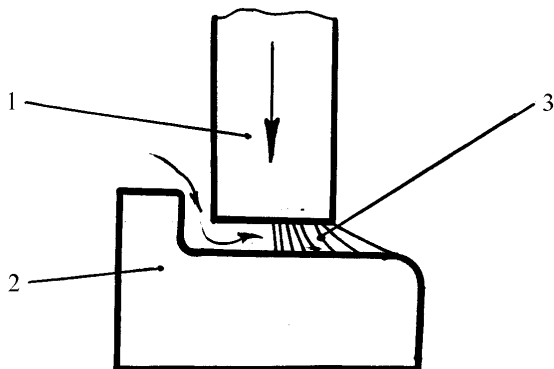


Рис. 5.12. Схема процесу при підвищених напрузі і струму

5.1.11. Спосіб РОД, згідно якого для забезпечення якісного формування поверхні 23 (рис. 5.13) та кромки 24 зі сторони задньої робочої поверхні електрода процес реалізують при мінімальній напрузі дуги $U = 20...25V$ і мінімальному струмі $I = 1...30A$.

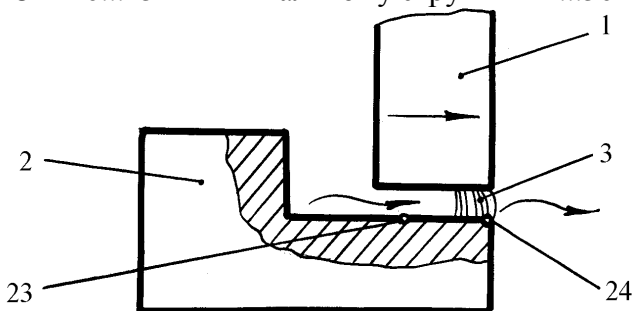


Рис. 5.13. Схема процесу при мінімальних напрузі і струму

5.1.12. Спосіб РОД, коли проблемою є стабілізація процесу і виключення його порушень, при запалюванні дуги, близької за своїми енергетичними характеристиками до звичайних зварювальних дуг, що псує оброблювану поверхню. Особливо це виявляється при обробці несиметричних і великих поверхонь, при багатоелектродній обробці, при використанні багатосекційних електродів і т. і. Щоб це виключити, достатньо щоб гідравлічний опір на всіх лініях течії робочої рідини був по можливості мінімальним і приблизно однаковим, для чого траси прокачки робочої рідини через міжелектродний зазор повинні бути по можливості мінімальними і приблизно однаковими. Для цього робочу поверхню електрода поділяють на окремі ділянки прокачування, які повинні наближатися

до круглих чи квадратних в плані. На рис. 5.14 наведено приклад багатосекційного електрода в плані, який складається із п'яти окремих квадратних ділянок 25 з отворами 26 для відведення робочої рідини, що задовольняє зазначеним умовам та забезпечує якісну обробку.

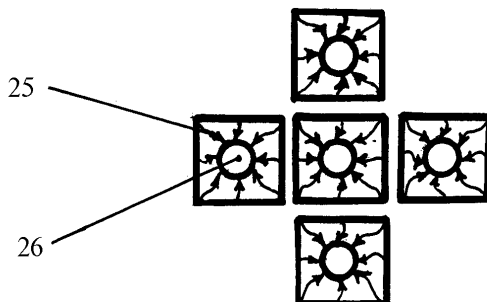


Рис. 5.14. Приклад багатосекційного електрода в плані

5.1.13. Спосіб РОД, коли при обробці великих поверхонь профільованим електродом різко зростають траси прокачки робочої рідини через міжелектродний зазор і, відповідно, тиск робочої рідини, що погіршує якість обробленої поверхні, ускладнює і часто порушує процес. В цьому випадку доцільна, особливо при обробці видовжених в плані поверхонь, коли до того ж можна оптимізувати витрату робочої рідини, реалізація технологічної схеми обкатування заготовки 2 профільованим електродом 27 при прокачуванні робочої рідини в напрямку, зворотному обкатуванню (рис. 5.15).

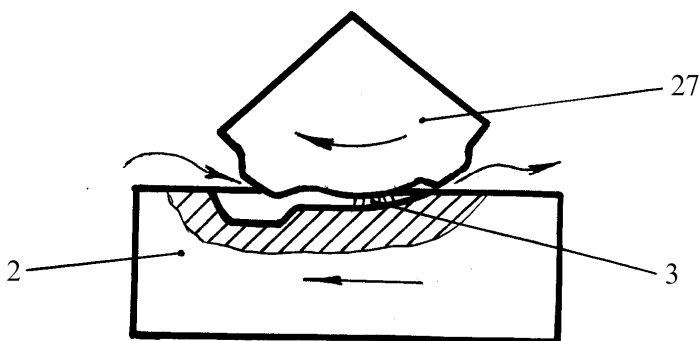


Рис. 5.15. Технологічна схема формоутворення за принципом обкатування

Викладені технічні рішення, прийоми та режими обробки способу в їх сукупності, взаємозв'язку та взаємозалежності дозволяють реалізувати практично всі відомі технологічні схеми

формування розмірної обробки, забезпечуючи при цьому оптимальне поєднання кількісних та якісних характеристик процесу і, в кінцевому рахунку, зазначені раніше його переваги.

Як приклад, що підтверджує це, розглянемо реалізацію технологічної схеми формування деталі 28 (рис. 5.16) типу фасонний стержень. Перш за все звертаємось до п. 5.1.1 (див. рис. 5.2), згідно якого для якісного формування деталі при реалізації відомої схеми зворотного копіювання необхідно використати так звану пряму прокачку робочої рідини від центру порожнистого профільованого електрода 29 до його периферії і, відповідно, від центру оброблюваної заготовки до її периферії. З метою високопродуктивного видалення збільшеного припуску 30 використовуємо п. 5.1.10 (див. рис. 5.12). Щоб покращити якість поверхні 31, використовуємо п. 5.1.6 (див. рис. 5.8). Як наслідок, реалізується технологічна схема формування (див. рис. 5.16) і відповідні режими обробки, що забезпечують зазначені вище переваги способу. Так, наприклад, при обробці сталеві заготовки при застосуванні дуги напругою $U = 35\text{В}$ при струмі $I = 1000\text{А}$ забезпечується продуктивність $30000\text{мм}^3/\text{хв}$ при відсутності на обробленій поверхні 31 зони термічного впливу та при шорсткості обробленої поверхні в межах четвертого класу ($R_a 6,3$). Це при заданій якості поверхні в десятки разів перевищує продуктивність традиційних методів електроерозійної обробки.

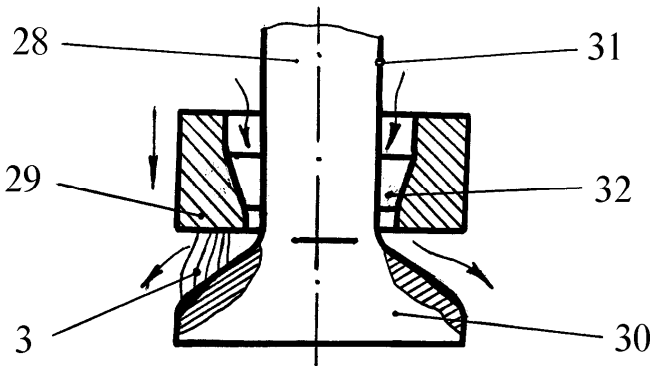


Рис. 5.16. Технологічна схема формування деталі типу «стержень»

Наступним прикладом є реалізація способу при відносному переміщенні заготовки і електрода в різних напрямках, наприклад, при обробці тіл обертання (рис. 5.17, 5.18) непрофільованим електродом 33. В цьому випадку треба виходити з того, що

оптимальним варіантом підведення робочої рідини високого тиску в зону обробки є загальновідоме технічне рішення – використання порожнистого електрода 33 з отвором 34. Проте при цьому існує проблема локалізації робочої зони обробки з метою забезпечення якості обробки, зменшення світлових і звукових ефектів від розряду та зменшення розбризкування робочої рідини із зони обробки. Найбільш просте рішення із викладених, що вирішує цю проблему, це технічне рішення, сформульоване п. 5.1.4. Згідно цього пункту зі сторони задньої робочої поверхні електрода 33 (див. рис. 5.17) створюють гідравлічний опір розтіканню робочої рідини ущільненням 16, яке прикріплене до стінки 17. Оскільки кількість рідини, що надходить через отвір 34 в електроді 33, більше тієї, що іде на вільний злив під ущільненням 16, то робоча рідина затоплює зону обробки, створюючи ванну, і зливається через контрольний отвір 35.

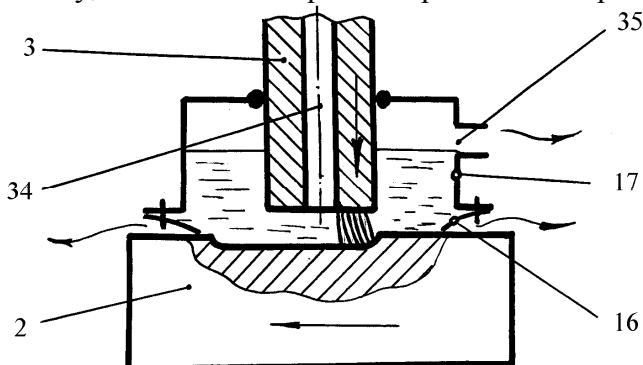


Рис. 5.17. Технологічна схема формоутворення непрофільованим електродом

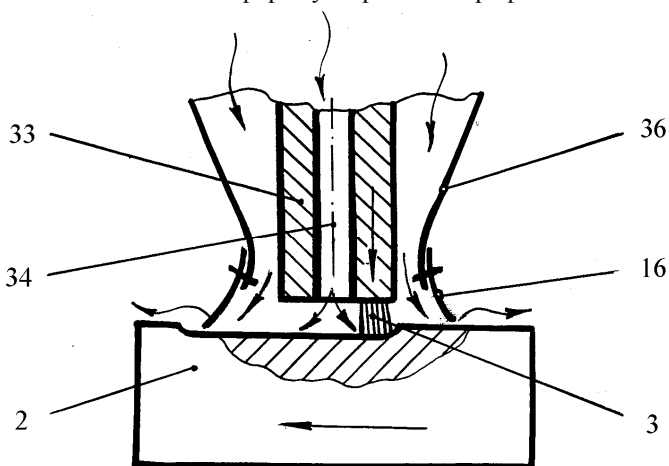


Рис. 5.18. Технологічна схема формоутворення непрофільованим електродом

Більш складним, але й більш ефективним є технічне рішення, сформульоване п. 5.1.2. Згідно цього пункту на задню робочу поверхню електрода 33 (див. рис. 5.18) подають додатковий потік робочої рідини за допомогою камери 36, до нижньої частини якої прикріплене ущільнення 16. Це створює ванну робочої рідини, яка локалізує зону обробки, з можливостями впливати на характер течії робочої рідини в зоні обробки, а відповідно визначати, в відомих межах, як кількісні, так і якісні характеристики процесу обробки, а також умови обслуговування.

Ще більш складним, але й більш ефективним може бути технічне рішення, сформульоване п. 5.1.3 коли є можливість, зокрема, за рахунок всмоктування (див. рис. 5.4) взагалі видалити із зони обробки як робочу рідину, так і продукти ерозії.

Аналогічно, згідно викладеного, можна реалізувати як відомі, так і нові технологічні схеми формоутворення електроерозійної обробки.

Результати практичного використання технології, верстатів і електроерозійних головок, що реалізують спосіб, згідно викладеного, підтверджують вказані раніше переваги способу порівняно з відомими, традиційними способами електроерозійної обробки, заснованими на використанні нестационарних електричних розрядів, а саме: при заданій якості обробки продуктивність способу в 5...10 разів і більше перевищує продуктивність відомих способів, приблизно вдвічі зменшується питома витрата електроенергії, значно менша вартість джерел живлення технологічним струмом, а також забезпечуються широкі можливості реалізації процесу за рахунок різноманітних технологічних схем формоутворення як профільованим, так і непрофільованим електроодом, починаючи від традиційних і аж до того, що запропонований процес може бути ефективно використаним на будь-яких металорізальних верстатах без втрати останніми їх основних функцій.

5.2. Продуктивність процесу

Продуктивність обробки є функцією таких параметрів процесу, як матеріал і полярність електродів, склад і динамічний тиск потоку рідини, міжелектродний зазор, напруга і струм обробки.

На рис. 5.19 показано залежність продуктивності обробки M сталі 45 від струму обробки I і динамічного тиску потоку P_d при використанні в якості робочої рідини масла “Індустріальне-12”, при застосуванні ЕІ з матеріалу МПГ-7, при $I = 100 \dots 1000 \text{ A}$ і $P_d = 0,01 \dots 0,5 \text{ МПа}$ та прямій полярності електродів, що визначається за формулою, $\text{мм}^3/\text{хв}$:

$$M = 53,27 \cdot I^{1,01} \cdot P_d^{-0,083} \quad (5.1)$$

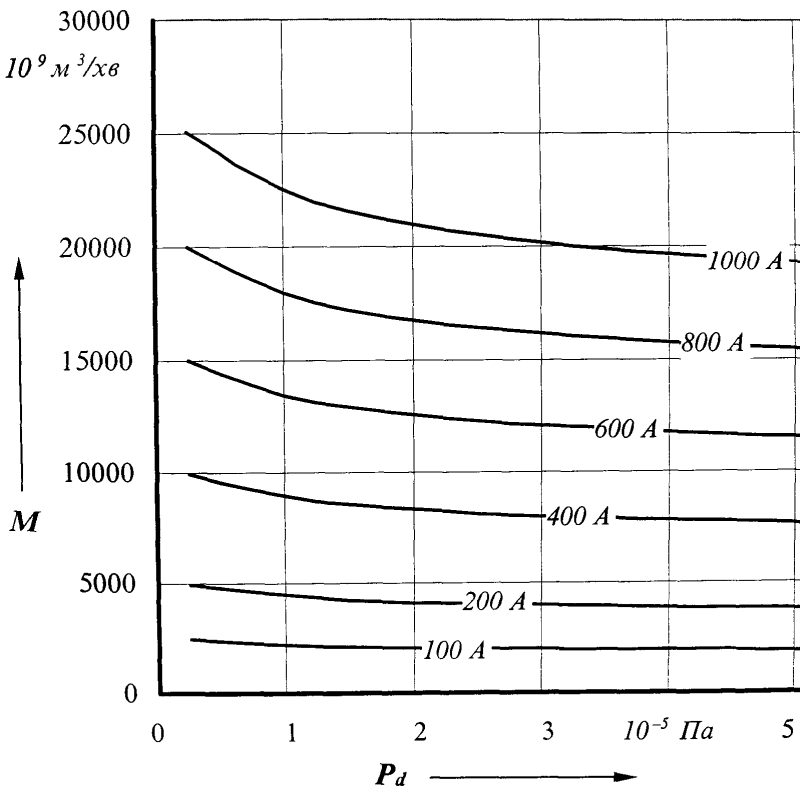


Рис. 5.19. Залежність продуктивності обробки M від I і P_d

На рис. 5.20 приведена аналогічна залежність, але при зворотній полярності електродів, яка визначається за формулою, $\text{мм}^3/\text{хв}$:

$$M = 23,3 \cdot I^{1,06} \cdot P_d^{-0,07} \quad (5.2)$$

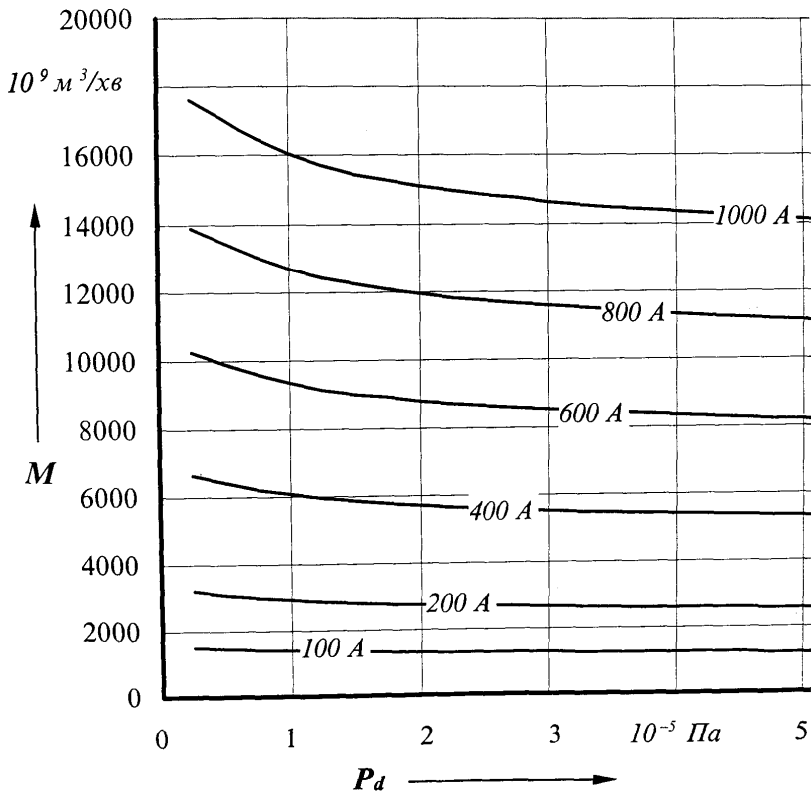


Рис. 5.20. Залежність продуктивності обробки M від I і P_d

Отримані залежності дозволяють зробити висновок, що продуктивність обробки в діапазоні зазначених режимів визначається переважно струмом обробки (приблизно прямо пропорційно I) і менше динамічним тиском потоку (зменшується при збільшенні P_d) і при прямій полярності приблизно в 1,5 рази вища, ніж при зворотній.

На рис. 5.21 показана залежність продуктивності обробки сталі 45 від I та P_d при використанні в якості робочої рідини масла "Індустріальне-12" при застосуванні ЕІ із сталі 45 при $I = 100 \dots 1000 \text{ А}$ і $P_d = 0,01 \dots 0,5 \text{ МПа}$ та при зворотній полярності електродів, що визначається за формулою, $\text{мм}^3/\text{хв}$:

$$M = 10,29 \cdot I^{1,03} \cdot P_d^{-0,04} \quad (5.3)$$

На рис. 5.22 для цих же умов приведено аналогічну залежність але при використанні в якості робочого середовища водопровідної води, яка визначається за формулою, $\text{мм}^3/\text{хв}$:

$$M = 9,03 \cdot I^{0,97} \cdot P_d^{-0,03} \quad (5.4)$$

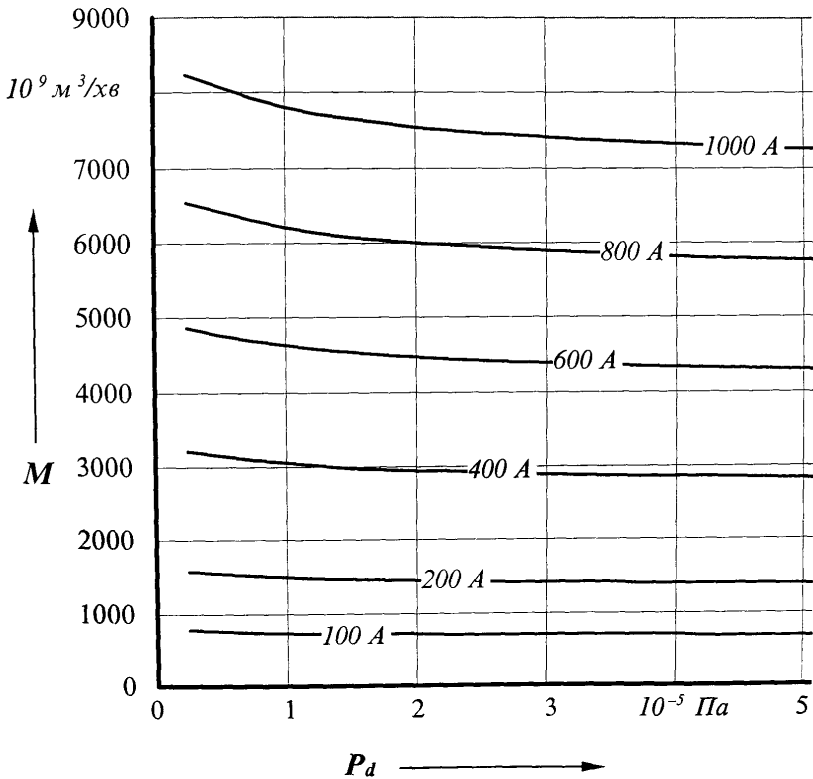


Рис. 5.21. Залежність продуктивності обробки M від I і P_d

Отримані залежності дозволяють зробити висновок, що застосування робочим середовищем масла (а не води) дає можливість помітно (в 1,5 рази) підвищити продуктивність обробки. Пояснюється це, певно, перш за все, більш високим значенням $U_{к+а}$ (див. Табл. 3.1). До того ж вода є слабким електролітом, що призводить до непродуктивних витрат електроенергії.

Продуктивність обробки значною мірою визначається теплофізичними характеристиками оброблюваного матеріалу. На рис. 5.23 показано залежність продуктивності обробки твердого сплаву ВК-15 від I та P_d при використанні в якості робочого середовища масла "Індустріальне-12", при використанні ЕІ з матеріалу МПГ-7, при $I = 100 \dots 1000 \text{ А}$ і $P_d = 0,01 \dots 0,5 \text{ МПа}$ та при прямій полярності електродів, що визначається за формулою, $\text{мм}^3/\text{хв}$:

$$M = 13,3 \cdot I^{0,99} \cdot P_d^{-0,12} \quad (5.5)$$

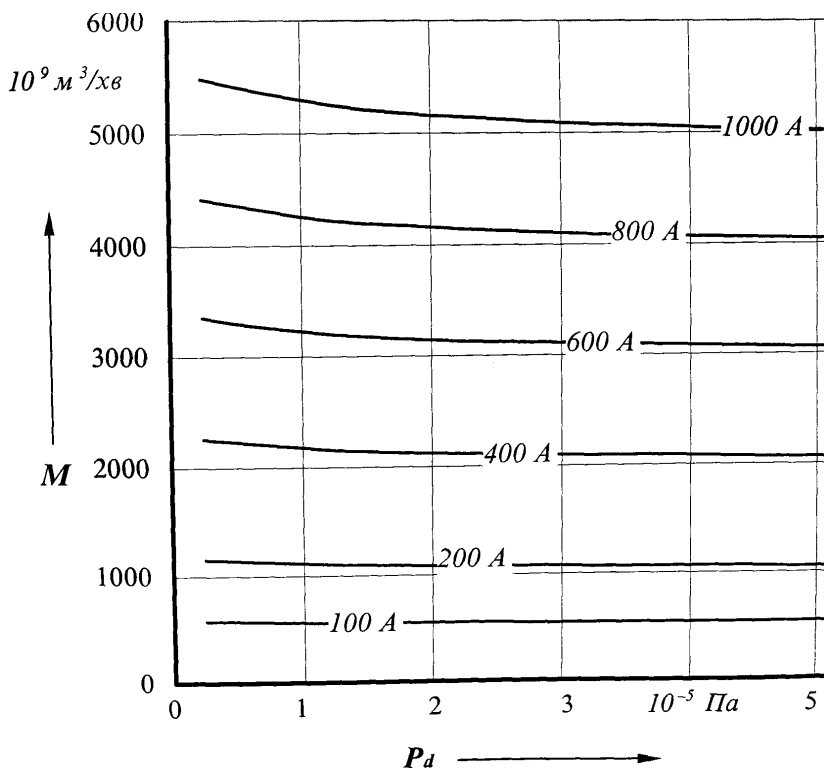


Рис. 5.22. Залежність продуктивності обробки M від I і P_d

На підставі отриманих даних можна зробити висновок, що при обробці твердих сплавів продуктивність процесу в 5...6 разів нижче, ніж при обробці сталі 45. Це приблизно таке ж співвідношення, як і при відомих способах ЕРО [143, с. 81]. Цей приклад, а також сукупність отриманих нами експериментальних даних дозволяють стверджувати, що порівнювальна оброблюваність матеріалів в умовах РОД оцінюється аналогічно, як і при відомих способах ЕРО.

На підставі отриманих даних можна зробити висновок, що при обробці твердих сплавів продуктивність процесу в 5...6 разів нижче, ніж при обробці сталі 45. Це приблизно таке ж співвідношення, як і при відомих способах ЕРО [143, с. 81]. Цей приклад, а також сукупність отриманих нами експериментальних даних дозволяють стверджувати, що порівнювальна оброблюваність матеріалів в умовах РОД оцінюється аналогічно, як і при відомих способах ЕРО.

На підставі отриманих даних можна зробити висновок, що при обробці твердих сплавів продуктивність процесу в 5...6 разів нижче, ніж при обробці сталі 45. Це приблизно таке ж співвідношення, як і

при відомих способах ЕРО [143, с. 81]. Цей приклад, а також сукупність отриманих нами експериментальних даних дозволяють стверджувати, що порівнювальна оброблюваність матеріалів в умовах РОД оцінюється аналогічно, як і при відомих способах ЕРО.

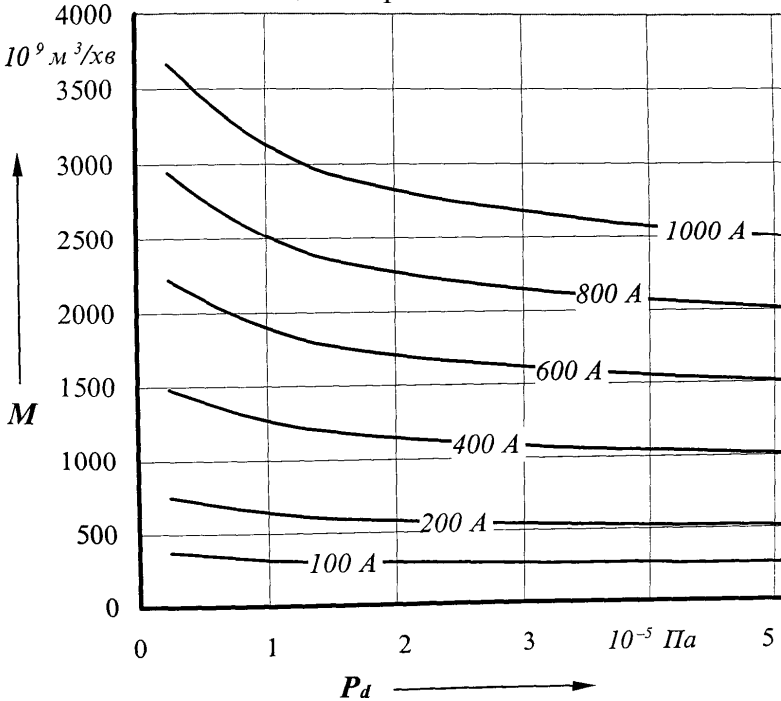


Рис. 5.23. Залежність продуктивності обробки M від I і P_d

Як зазначалось, більш зручним для контролю та керування характеристиками процесу порівняно з динамічним тиском потоку P_d є статичний тиск робочої рідини на вході в міжелектродний зазор P_{cm} (див. 2.1). Це доцільно, наприклад, коли при заданих умовах експерименту треба отримати порівняльні характеристики обробки різноманітних матеріалів.

На рис. 5.24 і 5.25 показано залежність продуктивності обробки M від струму I і статичного тиску робочої рідини на вході в міжелектродний зазор P_{cm} відповідно для сплаву ВТЗ-1 і сталі 45 при обробці зразків діаметром 50мм, висотою 30мм, на глибину 10мм, з двох сторін в спеціальному технологічному пристрої на верстаті “Дуга-6”, що визначаються за формулами, $\text{мм}^3/\text{хв}$:

$$M = 84,2 \cdot 10^{-9} \cdot I^{1,31} \cdot P_{cm}^{-0,25} \quad (5.6)$$

$$M = 4,96 \cdot 10^{-4} \cdot I^{1,36} \cdot P_{cm}^{-0,92} \quad (5.7)$$

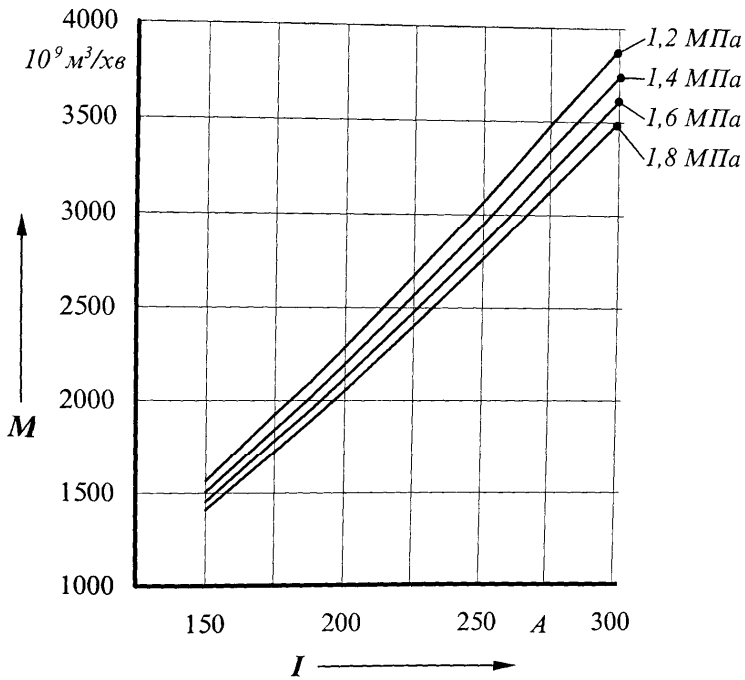


Рис. 5.24. Залежність продуктивності обробки M від I і P_{cm} для сплаву ВТЗ-1

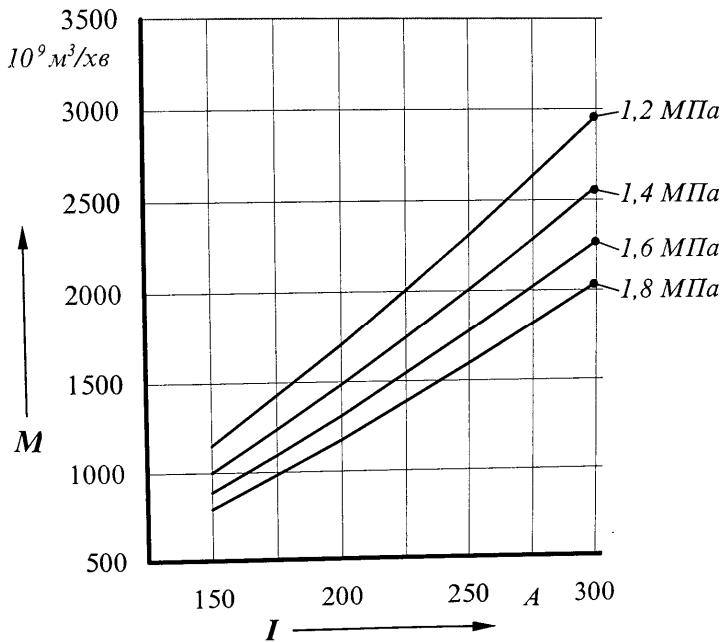


Рис. 5.25. Залежність продуктивності обробки M від I і P_{cm} для сталі 45

На рис. 5.26 і 5.27 для тих же умов показано залежність питомої продуктивності обробки M_a від струму I та статичного тиску робочої рідини P_{cm} відповідно для сплаву ВТЗ-1 і сталі 45, які визначаються за формулами, $\text{мм}^3/\text{хв}$:

$$M_a = 84,4 \cdot 10^{-9} \cdot I^{0,31} \cdot P_{cm}^{-0,26} \quad (5.8)$$

$$M_a = 4,96 \cdot 10^{-4} \cdot I^{0,36} \cdot P_{cm}^{-0,92} \quad (5.9)$$

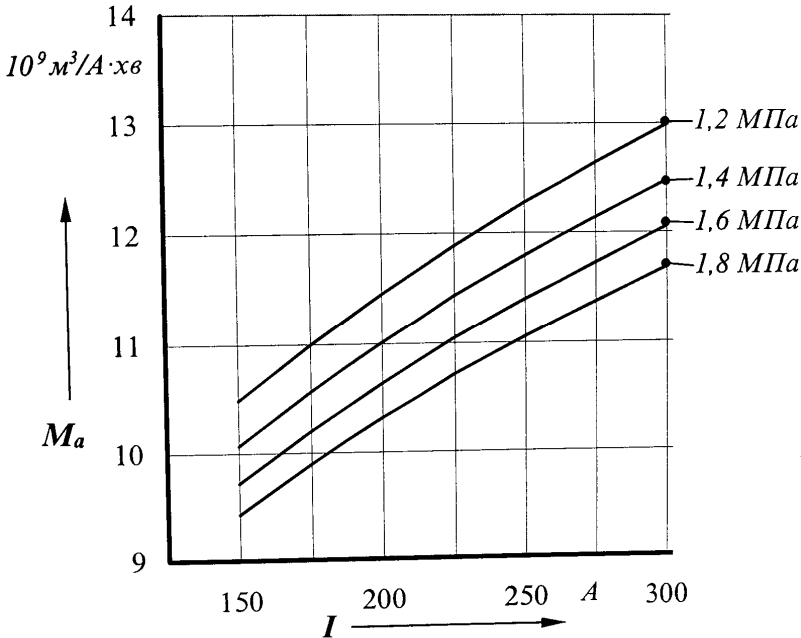


Рис. 5.26. Залежність продуктивності обробки M від I і P_{cm} для сплаву ВТЗ-1

На рис. 5.28 і 5.29 для тих же умов показано залежності питомих витрат електроенергії a від I та P_{cm} для тих же матеріалів, що визначають за формулами, $\text{кДж}/\text{м}^3$:

$$a = 28,91 \cdot 10^6 \cdot I^{-0,31} \cdot P_{cm}^{0,26} \quad (5.10)$$

$$a = 4,84 \cdot 10^3 \cdot I^{-0,36} \cdot P_{cm}^{0,92} \quad (5.11)$$

Наведені залежності продуктивності та питомої продуктивності обробки сплаву ВТЗ-1 порівняно зі сталлю 45, оброблюваність якої приймають за одиницю [143, с. 81], в 1,2...1,3 рази вища при відносно низьких статичних тисках робочої рідини P_{cm}

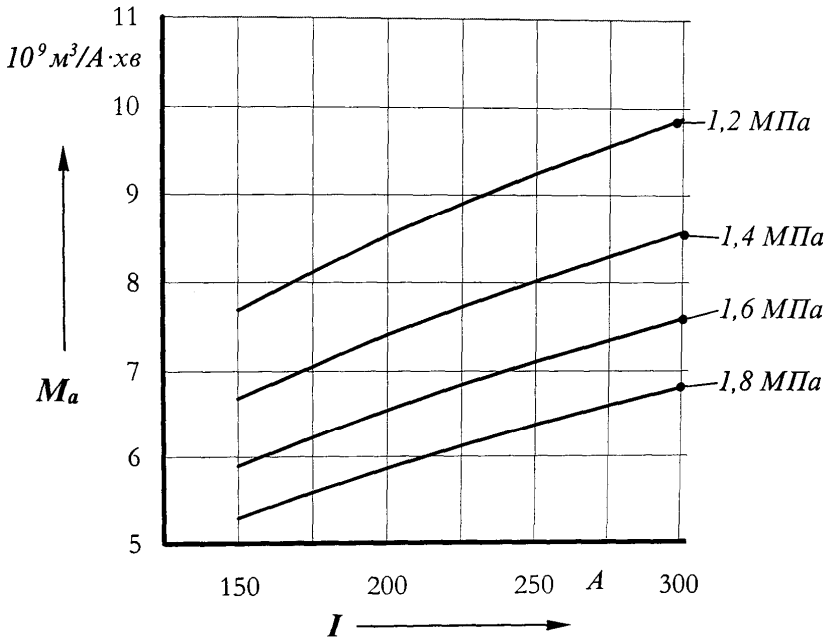


Рис. 5.27. Залежність продуктивності обробки M від I і P_{cm} для сталі 45

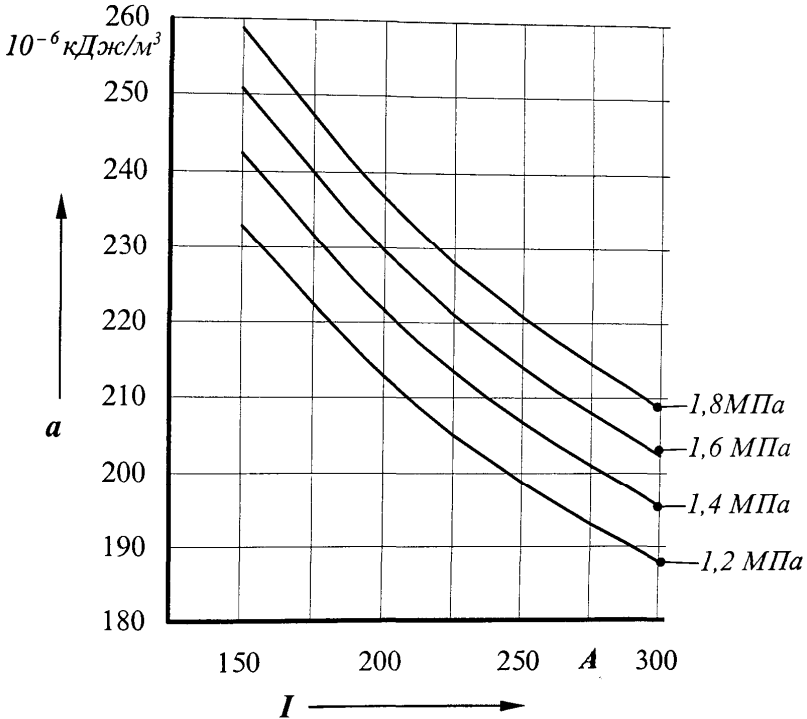


Рис. 5.28. Залежність питомих втрат електроенергії a від I і P_{cm} для сплаву ВТЗ-1

і в 1,6...1,7 рази вища при відносно високих значеннях P_{cm} , а питомі витрати електроенергії, навпаки, відповідно, в 1,2...1,3 рази менші при відносно низьких P_{cm} і в 1,6...1,7 рази менші при відносно високих P_{cm} .

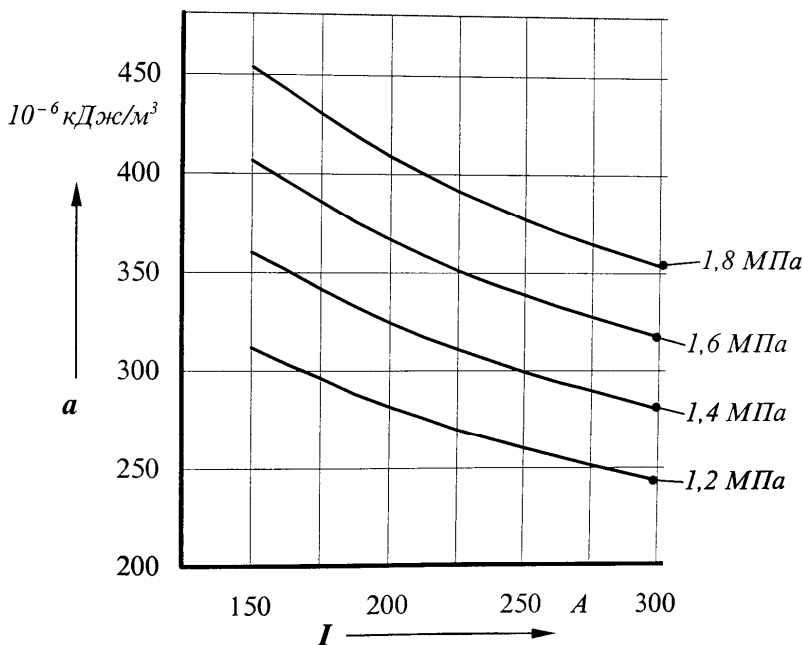


Рис. 5.29. Залежність питомих витрат електроенергії a від I і P_{cm} для сталі 45

Помітне практичне застосування знаходить ЕРО штампових сталей. На рис. 5.30 показано залежність продуктивності РОД сталі 5ХНТ від I та P_d при використанні в якості робочої рідини гасу (50%) і масла “Індустріальне-12” (50%), при застосуванні ЕІ з матеріалу МПГ-7, при $I = 100 \dots 1000 \text{ А}$ і $P_d = 0,01 \dots 0,5 \text{ МПа}$ і при зворотній полярності електродів, яка визначається за формулою, $\text{мм}^3/\text{хв}$:

$$M = 47,62 \cdot I^{0,95} \cdot P_d^{-0,09} \quad (5.12)$$

На рис. 5.31 для тих же умов показано залежності питомих витрат електроенергії a від I та P_d , при $I = 100 \dots 1000 \text{ А}$ і $P_d = 0,01 \dots 0,5 \text{ МПа}$, що визначається за формулою, $\text{кДж}/\text{м}^3$:

$$a = 27,08 \cdot I^{-0,02} \cdot P_d^{0,18} \quad (5.13)$$

Остання залежність, а також сукупність отриманих експериментальних даних показують, що питомі витрати електроенергії в умовах РОД приблизно вдвічі менші, ніж при відомих способах ЕРО [1, с. 105, 107].

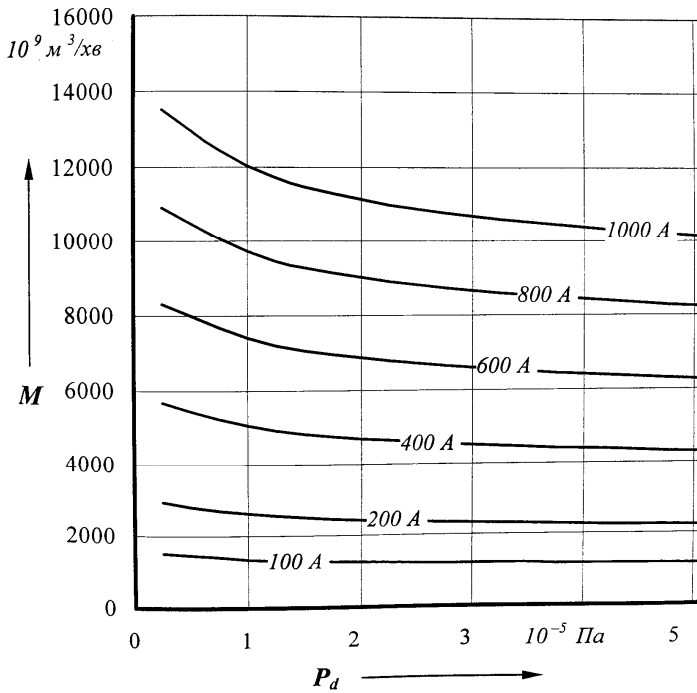


Рис. 5.30. Залежність продуктивності обробки M від I і P_d

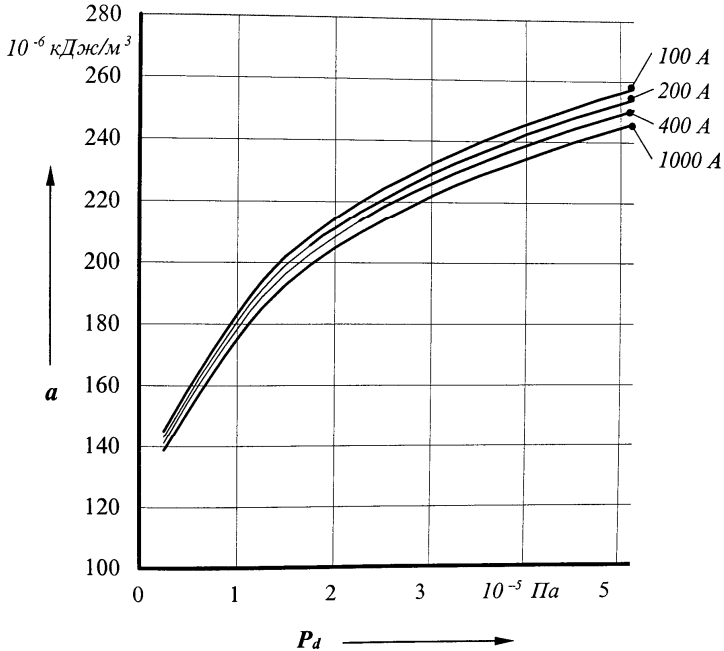


Рис. 5.28. Залежність питомих втрат електроенергії a від I і P_d

Продуктивність обробки, згідно викладеного, приблизно прямо пропорційна струму. Струм обробки в умовах РОД обмежується лише площею поперечного перерізу ЕІ. Так, наприклад, при застосуванні електродів із електроерозійного графіту типу МПГ-7 струм обробки, в першому наближенні, приймається з умови, що густина струму по площі поперечного перерізу ЕІ не повинна перевищувати $1...2\text{А}/\text{мм}^2$. Це, до речі, десь на порядок перевищує рекомендовану густину струму при відомих способах ЕРО. Тож при площі поперечного перерізу ЕІ, наприклад, більше 1000мм^2 (а це звичайний випадок реалізації процесу) можна вести обробку при струмі $I = 1000\text{А}$, забезпечуючи при обробці сталей продуктивність до $25\ 000\text{мм}^3/\text{хв}$ при досить високій якості обробки (зона термічного впливу – соті долі міліметра, шорсткість – $R_a\ 6,3$), що в багато разів перевищує продуктивність відомих способів ЕРО.

5.3. Якість обробленої поверхні

Якість обробленої поверхні визначається її шорсткістю та глибиною зони термічного впливу і є функцією таких параметрів процесу, як матеріал і полярність електродів, склад і динамічний тиск потоку рідини, міжелектродний зазор, напруга і струм обробки.

Як зазначалось, оброблена РОД поверхня має деякі характерні особливості. Така поверхня являє собою сукупність великої кількості лунок, які звичайно розташовуються в певній послідовності і утворюють сліди в напрямку течії рідини (див. рис. 4.6). На рис. 5.32 наведено профілі обробленої поверхні вздовж (а) і впоперек (б) цих слідів, коли обробленим матеріалом є сталь 5ХНТ, ЕІ – МПГ-7, робоча рідина – гас і масло “Індустріальне-12” по 50%, $I = 350\text{А}$ і $P_d = 0,3\text{МПа}$. Наведені профілі дозволяють зробити висновок, що мікрорельєф обробленої поверхні вздовж і впоперек слідів явно відрізняється, а шорсткість поверхні в поперечному напрямку помітно більша шорсткості в поздовжньому.

Шорсткість обробленої поверхні значною мірою визначається матеріалом і полярністю електродів. На рис. 5.33 наведено профілі обробленої поверхні для випадку застосування ЕІ із матеріалу МПГ-7 при прямій (а) і зворотній (б) полярності коли оброблюваним матеріалом є сталь 45, робоча рідина – масло “Індустріальне-12”, $I = 400\text{А}$ і $P_d = 0,3\text{МПа}$. На рис. 5.34 для тих же умов приведено профілі обробленої поверхні при прямій (а) і зворотній (б) полярності,

але при застосуванні ЕІ із сталі 45. Приведені профілі дозволяють зробити висновок, що при використанні ЕІ з матеріалу МПГ-7 шорсткість обробленої поверхні значною мірою обумовлена полярністю електродів і при прямій полярності вона значно більша, ніж при зворотній. При застосуванні ЕІ із сталі 45 полярність електродів суттєво не впливає на шорсткість обробленої поверхні.

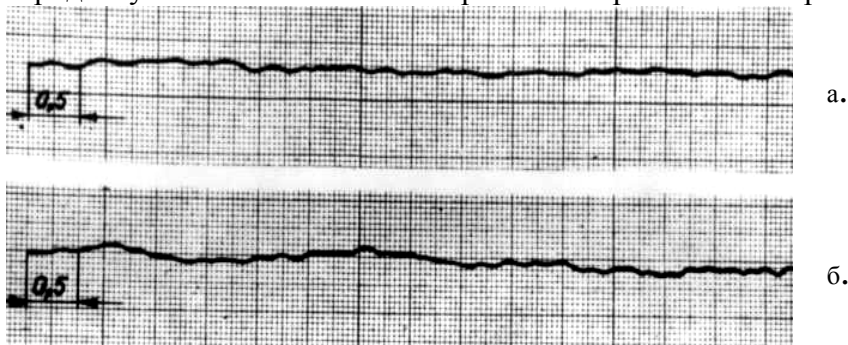


Рис. 5.32. Профіль обробленої поверхні вздовж (а) і поперек (б) слідів

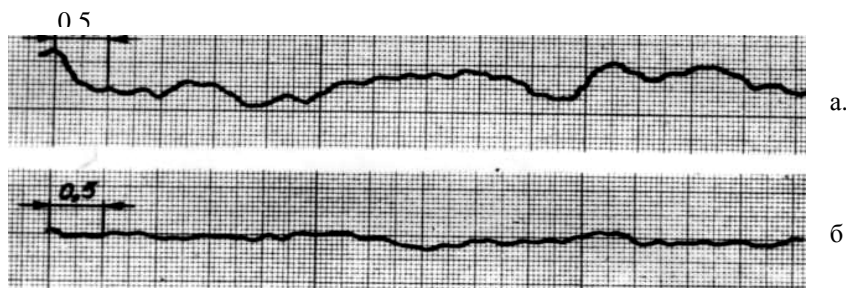


Рис. 5.33. Профіль обробленої поверхні при прямій (а) і зворотній (б) полярності при використанні ЕІ із матеріалу МПГ-7

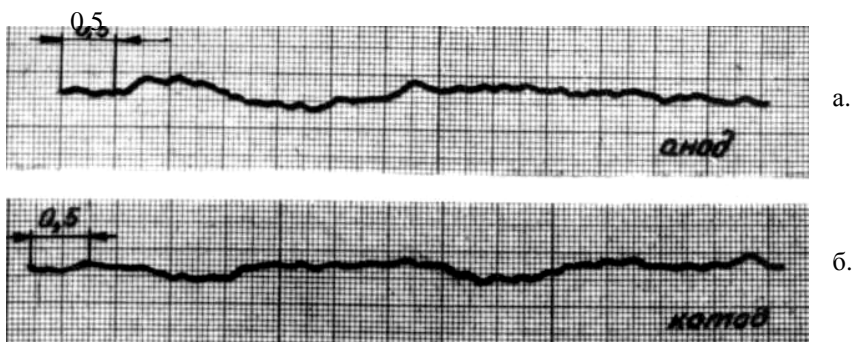


Рис. 5.34. Профіль обробленої поверхні сталі 45 при прямій (а) і зворотній (б) полярності при використанні ЕІ із сталі 45

В кінцевому підсумку, основними параметрами, що визначають шорсткість обробленої поверхні є струм обробки і динамічний тиск потоку рідини. На рис. 5.35 показано залежність шорсткості обробленої поверхні сталі 5ХНТ від I та P_d при використанні в якості робочої рідини гасу (50%) і масла "Індустріальне-12" (50%) при застосуванні ЕІ з матеріалу МПГ-7 при $I = 5 \dots 1000 \text{ A}$, $P_d = 0,01 \dots 0,5 \text{ МПа}$ і при зворотній полярності електродів, яка визначається за формулою, мкм:

$$R_a = 2,32 \cdot 10^3 \cdot I^{0,17} \cdot P_d^{-0,55} \quad (5.14)$$

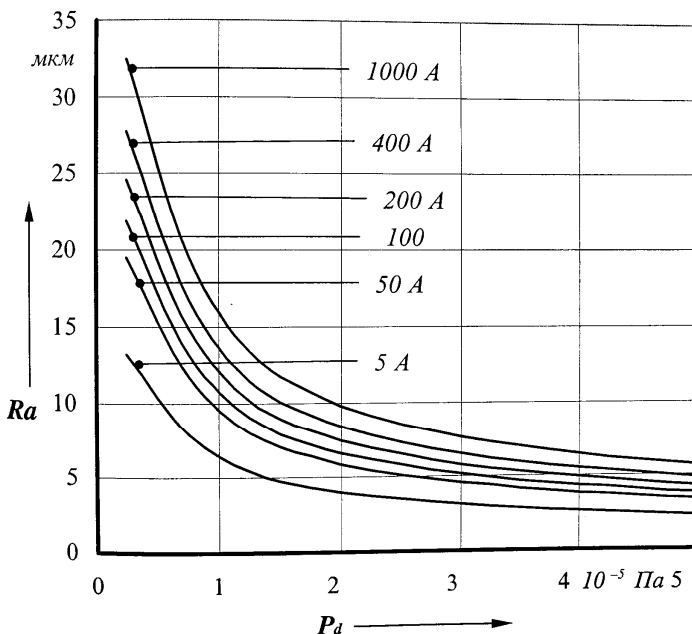


Рис. 5.35. Залежність шорсткості обробленої поверхні R_a від I і P_d

Отримана залежність дає підстави зробити висновок, що в діапазоні зазначених режимів обробки шорсткість обробленої поверхні залежить перш за все від динамічного тиску потоку робочої рідини і менше від струму обробки. При зменшенні струму обробки до кількох ампер шорсткість обробленої поверхні різко зменшується, при цьому якість обробки не поступається досягнутій при електроіскровій обробці.

На рис. 5.36 та 5.37 показано залежності шорсткості обробленої поверхні R_a від I та P_{cm} відповідно для сплаву ВТЗ-1 і сталі 45, які визначаються за формулами, мкм:

$$R_a = 7,18 \cdot 10^8 \cdot I^{0,8} \cdot P_{cm}^{1,49} \quad (5.15)$$

$$R_a = 2,6 \cdot 10^5 \cdot I^{0,28} \cdot P_{cm}^{-0,84} \quad (5.16)$$

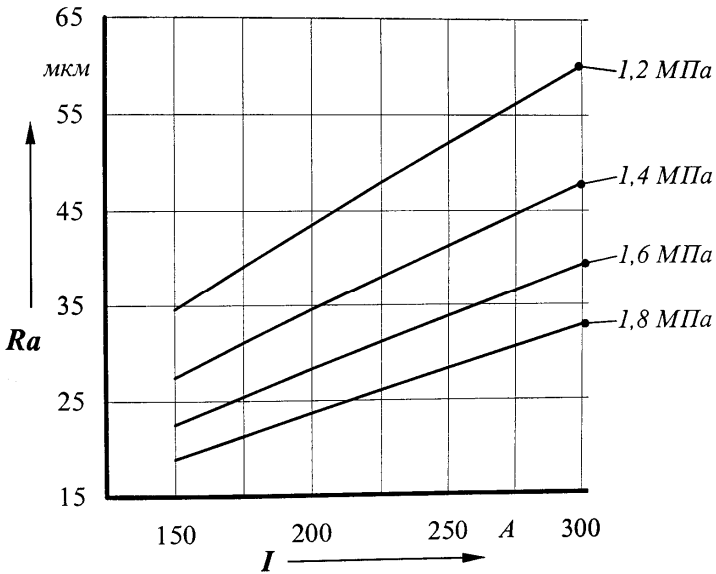


Рис. 5.36. Залежність шорсткості обробленої поверхні R_a від I і P_{cm} для сплаву ВТЗ-1

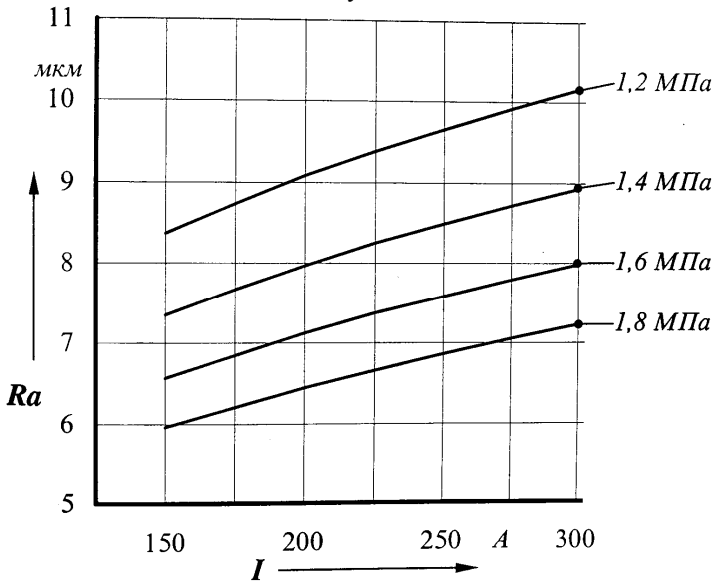


Рис. 5.36. Залежність шорсткості обробленої поверхні R_a від I і P_{cm} для сталі 45

Отримані залежності дозволяють зробити висновок, що порівняно зі сталлю 45 шорсткість обробленої поверхні сплаву ВТЗ-1 значно вища, вона при збільшенні I зростає більше і ще більше це помітно при зменшенні P_{cm} . В умовах експерименту порівняно зі сталлю 45 шорсткість обробленої поверхні сплаву ВТЗ-1 в 3,3...4,7 рази більша при відносно високих значеннях P_{cm} і в 4,7...6,1 рази більша при відносно низьких значеннях P_{cm} .

Внаслідок теплової дії розряду поверхневі шари металу зазнають структурних змін, утворюючи зону термічного впливу. Глибина, склад і твердість цієї зони визначаються енергетичними характеристиками дуги (якістю джерел тепла на електродах), які, як це було показано, в умовах РОД регулюються в широких межах за рахунок зміни динамічного тиску потоку робочої рідини P_d . Тому можна очікувати, що за рахунок зміни P_d в широких межах повинні регулюватись також і глибина, структура та твердість зони термічного впливу.

На рис. 5.38 показано мікроструктуру обробленої поверхні сталі 5ХНТ при використанні в якості робочої рідини гасу (50%) і масла “Індустріальне-12” (50%), при застосуванні ЕІ з матеріалу МПГ-7, при $I=400\text{А}$ і $P_d=0,1\text{МПа}$ при зворотній полярності електродів. На рис. 5.39, 5.40, 5.41 для тих же умов приведено мікроструктури обробленої поверхні сталі 5ХНТ, але відповідно при $P_d=0,2\text{МПа}$, $P_d=0,35\text{МПа}$ і $P_d=0,5\text{МПа}$. На рис. 5.42 показано мікроструктуру обробленої поверхні сталі 20 при використанні в якості робочого середовища водопровідної води, при застосуванні латунного електрода, при $I=300\text{А}$, $P_d=0,4\text{МПа}$ і при прямій полярності електродів. На рис. 5.43 показано мікроструктуру обробленої поверхні сплаву алюмінію з хромом (10% Cr) при використанні в якості робочої рідини водопровідної води, при застосуванні алюмінієвого електрода, при $I=300\text{А}$, $P_d=0,3\text{МПа}$ і при прямій полярності електродів.

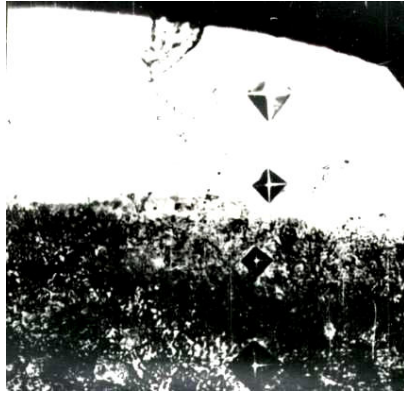


Рис. 5.38. Мікроструктура обробленої поверхні сталі 5ХНТ (x 500)

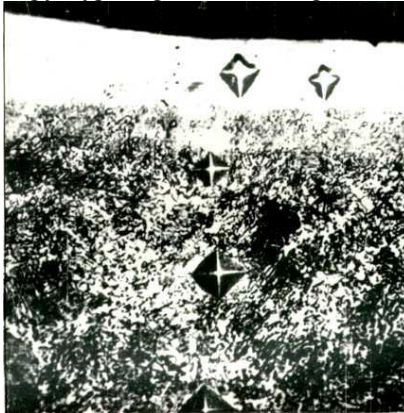


Рис. 5.39. Мікроструктура обробленої поверхні сталі 5ХНТ (x 500)



Рис. 5.40. Мікроструктура обробленої поверхні сталі 5ХНТ (x 500)

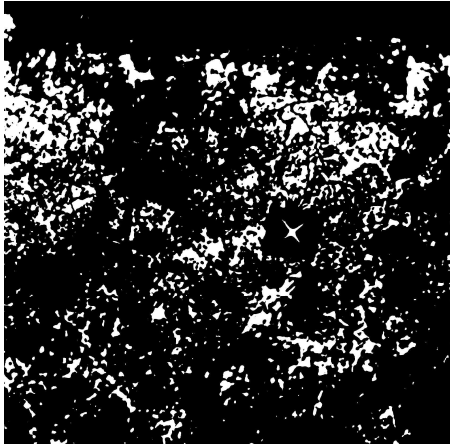


Рис. 5.41. Мікроструктура обробленої поверхні сталі 5ХНТ (x 500)

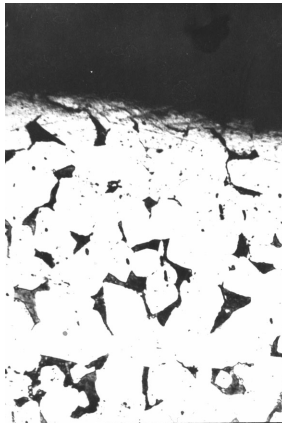


Рис. 5.42. Мікроструктура обробленої поверхні сталі 20 (x500)

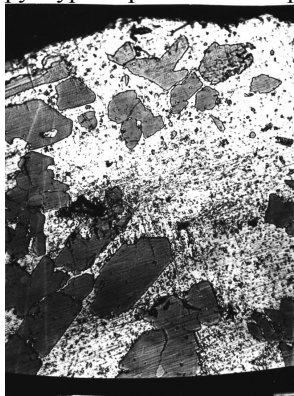


Рис. 5.43. Мікроструктура обробленої поверхні сплаву алюмінію з хромом (10% Cr) (x500)

Наведені мікроструктури показують, що глибина, структура і твердість зони термічного впливу, легко регулюються за рахунок зміни динамічного тиску потоку робочої рідини. Так, глибина зони термічного впливу може складати десяті долі міліметра (див. рис. 5.38) або бути відсутньою взагалі (див. рис. 5.41, 5.42, 5.43). Зона термічного впливу може являти собою білий шар (див. рис. 5.38) зі змінною по глибині твердістю ($H_{50} = 4,8; 5,3; 7,7; 2,3$ ГПа) і може мати структуру, характерну для гарту і відрізняється дуже високою твердістю – до $H_{50} = 9$ ГПа (див. рис. 5.40).

На рис. 5.44 показано залежність глибини зони термічного впливу H сталі 5ХНТ від I і P_d при використанні в якості робочої рідини гасу (50%) і масла “Індустріальне-12” (50%), при застосуванні ЕІ з матеріалу МПГ-7, при $I = 100 \dots 1000$ А, $P_d = 0,01 \dots 0,5$ МПа і при зворотній полярності електродів, що визначається за формулою, мкм:

$$H = 99,41 \cdot 10^6 \cdot I^{0,28} \cdot P_d^{-1,49} \quad (5.17)$$

Отримана залежність дозволяє зробити висновок, що в діапазоні зазначених режимів обробки глибина зони термічного впливу залежить перш за все від динамічного тиску потоку рідини і менше від струму обробки.

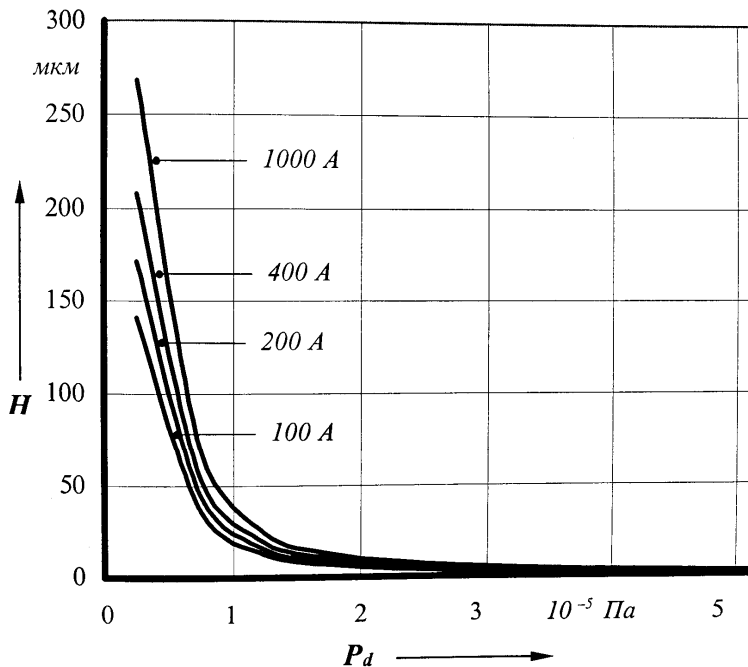


Рис. 5.44. Залежність глибини зони термічного впливу H від I і P_d

На рис. 5.45 і 5.46 показано залежності глибини зони термічного впливу H відповідно для сплаву ВТЗ-1 і сталі 45 від струму I і статичного тиску робочої рідини на вході в міжелектродний зазор P_{cm} , які визначаються за відповідними формулами, мкм:

$$H = 30168 \cdot I^{0,48} \cdot P_{cm}^{-0,7} \quad (5.18)$$

$$H = 2435,33 \cdot I^{0,48} \cdot P_{cm}^{-0,7} \quad (5.19)$$

Отримані залежності дозволяють зробити висновок, що глибина зони термічного впливу сплаву ВТЗ-1 порівняно зі сталлю 45 збільшується при збільшенні I дещо менше, а при збільшенні P_{cm} зменшується дещо більше. Так, порівняно зі сталлю 45 в умовах експерименту глибина зони термічного впливу сплаву ВТЗ-1 в 1,7 рази менша при відносно малих струмах і в 2,1 рази менша при більших значеннях струму і, відповідно в 1,8 рази менша при відносно малих P_{cm} і в 2,3 рази менше при більших P_{cm} . Зона термічного впливу сплаву ВТЗ-1 являє собою світлий шар, що не підлягає травленню і який за даними рентгеноструктурного аналізу складається з α -фази (структури гарту). Мікротвердість зони термічного впливу коливається в межах $H_{50} = 5,8 \dots 8$ ГПа.

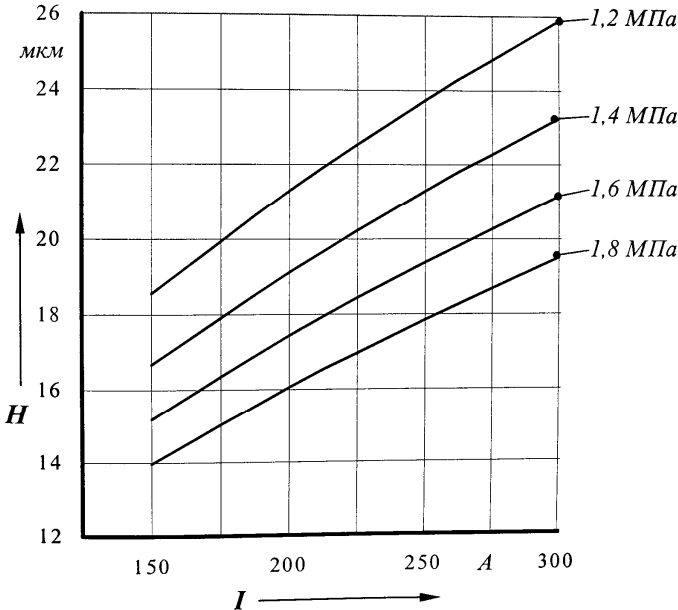


Рис. 5.45. Залежність глибини зони термічного впливу H від I і P_{cm} для сплаву ВТЗ-1

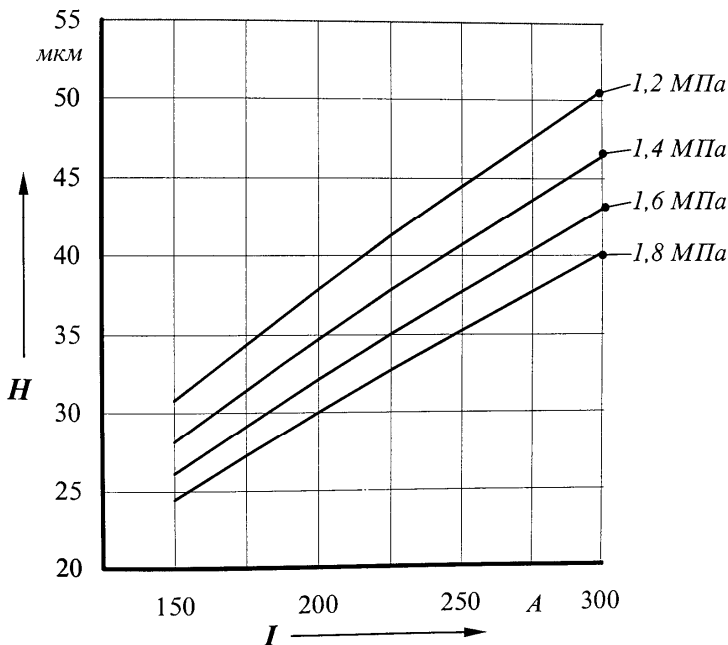


Рис. 5.46. Залежність глибини зони термічного впливу H від I і P_{cm} для сталі 45

5.4. Електроди-інструменти

Вартість і стійкість ЕІ значною мірою визначають ефективність і економічну доцільність реалізації процесу РОД. ЕІ для РОД виготовляються з тих же матеріалів і забезпечують таку ж стійкість, як і при відомих способах ЕРО. Зокрема, ЕІ можуть бути виготовлені із графітізованих матеріалів, наприклад, марки МПГ-7, сталі, сірого чавуну, міді, латуні, алюмінієвих сплавів і т. і., а їх об'ємний знос може коливатись в межах від сотих і десятих часток відсотка до 100% і більше.

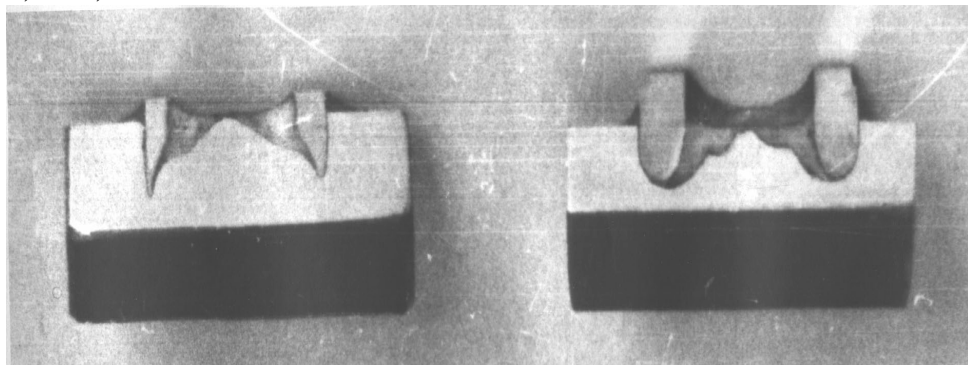
Зупинимось на деяких особливостях зносу ЕІ в умовах РОД стосовно копіювально-прошивних операцій. Стійкість ЕІ є функцією таких параметрів процесу, як матеріал і полярність електродів, склад і динамічний тиск потоку робочої рідини, напруга і струм розряду, міжелектродний зазор, форма і розміри електродів, гідродинамічний режим течі робочої рідини, який змінюється на різних ділянках електрода і т. і.

Звичайно металеві електроди мають порівняно невисоку стійкість (за виключенням електродів на основі вольфраму), їх об'ємний знос звичайно не менше 20...30% і тому застосування таких

електродів доцільне лише в тих випадках, коли їх знос не впливає на точність отриманих деталей, наприклад, при прошиванні наскрізних отворів, або ж коли це викликано технологічною необхідністю. Так, наприклад, при обробці твердих сплавів ЕІ із сірого чавуну забезпечують добру якість і високу продуктивність процесу.

Зазначимо, що на стійкість і на характер зносу металевих електродів значно впливає полярність електродів. Наприклад, стійкість латунних електродів при обробці сталей при прямій полярності приблизно в три рази вища, ніж при зворотній. Різним при зміні полярності є також характер зносу металевих ЕІ. Це відображено на рис. 5.47, де показано металеві ЕІ в оброблених заготовках при прямій (а) і зворотній (б) полярності.

Найбільш високу стійкість, аналогічно як і при відомих способах ЕРО, забезпечують ЕІ із графітізованих матеріалів типу МПГ-7 при застосуванні в якості робочих середовищ нафтопродуктів (масло, гас і т. і.) і при зворотній полярності електродів. За цих умов об'ємний знос ЕІ залежить від струму обробки I , напруги дуги U , динамічного тиску робочого середовища P_a , геометрії та розмірів ЕІ і т.і., являє собою складну функцію зазначених параметрів, визначається для конкретних прикладів реалізації експериментально і складає звичайно 0,5...1,5%.



а.

б.

Рис. 5.47. Металеві ЕІ в оброблених заготовках при прямій (а) і зворотній (б) полярності

При реалізації технологічної схеми формоутворення за принципом прошивання з об'ємним копіюванням форми ЕІ останній

за визначених умов отримує нерівномірний знос. Залежно від режимів обробки слід розрізняти три основні схеми зносу ЕІ із матеріалу МПГ-7 при застосуванні в якості робочого середовища нафтопродуктів:

1. При порівняно невеликих значеннях динамічного тиску потоку робочої рідини ($P_d < 0,1\text{МПа}$) спостерігається незначна зміна робочого контуру ЕІ (рис. 5.48, а).

2. При досить великих значеннях динамічного тиску потоку робочої рідини ($P_d > 0,1\text{МПа}$) при застосуванні в якості робочого середовища масла типу “Індустріальне-12” спостерігається закруглення кутів ЕІ (рис. 5.48, б), причому чим більший струм, тим більше це себе виявляє.

3. При досить великих значеннях динамічного тиску потоку робочої рідини ($P_d > 0,1\text{МПа}$) при застосуванні в якості робочого середовища суміші типу гас (50%) і масло “Індустріальне-12” (50%) кути закруглюються незначно, проте спостерігається нерівномірний знос та помітно змінюється робочий контур ЕІ (рис. 5.48, в), причому тим більше, чим більше P_d , що пояснюється різними гідродинамічними режимами течі робочої рідини як по довжині, так і по висоті міжелектродного зазору, особливо на ділянках переходу від вертикальних поверхонь до горизонтальних (див. рис. 4.4).

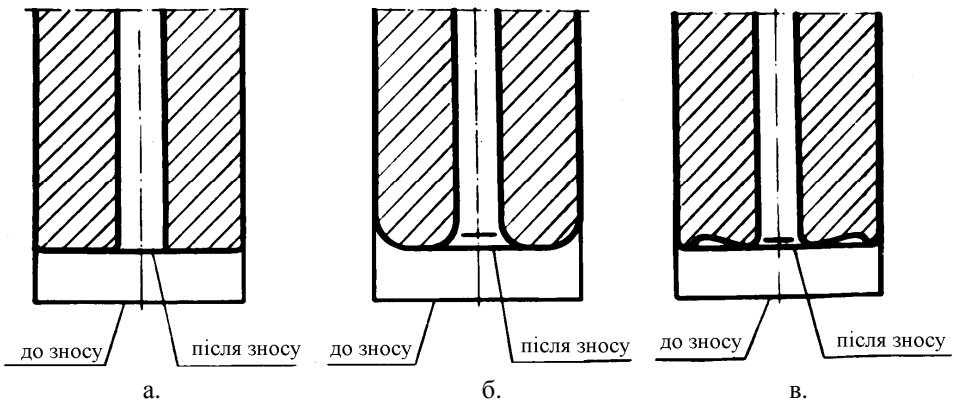


Рис. 5.48. Основні схеми зносу ЕІ із матеріалу МПГ-7

Зазначимо, що приведені три основні схеми зносу ЕІ із матеріалу МПГ-7 знаходять пояснення, якщо звернутись до відомої

моделі ерозійної стійкості ЕІ [144, с.19...23], згідно якої, зокрема, “відомий факт підвищення зносу при наявності прокачки може бути пояснено не тільки механічним руйнуванням плівки частками, що рухаються, але й порушенням в районі “гнізда” балансу необхідних продуктів ерозії” [144, с.23].

Профіль формоутворюючої поверхні ЕІ будується згідно технологічних схем формоутворення, режимів обробки та схеми утворення міжелектродних зазорів. Розрахунок геометричної (розмірної) корекції ЕІ з врахуванням міжелектродного зазору, шорсткості поверхні та товщини зони термічного впливу здійснюється згідно існуючих методик ЕРО [144, с. 101...110]. При реалізації технологічної схеми формоутворення по принципу прошивання з об’ємним копіюванням форми ЕІ можна виділити дві характерні групи ЕІ: для отримання наскрізних отворів і для профілювання поверхонь об’ємного фасонного профілю. ЕІ для отримання наскрізних отворів виготовляються в вигляді стержнів, поперечні перерізи яких являють собою еквідистанти відповідних січень отвору, який отримують; при цьому відстань між поверхнею ЕІ та стінками отвору, що отримують, дорівнює міжелектродному зазору. При одержанні фасонних об’ємних поверхонь контури профілю ЕІ є еквідистантами відповідних контурів оброблених поверхонь, окреслених на відстані міжелектродного зазору.

Міжелектродний зазор в умовах РОД є функцією таких параметрів, як матеріал і полярність електродів, склад і динамічний тиск потоку робочої рідини, напруга і струм розряду, гідравлічний режим течії робочої рідини. На рис. 5.49 показано залежність величини міжелектродного зазору δ від I і P_d при обробці сталі 5ХНТ ЕІ із матеріала МПГ-7 при напрузі на дузі $U_0 = 40\text{В}$, при використанні в якості робочої рідини гасу (50%) і масла “Індустріальне-12” (50%), при $I = 100...400\text{А}$, $P_d = 0,01...0,5\text{МПа}$ і при зворотній полярності електродів, що визначається за формулою, мкм:

$$\delta = 29195,12 \cdot I^{0,13} \cdot P_d^{-0,54} \quad (5.20)$$

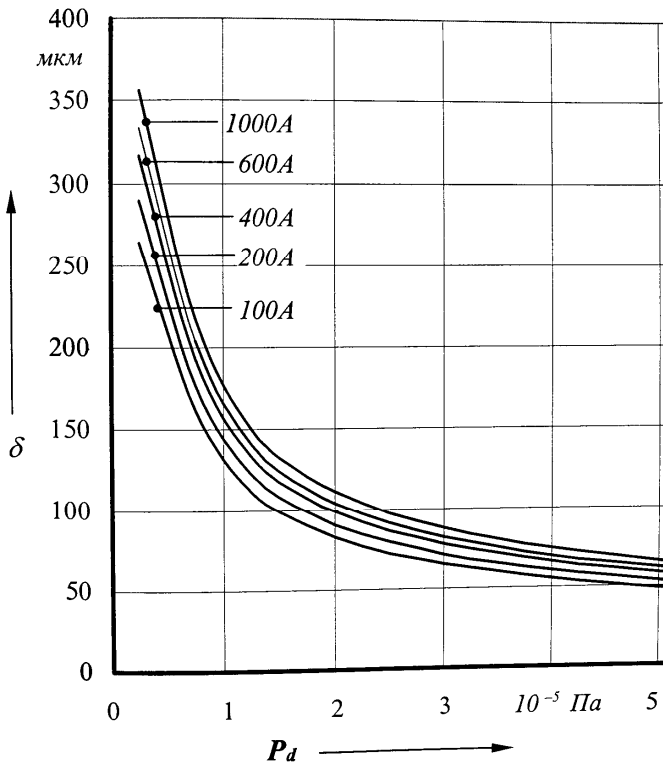


Рис. 5.49. Залежність міжелектродного зазору δ від I і P_d

Для прокачування робочої рідини в ЕІ передбачаються спеціальні отвори. При отриманні наскрізних отворів поперечні розміри отворів в ЕІ треба приймати по можливості більшими з тим, щоб зменшити об'єм матеріалу, що руйнується, і таким чином підвищити економічність і продуктивність процесу. Проте, при цьому зменшується товщина стінок ЕІ, яка не може бути менше 3...5мм, оскільки помітно знижується стійкість останнього.

При отриманні фасонних поверхонь поперечні розміри отворів в ЕІ повинні бути по можливості мінімальними. Проте при занадто малих розмірах отворів різко зростає потрібний тиск робочої рідини, що не бажано. Тому розміри цих отворів приймаються такими, щоб їх гідравлічний опір при визначених витратах робочої рідини не був значним, а статичний тиск робочої рідини на вході в міжелектродний зазор не перевищував 1,5...2МПа. Отвори треба, по можливості, розташовувати по центру ЕІ, що забезпечує сприятливий гідродинамічний режим течі робочої рідини і оптимальні умови протікання процесу.

За формою отвори ЕІ можуть бути круглими (рис. 5.50. а), прямокутними (рис. 5.50. б) і фасонними (рис. 5.50. в). Перевагу мають круглі отвори, оскільки їх легко отримати. Проте їх можна застосовувати лише для ЕІ круглих і квадратних в плані та близьких до них за формою, коли два поперечних розміри ЕІ приблизно однакові або ж відрізняються незначно (не більше ніж в 1,5...2 рази). Прямокутні отвори (щілини) застосовують для ЕІ видовжених в плані форм. Фасонні отвори застосовують для фасонних в плані ЕІ, коли для забезпечення приблизно однакового гідравлічного режиму течії рідини на різних ділянках отвору чи порожнини, що отримують, контур отвору в ЕІ повинен, хай спрощено, повторити контур останнього.

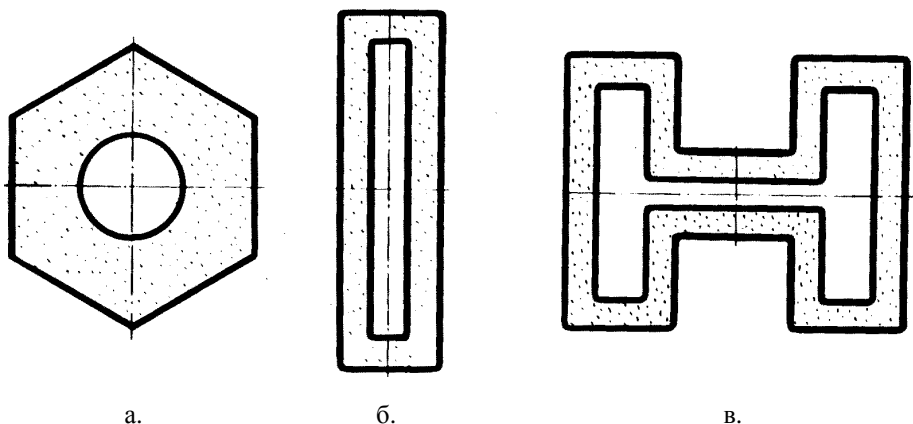


Рис. 5.50. Отвори в ЕІ

Розрахунки та виготовлення ЕІ для РОД здійснюється, певною мірою, як при відомих способах ЕРО [195, с.101...188]. Так, наприклад, виконавчі розміри ЕІ для внутрішніх контурів (отворів) B_o та зовнішніх контурів (стержнів) B_c визначають за формулами:

- чистова обробка
$$B_o = (A + 0,7\Delta_e - 2\delta_2)^{+0,3\Delta_e} \quad (5.21)$$

- чорнова обробка
$$B_o \leq (A + 0,7\Delta_e - 2(\delta_1 + z_{\min}))^{+0,3\Delta_e} \quad (5.22)$$

- чистова обробка
$$B_c = (A - 0,7\Delta_n + 2\delta_2)^{-0,3\Delta_n} \quad (5.23)$$

- чорнова обробка
$$B_c \leq (A - 0,7\Delta_n + 2(\delta_1 + z_{\min}))^{-0,3\Delta_n} \quad (5.24)$$

де A – номінальний розмір деталі; δ_1 , δ_2 – міжелектродний зазор, відповідно при чорновій і чистовій обробці; z_{\min} – мінімальний припуск на обробку.

5.5. Точність обробки

Відхилення обробленої поверхні від вихідного профілю ЕІ в загальному вигляді може бути представлено як сума чотирьох відхилень в заданому напрямку:

$$\Delta_{\text{сум}} = \Delta_{\text{е}} + \Delta_{\text{т}} + \Delta_{\text{нал}} + \Delta_{\text{ер}} \quad (5.25)$$

де $\Delta_{\text{е}}$ – відхилення, що обумовлене неточністю виготовлення верстата і деформаціями його вузлів при роботі;

$\Delta_{\text{т}}$ – відхилення, що викликане тепловими деформаціями ЕІ і ЕЗ;

$\Delta_{\text{нал}}$ – відхилення, яке обумовлене неточністю взаємного розташування (наладки) ЕІ і ЕЗ;

$\Delta_{\text{ер}}$ – відхилення, що пов'язане з процесом ерозії.

Оцінимо точність обробки в умовах РОД стосовно копіювально-прошивних операцій.

Відхилення $\Delta_{\text{е}}$ викликано геометричною неточністю верстату та деформаціями при його роботі. Похибки, що викликані неточністю виготовлення верстата, можуть бути оцінені за нормами на геометричну точність верстата і, наприклад, для середніх глибин прошивання при звичайній точності виготовлення електроерозійних копіювально-прошивних верстатів для горизонтальних розмірів складають 0,01мм. Похибки, які викликані деформаціями вузлів верстата при його роботі, визначаються жорсткістю стола, станини і інструментальної головки і при застосуванні раціональної конструкції не будуть перевищувати 0,02мм.

Похибки, що викликані тепловими деформаціями ЕІ та заготовки $\Delta_{\text{т}}$ можуть бути значно зменшені при охолодженні робочої рідини і аналогічно, як і при відомих способах ЕРО [143, с.97], наприклад, при довжині обробленої поверхні 200мм орієнтовно складають 0,01мм.

Похибки, що викликані неточністю установки (наладки) ЕІ $\Delta_{\text{нал}}$, при застосуванні відповідних технологічних прийомів складають 0,01...0,02 мм [143, с.98].

Похибки, що пов'язані з особливостями процесу ерозії, обумовлені коливаннями величини міжелектродного зазору та зносом ЕІ. Коливання величини міжелектродного зазору пов'язані перш за все з коливаннями основних параметрів процесу (складу і швидкості потоку робочої рідини, напруги і струму обробки) на різних ділянках міжелектродного зазору і можуть досягати 0,05 мм і більше. Відхилення, які викликані ерозійним зносом ЕІ, аналогічно як і при

відомих способах ЕРО, можуть бути заздалегідь враховані і шляхом раціональної побудови процесу обробки [144, с. 138] зведені до значень, що суттєво не впливають на точність обробки, наприклад, до 0,02мм.

Фасонні поверхні, як відомо, задаються комбінацією горизонтальних та вертикальних розмірів. Відповідно, точність обробки визначається похибками цих розмірів. Сумарна похибка горизонтальних розмірів більше загальної похибки вертикальних розмірів [143, с. 100]. Тому точність обробки може бути визначена виходячи із сумарної похибки горизонтальних розмірів [143, с. 101] згідно виразу:

$$\Delta_{\text{сум}} = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \dots + \Delta_n^2} \quad (5.26)$$

де $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ – складові сумарної похибки.

Величина допуску на оброблену деталь повинна бути більшою можливих похибок процесу обробки $\Delta_{\text{сум}}$ і похибок розмірів ЕІ $\Delta_{\text{ел}}$, що виникають при його виготовленні. Тоді допуск на деталь може бути визначено [143, с.102] згідно виразу:

$$f = \sqrt{\Delta_{\text{сум}}^2 + \Delta_{\text{ел}}^2} \quad (5.27)$$

Величину допуску на ЕІ доцільно вибирати в межах 30...50% від величини похибки, що виникає в процесі обробки [143, с.102].

Використовуючи наведені вище дані та вираз (5.3), отримуємо, що точність обробки в умовах РОД стосовно копіювально-прошивних операцій при розмірах оброблених поверхонь до 100мм коливається в межах 0,02...0,2мм, що відповідає звичайній точності інструментальних робіт.

5.6. Розробка технологічних процесів

Область раціонального застосування РОД поширюється на ті технологічні процеси, які забезпечують, порівняно з відомими традиційними способами металообробки більш високу продуктивність і меншу собівартість. Найбільш ефективно на сьогодні використовувати РОД для копіювально-прошивних операцій. Розробка технологічних процесів РОД здійснюється аналогічно, як і при відомих способах ЕРО [144, с. 43...44], але з врахуванням ряду особливостей.

Вихідними даними при розробці технологічного процесу РОД є креслення деталі; технічні вимоги на неї, наприклад, наявність та

величина зони термічного впливу, необхідність вибіркового чи стовідсоткового контролю деталей і т.і.; серійність; необхідний штучний час; умови роботи деталі, які можуть бути корисними при вирішенні питання про зміну конструкції деталі з метою спрощення її виготовлення і т.і.

Розробка технологічного процесу РОД включає в себе наступні етапи.

5.6.1. Вибір, а при необхідності проектування обладнання для РОД, яким можуть бути універсальні копіювально-прошивні верстати, наприклад "Дуга-8", спеціальні верстати, наприклад "Дуга-13", або ЕЕГ до металорізальних верстатів, наприклад АМН-1.

5.6.2. Розробка креслення деталі, яку треба отримати після РОД.

5.6.3. Розробка креслення заготовки (деталі до РОД) з врахуванням припусків і напусків на обробку, та визначення схеми базування, установки і кріплення заготовки.

5.6.4. Вибір матеріалу електрода [144, с. 66...101] і виду робочої рідини [144, с. 44...47].

5.6.5. Вибір, а при необхідності розробка технологічних схем формоутворення (див. 5.1) та вибір технологічних операцій і їх послідовності.

5.6.6. Розрахунки та проектування ЕІ [див. 5.4, 144, с. 48...155].

5.6.7. Вибір режимів РОД.

5.6.8. Проектування пристроїв РОД.

5.6.9. Вибір способів контролю та вимірювального інструменту.

5.6.10. Розрахунки норм часу на виготовлення деталі.

5.6.11. Складання технологічної карти РОД.

Склад робочої рідини, матеріал і полярність електродів визначаються технологічною необхідністю та експлуатаційною доцільністю і, можна вважати, є заданими. При виборі режимів обробки зручно користуватись номограмами. На рис. 5.51 показано номограму для вибору режимів РОД при обробці сталі 5ХНТ ЕІ із матеріалу МПГ-7 при зворотній полярності електродів і при використанні в якості робочої рідини масла "Індустріальне-12" (50%) і гасу (50%). Скористаємося приведеною номограмою для того, щоб показати основні особливості вибору режимів РОД.

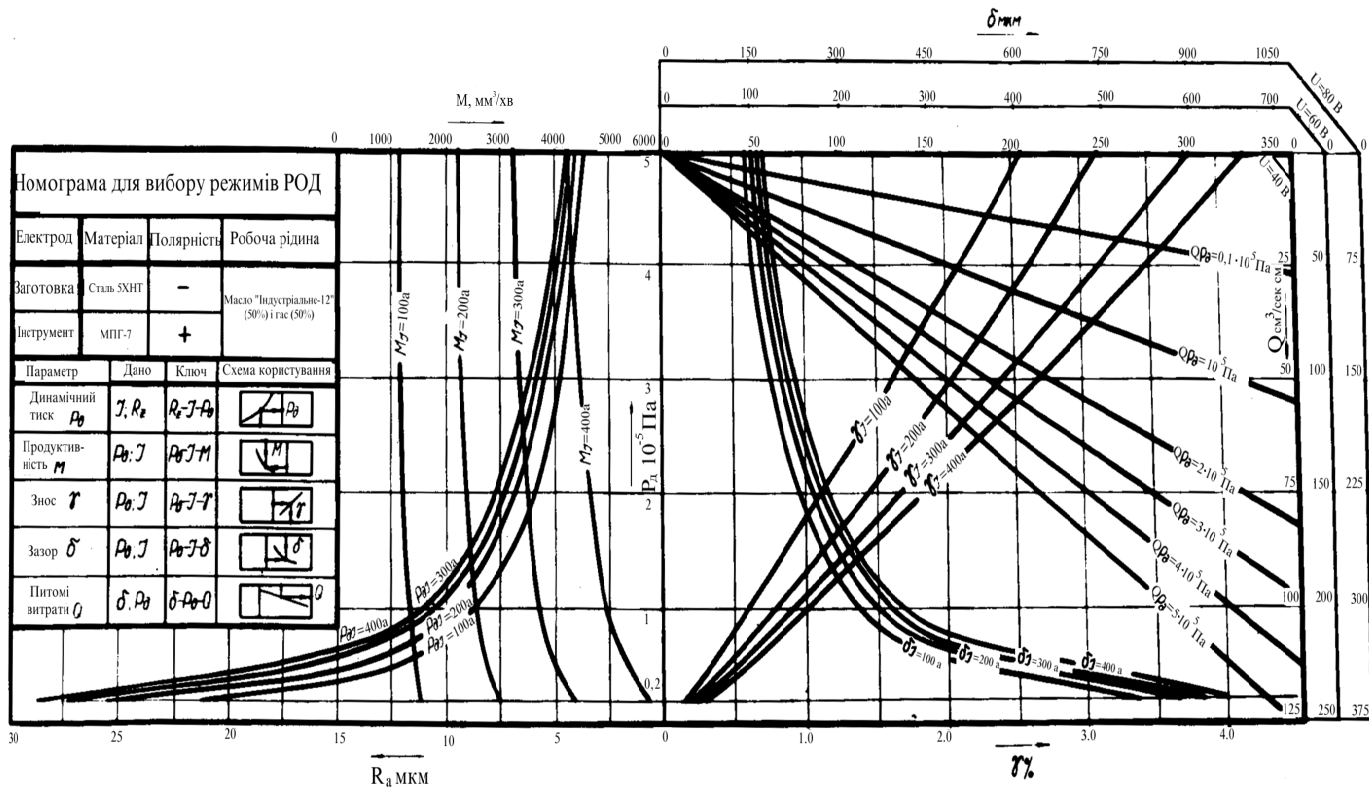


Рис. 5.51. Номограма для вибору режимів РОД

Перш за все вибирається струм обробки, який треба приймати по можливості максимальним, оскільки це забезпечує максимально досягну в даних умовах продуктивність. Струм обробки може обмежуватись або можливостями техніки, яка застосовується, або ж, як це зазначалось (див. 5.2), малою площею поперечного перерізу ЕІ. Потім вирішується питання якості обробки (шорсткості обробленої поверхні та зони термічного впливу). По заданому струму I і шорсткості обробленої поверхні R_a вибирається динамічний тиск потоку робочої рідини P_d . Надалі по заданому I і вибраному P_d визначається продуктивність процесу M . Потім вибирається напруга дуги U . В самому загальному випадку обробку треба здійснювати при мінімально можливих напругах дуги $U = 25...30\text{В}$. Проте в ряді випадків напругу дуги треба збільшувати. Так наприклад, якщо треба видалити стержневий виступ "А" (рис. 5.52, а), який звичайно повторює контур отвору ЕІ при $U = 25...30\text{В}$, напругу дуги необхідно збільшити до $U = 50..70\text{В}$. В результаті такий виступ руйнується (рис. 5.52, б). По вибраних P_d і U визначається величина міжелектродного зазору δ , а також визначається витрата робочої рідини Q на 1см довжини периметра отвору чи порожнини, які отримують. Знос ЕІ визначається вибраними P_d та I .

При розробці технологічних процесів РОД, як і при відомих способах ЕРО, треба враховувати, що в ряді випадків з метою забезпечення оптимального поєднання кількісних та якісних характеристик процесу обробку доцільно здійснювати в два етапи: спочатку здійснюється попередня високопродуктивна, чорнова обробка при малому динамічному тиску потоку робочої рідини $P_d = 0,05...0,1\text{МПа}$ і при максимально можливих струмах, залишаючи припуск менше 1мм на подальшу завершальну, чистову обробку при $P_d = 0,1...0,4\text{МПа}$ і більше та при мінімально можливих струмах.

Певний практичний інтерес, перш за все для прошивання отворів і порожнин, являє комбінована електрообробка, коли для попередньої, чорнової обробки використовується РОД з припуском менше 1 мм на подальшу чистову електрохімічну обробку (ЕХО). Це дозволяє повною мірою реалізувати переваги РОД і ЕХО та усунути їх недоліки, забезпечує оптимальне поєднання кількісної та якісної сторін процесу обробки (високу продуктивність і малу енергоємність процесу в поєднанні з високою якістю поверхні і високою точністю розмірів).

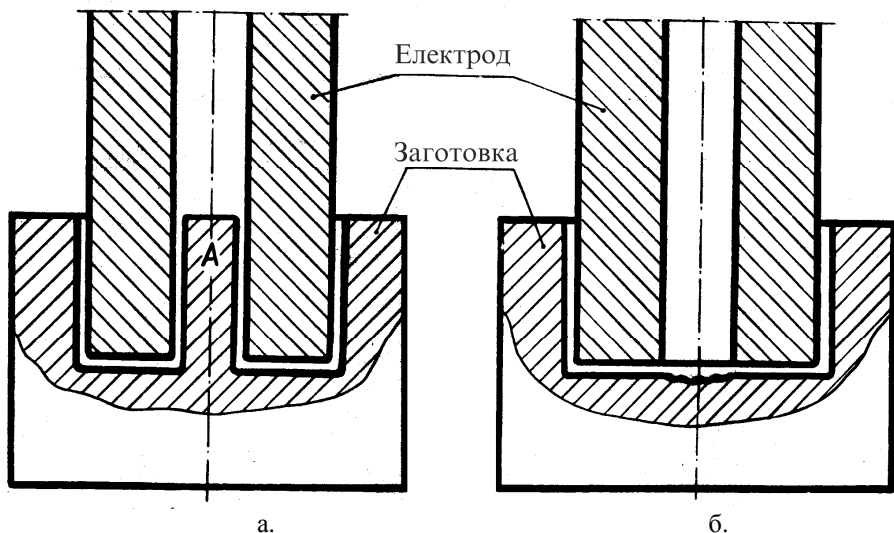


Рис. 5.52. Прошивка зі збереженням (а) і видаленням (б) стержневого виступу

Таку комбіновану електрообробку можна здійснити двома шляхами. По-перше, процеси РОД і ЕХО можна реалізувати послідовно на різних верстатах. І, по-друге, в ряді випадків, наприклад, при прошиванні наскрізних отворів, РОД і ЕХО доцільно здійснювати послідовно на одному і тому ж верстаті, з однієї установки заготовки, з використанням одного і того ж електрода і, навіть більш того, з використанням одного і того ж джерела живлення технологічним струмом (оскільки для РОД використовуються джерела живлення струмом із зовнішньою падаючою характеристикою) з тією лише різницею, що РОД здійснюється в потоці середовища-діелектрика, а ЕХО - в потоці електроліту [71].

Така комбінована електрообробка доцільна і легко здійснюється, оскільки технологічні схеми формоутворення РОД і ЕХО мають зовнішню схожість, а їх реалізація потребує приблизно однакових прийомів. Обумовлено це тим, що як в першому, так і в другому випадках обробку здійснюють в потоці рідини з тією лише різницею, що в першому випадку в якості робочої рідини використовується рідина-діелектрик, а в другому – рідина-електроліт.

5.7. Висновки

5.7.1. При забезпеченні основної фізичної умови реалізації процесу, яка полягає в тому, що обробку здійснюють електричною дугою в поперечному потоці середовища-діелектрика при динамічному тиску останнього не менше 1...2кПа, РОД дозволяє здійснити всі технологічні схеми формоутворення, характерні для обробки металів різанням (так звана обробка непрофільованим електродом) і, окрім того, технологічні схеми формоутворення, що, в відомих межах, наближені до схем обробки металів тиском, перш за все, схеми обробки поверхонь при прямолінійному поступальному русі ЕІ (або заготовки) за принципом прошивання з об'ємним копіюванням форми ЕІ (так звана обробка профільованим електродом).

5.7.2. В основу розробки технології РОД поставлено задачу забезпечення економічної ефективності процесу, розширення його раціонального застосування та підвищення конкурентоспроможності за рахунок оптимального поєднання кількісних та якісних характеристик процесу, коли при високій продуктивності способу, яка в 5...10 і більше разів перевищує продуктивність відомих способів ЕРО і наближується до продуктивності обробки різанням, забезпечується висока якість обробленої поверхні, що не поступається досягнутій при відповідних способах, при умові реалізації різноманітних технологічних схем формоутворення як профільованим, так і непрофільованим електродом.

5.7.3. Для реалізації конкретних технологій РОД та розробки відповідних технологічних схем формоутворень на підставі аналізу та узагальнень теоретичних і експериментальних досліджень і практичної реалізації процесу РОД викладено уніфіковані технологічні прийоми у вигляді переліку та опису способів реалізації процесу РОД.

5.7.4. Продуктивність обробки приблизно прямо пропорційна струму, який обмежується лише площею поперечного перерізу електрода і може досягти 1000А і більше, що забезпечує високу продуктивність, яка в багато разів перевищує продуктивність відомих способів ЕРО (десь на порядок і більше) при достатньо високій якості обробки (зоні термічного впливу в межах сотих долей міліметра і шорсткості поверхні R_a 6,3). Питомі витрати електроенергії є

головним чином функцією динамічного тиску потоку, зростають при збільшенні останнього і для сталей коливаються в межах $100...300 \text{кДж/см}^3$ ($3...10 \text{кВт}\cdot\text{г/кг}$), що приблизно вдвічі менше, ніж для відомих способів ЕРО.

5.7.5. Якість обробленої поверхні, що визначається її шорсткістю і глибиною зони термічного впливу, є головним чином функцією динамічного тиску потоку робочої рідини в зоні обробки і менше струму обробки і зростає при збільшенні динамічного тиску потоку і зменшенні струму. Глибина, структура і твердість зони термічного впливу легко регулюються за рахунок зміни динамічного тиску потоку. Так, глибина зони термічного впливу може досягати часток міліметра чи бути відсутньою взагалі. В цілому якість обробленої поверхні і точність розмірів не поступаються досягнутих при відомих способах ЕРО. Точність обробки в умовах РОД стосовно копіювально-прошивних операцій при розмірах обробленої поверхні до 100мм коливається в межах 0,02...0,2мм, що відповідає звичайній точності інструментальних робіт.

5.7.6. ЕІ виготовляються з тих же матеріалів і забезпечують приблизно таку ж стійкість, як і при відомих способах ЕРО. Профіль формоутворюючої поверхні ЕІ будується згідно схем формоутворення, режимів обробки та схем утворення міжелектродних зазорів, оптимальна величина яких коливається в межах 0,05...0,1 мм.

5.7.7. Розробка технологічних процесів РОД здійснюється аналогічно, як і при відомих способах ЕРО, але з врахуванням ряду особливостей процесу. Для вибору режимів обробки розроблено і описано номограми. Певний практичний інтерес, перш за все для прошивання отворів і порожнин, являє комбінована електрообробка, коли для попередньої, чорнової обробки використовується РОД з припуском менше 1мм на подальшу чистову ЕХО, що дозволяє повною мірою реалізувати переваги РОД і ЕХО та усунути їх недоліки.

6. ОБЛАДНАННЯ РОД

Фізичні умови реалізації процесу визначають основні елементи установки для РОД: власне верстат, що має станину, стіл, на якому кріпиться заготовка, інструментальну (електроерозійну) головку, в якій кріпиться електрод-інструмент і яка забезпечує підведення та відведення із зони обробки робочої рідини і реалізацію відповідної технологічної схеми формоутворення в цілому та різні механізми, що забезпечують рух відповідних елементів верстату; систему (станцію) живлення робочою рідиною; систему автоматичної подачі ЕІ; джерело живлення технологічним струмом. Розглянемо концепцію та особливості проектування верстатів РОД, їх конструктивні особливості, особливості зазначених складових елементів установки, а також типові моделі верстатів, що знайшли практичне застосування.

6.1. Концепція проектування верстатів РОД

Спосіб РОД принципово може бути реалізовано на діючих електроерозійних верстатах, які відрізняються тим, що процес здійснюють при повному зануренні заготовки, яка оброблюється, в ванну з робочою рідиною та при наявності порівняно з РОД малоінтенсивного прокачування робочої рідини. При реалізації процесу РОД в таких умовах та при використанні суцільного ЕІ (рис. 6.1.) існують проблеми підведення робочої рідини в зону обробки та забезпечення в цій зоні відповідних гідродинамічних характеристик потоку. Застосування ЕІ з отвором (рис. 6.2.) усуває, в відомих межах, ці недоліки і процес може бути реалізовано як при прямому прокачуванні (від центра до периферії ЕІ), так і з обмеженням по тиску робочої рідини (менше 0,1МПа) при зворотному прокачуванні. Останнє є суттєвим недоліком, оскільки саме при зворотному прокачуванні здійснюється РОД отворів і порожнин.

Окрім того недоліками використання в електроерозійних верстатах ванн з робочою рідиною є також складність їх конструкцій і конструкцій верстатів в цілому, збільшені габарити верстатів та їх металоємкість, а також незручність обслуговування і, відповідно, додаткові витрати допоміжного часу, зокрема на заповнення їх робочою рідиною, обмежені можливості встановлення і простого доступного базування та знімання деталі і т. і.

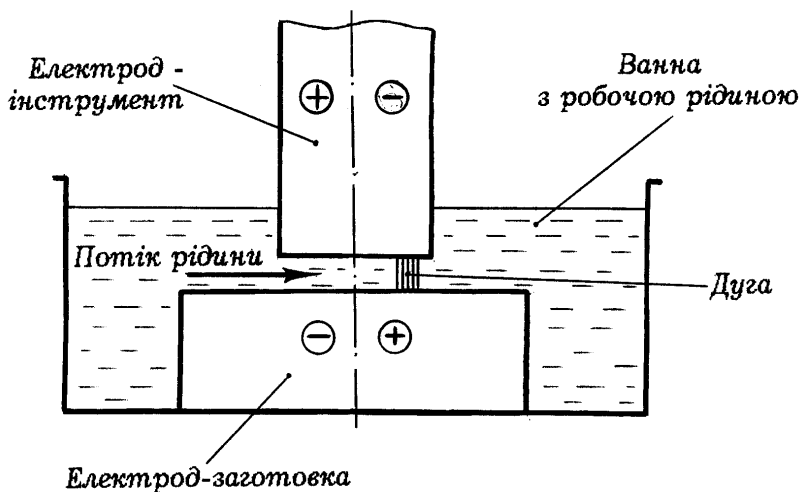


Рис.6.1. Принципова схема РОД суцільним ЕІ у ванні з робочою рідиною

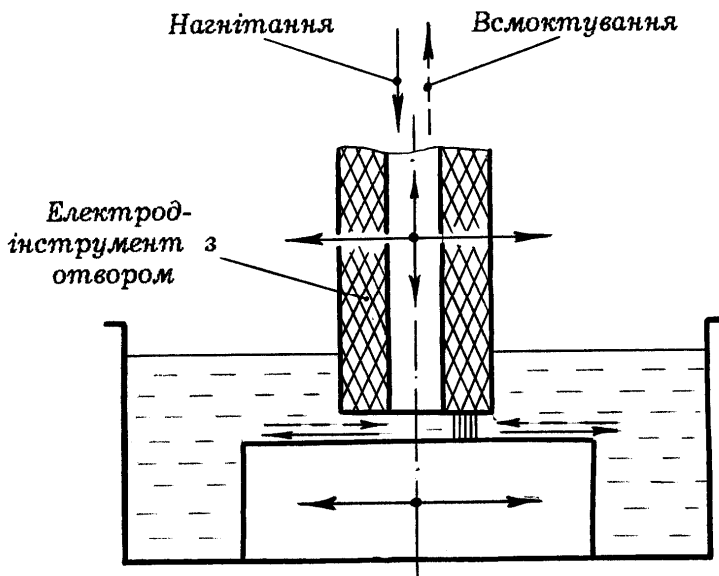


Рис. 6.2. Принципова схема РОД ЕІ з отвором у ванні з робочою рідиною

Вказані недоліки, по суті, є результатом неоптимального концептуального підходу до вирішення поставленої задачі, коли необхідність і достатність локального підведення робочої рідини в зону обробки (тобто в зону формоутворюючої поверхні електрода) в

діючих електроерозійних верстатах реалізується способом нелокального підводу робочої рідини в зону обробки за рахунок повного занурення заготовки в робочу зону ванни.

Тому при проектуванні верстатів РОД реалізовано концепцію локального підведення робочої рідини в зону обробки, для чого розроблено системний ряд ЕЕГ різноманітних конструкцій. Це дозволяє не тільки усувати зазначені недоліки електроерозійних верстатів, але й реалізувати процес РОД на будь-яких металорізальних верстатах без втрати останніми своїх основних функцій, що значно розширює їх технологічні можливості.

ЕЕГ являє собою пристрій, що забезпечує реалізацію процесу РОД за умови локального підведення в зону обробки робочої рідини та технологічного струму. Основним елементом ЕЕГ є локальна камера. На рис. 6.3. показано принципову схему верстата РОД. Привод з'єднано штоком з ЕІ, до якого від джерела живлення подається технологічний струм, а локальну камеру встановлено на штоку і з'єднано з системою подачі робочої рідини.

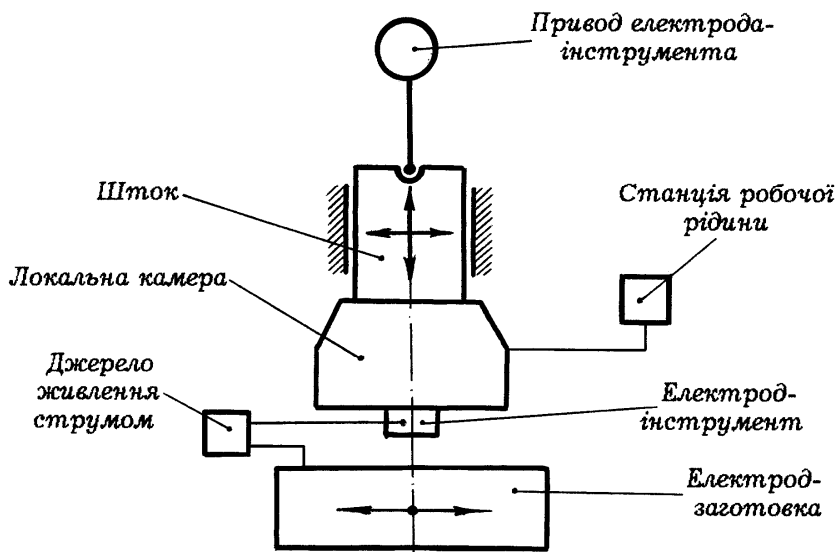


Рис. 6.3. Принципова схема верстата РОД

Конструкції ЕЕГ визначаються їх функціональним призначенням, перш за все, необхідністю реалізації відповідних технологічних схем формоутворення. Розглянемо принципові схеми локальних камер, які доцільно класифікувати за способами підведення та відведення робочої рідини в зоні обробки.

6.1.1. Герметизовані локальні камери призначено для реалізації технологічної схеми формоутворення за принципом прошивання з об'ємним копіюванням форми ЕІ при переміщенні останнього тільки відносно однієї осі координат і при нерухомій заготовці. Перевагою таких камер є можливість реалізувати зворотне прокачування при необхідних тисках робочої рідини. Такі камери можуть бути як суцільними, так і складеними. Поділяються на камери з приводом притискання і камери з самопритисканням.

6.1.1.1. Камери з приводом притискання (рис. 6.4) герметизуються їх притисканням до заготовки зовнішнім зусиллям привода притискання.

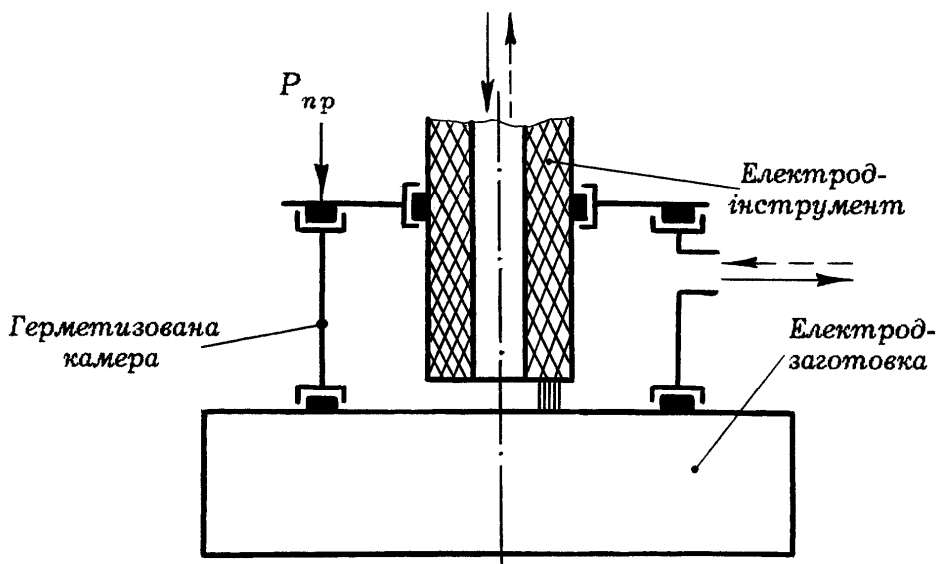


Рис. 6.4. Принципова схема герметизованої камери з приводом притискання

6.1.1.2. Камери з самопритисканням (рис. 6.5) герметизуються тиском робочої рідини, що знаходиться в камері. Проте герметизовані камери не дозволяють реалізувати технологічні схеми формоутворення непрофільованим ЕІ при відносному переміщенні Еі і ЕЗ в різних напрямках. Для цього застосовують негерметизовані локальні камери.

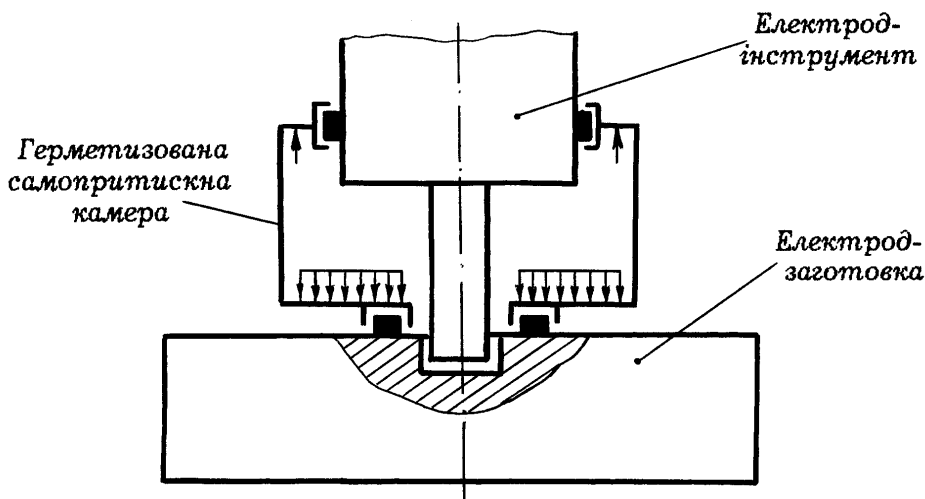


Рис. 6.5. Принципова схема герметизованої камери із самопритисканням

6.1.2. Негерметизовані локальні камери призначені для реалізації технологічних схем формоутворення звичайно з витоком робочої рідини в атмосферу, як профільованим, так і непрофільованим електродом при відносному переміщенні ЕІ і ЕЗ в різних напрямках, що дозволяє реалізувати процес РОД на будь-яких металорізальних верстатах. Недоліком таких камер є обмежені можливості реалізації достатньо високих тисків робочої рідини ($> 0,1$ МПа) при зворотному прокачуванні робочої рідини. Ці камери поділяються на такі різновиди.

6.1.2.1. Камери-огорожі (рис. 6.6) з вільним витокм робочої рідини з отвору ЕІ в атмосферу, але при обмеженні її розтікання в сторони за рахунок стінок камери. Такі камери призначені для зменшення розбризкування робочої рідини та гасіння світлових ефектів дуги. Недоліками таких камер є підвищений шум, що супроводжує процес особливо на великих струмах, а також недостатньо висока якість обробки, оскільки при виході з отвору ЕІ потік робочої рідини розривається і гідродинамічні характеристики потоку в зоні обробки є недостатньо керованими.

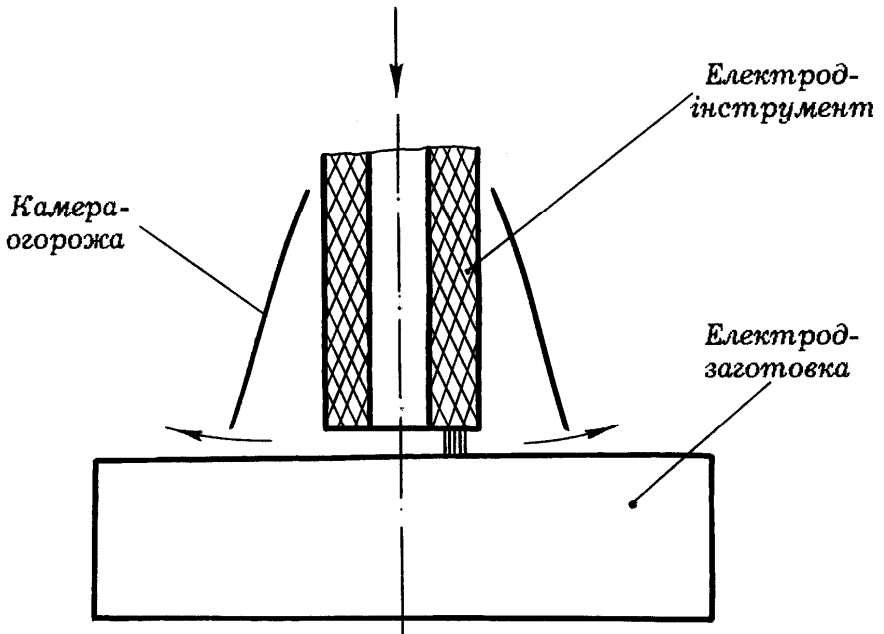


Рис. 6.6. Принципова схема камери-огорожі

6.1.2.2. Камери затоплення (рис. 6.7) з витоком рідини з отвору ЕІ в рідину камери, рівень якої підтримується за рахунок обмеження її витoku з камери, наприклад, елементами гідравлічного опору та при наявності контрольного отвору. Такі камери призначено для зменшення розбризкування робочої рідини, гасіння світлових та звукових ефектів, та покращення якості обробки, оскільки при виході з отвору ЕІ потік робочої рідини не розливається і є можливим, в відомих межах, керувати гідродинамічними характеристиками в зоні обробки.

6.1.2.3. Камери затоплення потоками керованої дії (рис. 6.8), коли в зону обробки, окрім основного подають додатковий потік робочої рідини, по суті, перпендикулярно до основного потоку в аксіальному (паралельному поздовжній осі електрода) чи тангенціальному (по дотичній до бічної поверхні електрода з круглим поперечним перерізом) напрямках, або ж в зустрічному напрямку до основного потоку і за рахунок взаємодії цих потоків локалізують зону обробки, зменшують розбризкування, гасять світлові та звукові ефекти процесу і покращують якість обробки за рахунок забезпечення відповідних гідродинамічних характеристик потоку в зоні обробки. Такі камери дозволяють реалізувати варіант всмоктування робочої

рідини через електрод або камеру, а отже, відповідно, здійснити зворотне прокачування робочої рідини, чи відсмоктати із зони обробки робочу рідину та продукти ерозії.

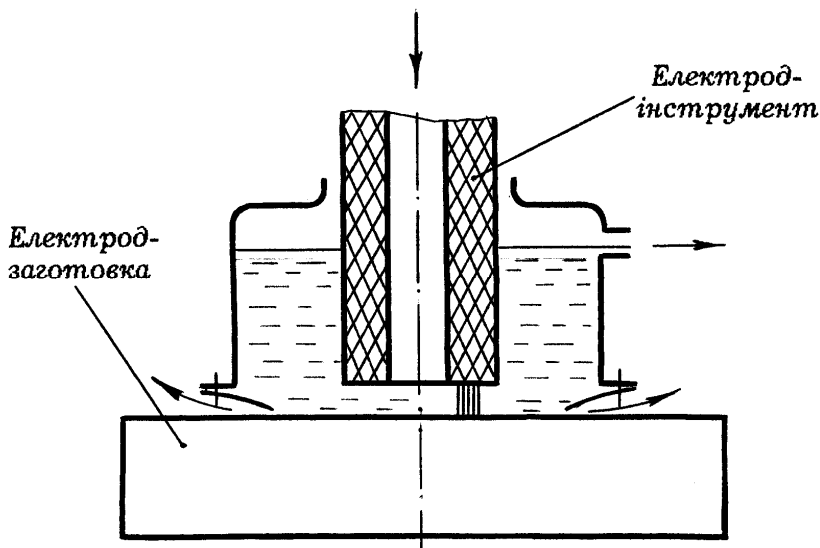


Рис. 6.7. Принципова схема камери затоплення

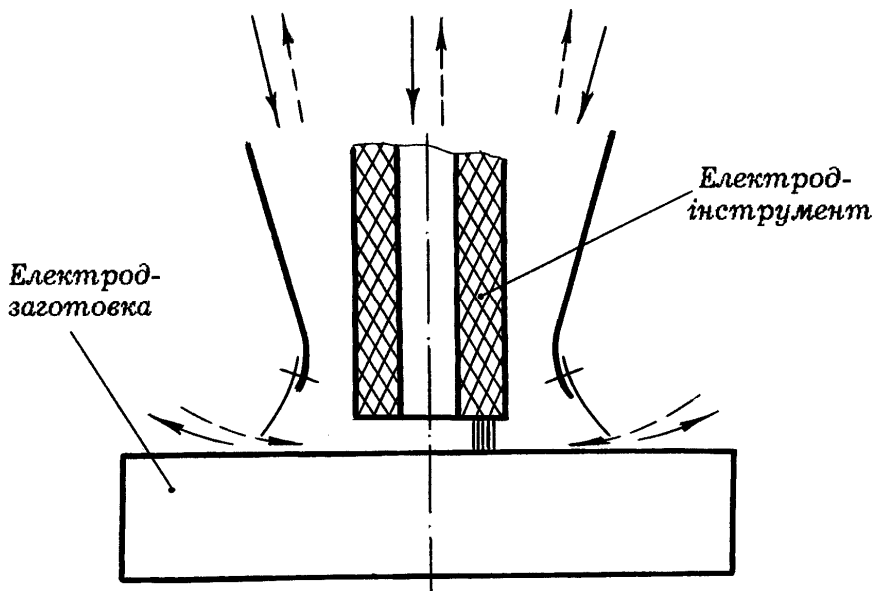


Рис. 6.8. Принципова схема камери затоплення потоками керованої дії

6.1.2.4. Подвійна камера затоплення потоками керованої дії (рис. 6.9) помітно збільшує порівняно з попереднім типом камер кількість варіантів взаємодії основного та додаткового потоків робочої рідини і, отже, помітно розширює можливості зазначених вище позитивних ефектів такої взаємодії.

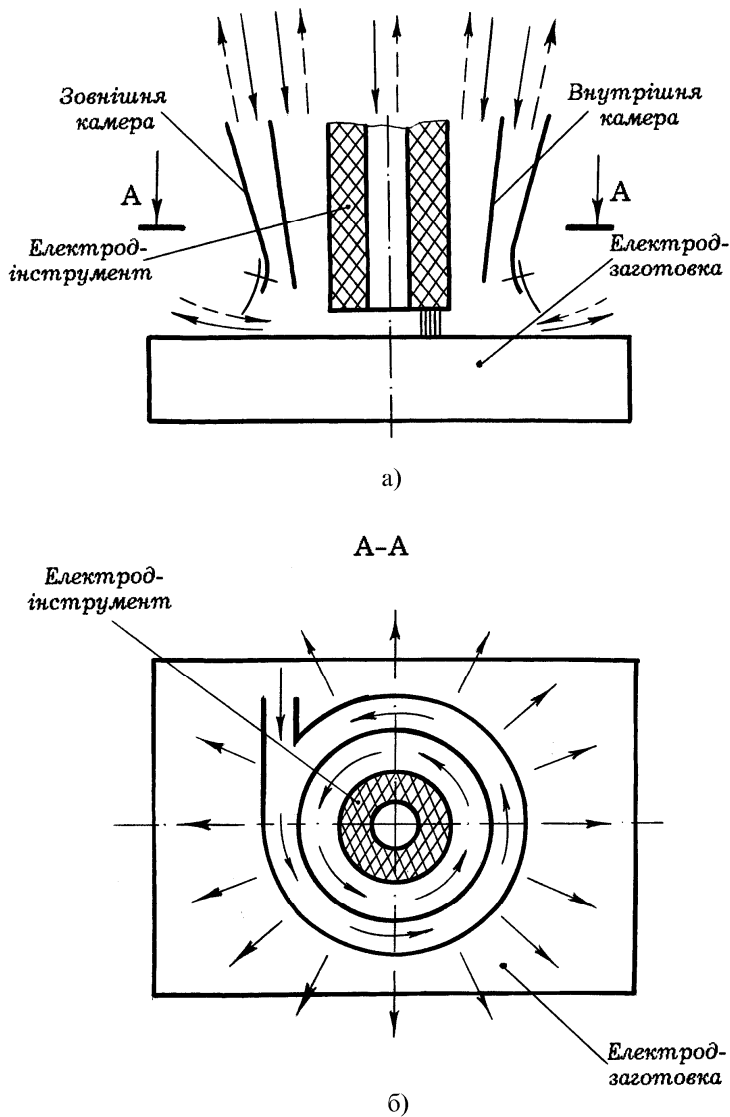


Рис. 6.9. Принципова схема подвійної камери затоплення потоками керованої дії

6.2. Особливості проектування верстатів РОД

Верстати РОД відрізняються рядом конструктивних особливостей, що обумовлено, по-перше, реалізацією концепції локального підведення робочої рідини в зону обробки, по-друге, підвищеними тисками (до 2МПа і більше) і підвищеними витратами (до 300л/хв і більше) робочої рідини, по-третє, підвищеними технологічними струмами (до 1000А і більше), а отже високою продуктивністю процесу і, відповідно, необхідності видалення великої кількості продуктів ерозії і т. і. Найбільшого застосування набули копіювально-прошивні верстати і електроерозійні головки (ЕЕГ) до металорізальних верстатів з герметизованою камерою.

На підставі аналізу та узагальнень теоретичних і експериментальних досліджень та практичного досвіду, набутого як при проектуванні, так і при експлуатації верстатів РОД викладемо основні особливості їх проектування у вигляді опису основних типових конструкторських рішень, що в підсумку дозволяє на підставі відповідних уніфікованих підходів проектувати як універсальні та спеціальні копіювально-прошивні верстати, так і ЕЕГ до металорізальних верстатів.

6.2.1. Верстат (рис. 6.10.) складається з привода 1 подачі електрода, з'єданого через шток 2 з електродом 3. Шток може рухатись униз-вгору відносно напрямних елементів 4. На штоку розташована складена камера, яка поділена на дві частини в площині А-А. Остання співпадає з верхньою площиною бурта 5 . Верхня частина 6 камери виконана у вигляді плоского тіла з отвором 7 під шток з ущільненням 8, а нижня частина 9 являє собою порожнисте тіло спрощеної форми, частіше кругле в плані, і складається з однієї або кількох секцій (на схемах показано дві секції) з ущільненнями 10 на їх торцях. Верхня частина 6 камери встановлена на штоку 2 з можливістю руху по штоку при обмеженні його переміщення униз буртом 5, який розташовано на нижньому кінці штока. В середній частині штока 2 закріплено поршень 11, який з циліндром 12, закріпленим в станині 13 верстата, утворює гідропривід протитиску, верхня або нижня порожнини якого з'єдані через регулятор тиску 14 за допомогою крана керування 15 з напірним трубопроводом 16 робочої рідини. Для притискання камери до заготовки 17 передбачено циліндр 18 односторонньої дії, який через запірний пристрій 19 і регулятор тиску 20 також з'єднано з напірним трубопроводом робочої рідини.

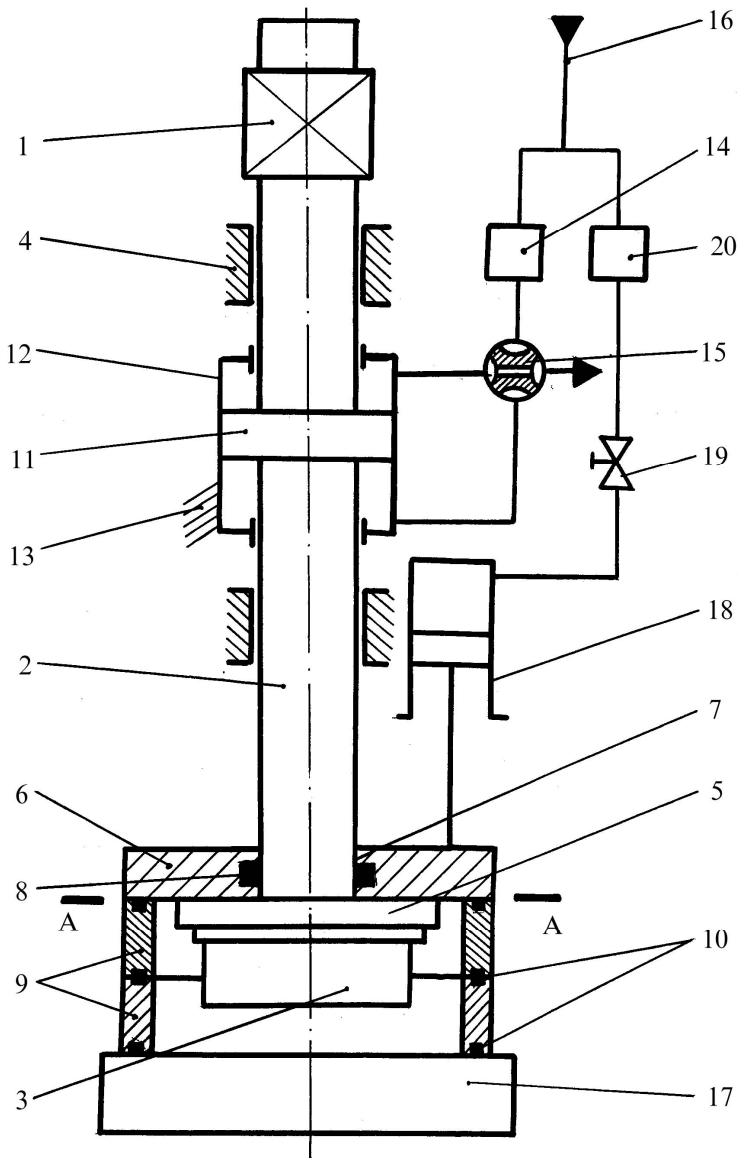


Рис. 6.10. Принципова схема верстата з герметизованою камерою та гідроприводом її притискання

6.2.2. Коли габаритні розміри електрода в плані менші діаметра штока (рис. 6.11), нижня секція камери являє собою внутрішній фланець 21 з отвором спрощеної форми, наприклад круглої, розміри якого більші розміру електрода в плані. По периметру цього отвору

встановлено ущільнення 22. Якщо всі частини і секції такої складеної камери з'єднано між собою в одне ціле, наприклад, болтами (на рис. 6.11 умовно не показано), то така конструкція не потребує спеціального привода притискання камери.

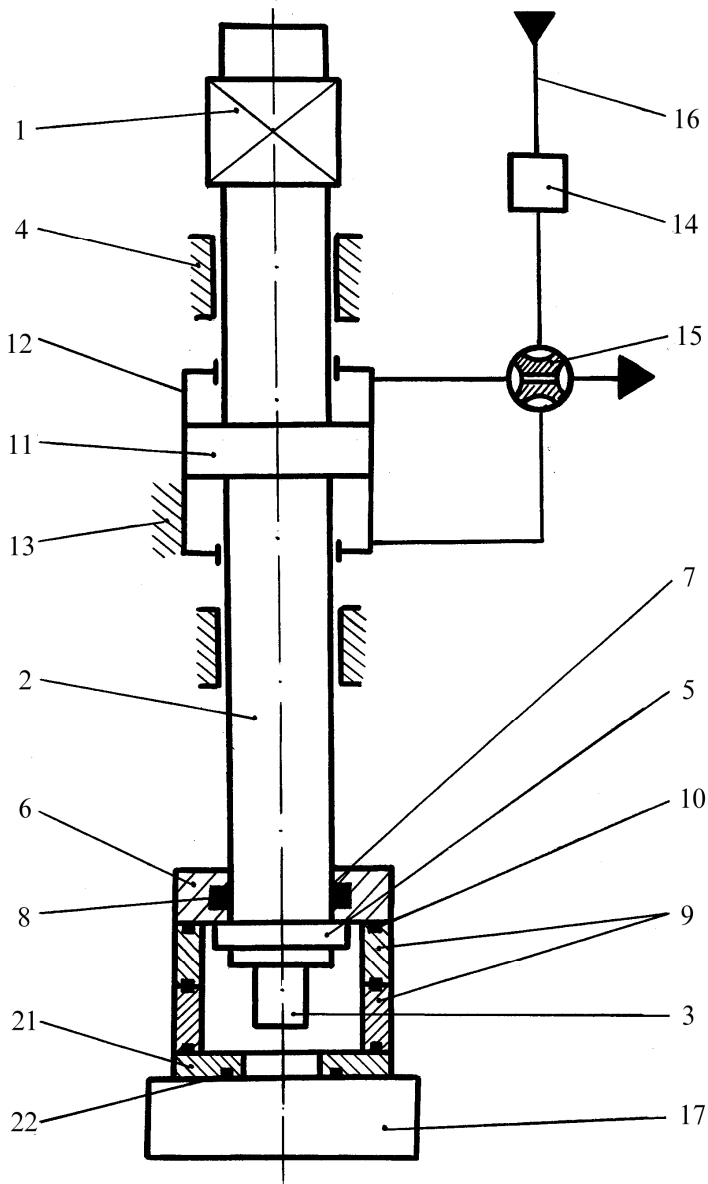


Рис. 6.11. Принципова схема верстата з самопритисканням камери

6.2.3. Другий варіант виконання камери з внутрішнім фланцем відрізняється тим, що нижня частина камери складається із секцій різного діаметра (на рис. 6.12, для прикладу показано дві секції). Секція 23 меншого діаметра встановлена всередині секції 24 більшого діаметра з можливістю взаємного переміщення при наявності ущільнення 25 на бічній поверхні. Секція 24 має внутрішній фланець 26 з отвором спрощеної форми, наприклад, круглої, розміри якої більші розмірів електрода 3 в плані. По периметру отвору розташоване ущільнення 27. Всередині секції 24 більшого діаметра встановлено пружний елемент, наприклад пружину 28, нижній торець якого розташовано на внутрішньому фланці 26, а верхній впирається в нижній торець секції 23 меншого діаметра. Для обмеження переміщення секції 23 вгору встановлено кільце 29, яке прикріплене до торцевої поверхні, наприклад, за допомогою гвинтів 30. Верхня частина б камери нерухомо закріплена на штоку 2 і знаходиться в контакті з верхнім торцем секції 23, на якому встановлено ущільнення 10.

6.2.4. Для обробки вузьких щілин, порожнин, отворів в камері, яка складається із секцій 9, внутрішній фланець виконано у вигляді трафарету 31, наприклад, з діелектричного матеріалу (рис. 6.13), що має ряд отворів під електроди 3 і утворює одну або кілька комірок 32, які являють собою канали для прокачування робочої рідини через зону обробки 33. До нижньої частини трафарету 31 прикріплено ущільнюючу прокладку 34, наприклад гумову. В електродотримачі, який виконано у вигляді штока 2, є наскрізний отвір 35 для подачі робочої рідини, а в трафареті 31 виконано отвори 36 для відведення робочої рідини разом з продуктами ерозії при прямому прокачуванні. При зворотному прокачуванні навпаки, отвори 36 в трафареті призначено для подачі, а отвір 35 в штоку 2 для відведення робочої рідини.

Змінюючи форму, розміри та кількість електродів і каналів, а також напрямок прокачування робочої рідини та режими обробки можна реалізувати різні технологічні схеми обробки і отримати отвори, глухі порожнини, наскрізні та глухі щілини різноманітних форм та розмірів при різній їх чисельності і розташуванні (наприклад, в один або кілька рядів, в шаховому порядку, в радіальному і т.і.).

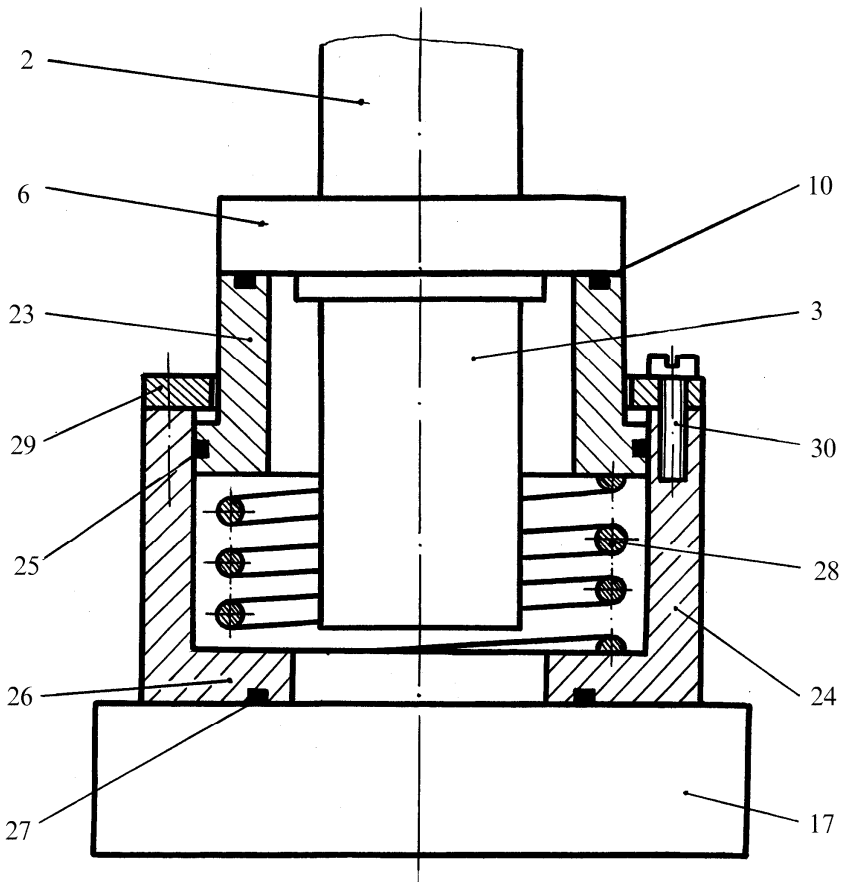


Рис. 6.12. Камера верстата з секціями, які встановлені одна всередині іншої

6.2.5. Для автоматичного притискання камери до заготовки з заданим зусиллям та при необхідності зупинки і фіксації камери в означеному положенні верстат обладнано гідроприводом притискання камери односторонньої дії (див. рис. 6.10), циліндр 18 якого з'єднано з трубопроводом 16 робочої рідини через регулятор тиску 20 і запірний пристрій 19.

6.2.6. Для розвантаження привода подачі електрода від осьових зусиль на шток, які є результатом тиску робочої рідини в камері на електрод і шток, верстат обладнано двобічним гідроприводом протитиску (див. рис. 6.10), поршень 11 якого механічно з'єднують зі штоком 2, а циліндр 12 з'єднують з трубопроводом 16 робочої рідини через регулятор тиску 14 і кран керування 15. При цьому робоча площа поршня, що являє собою різницю між площами поперечних

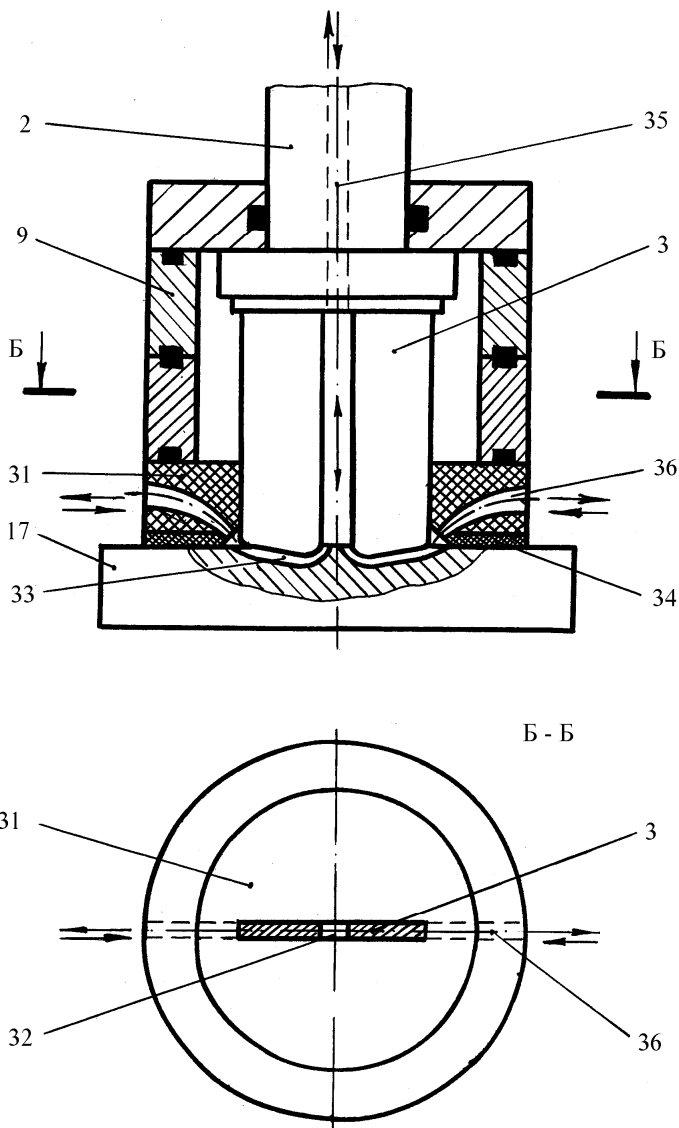


Рис. 6.13. Принципова схема герметизованої камери з трафаретом перерізів поршня 11 і штока 2, при зворотному прокачуванні дорівнює площі поперечного перерізу штока за умови, що максимальна площа обробки в плані не перевищує чотирьох площ поперечного перерізу штока. Якщо ж остання умова не виконується, то робоча площа поршня визначається розрахунком. Тоді при прямому прокачуванні завжди, а при зворотному прокачуванні за умови, що площа обробки в плані менша двох площ поперечного

перерізу штока, верхня порожнина гідроприводу 12 з'єднана через регулятор тиску 14 і кран керування 15 з напірним трубопроводом 16 робочої рідини. При зворотному прокачуванні при площі обробки в плані більше двох площ поперечного перерізу штока нижня порожнина гідроприводу з'єднана через регулятор тиску 14 і кран керування 15 з напірним трубопроводом 16 робочої рідини.

6.2.7. Щоб запобігти попаданню забрудненої продуктами ерозії робочої рідини в систему гідроприводів, обидві порожнини циліндра 12 гідроприводу протитиску з'єднано (рис. 6.14) з одного боку через гідрозамок 37 з баком 38 чистої рідини, а з другого боку через мембранний гідроконтактор 39 з напірним трубопроводом 16 робочої рідини. Аналогічно порожнина циліндра 18 притискання камери з'єднана через гідрозамок 40 з баком 38, а через мембранний гідроконтактор 41 з напірним трубопроводом 16. Об'єм чистої рідини баку 38 на 20...30% більший сумарного об'єму рідини в циліндрах 12 і 18, в нижніх камерах гідроконтакторів 39 і 41 та в трубопроводах 42 і 43 з метою їх повного заповнення чистою рідиною. Мембранний гідроконтактор являє собою герметичний резервуар, поділений, наприклад, пружною мембраною (діафрагмою) 44 на дві камери. Мембрана може бути з пружного, міцного і водночас еластичного матеріалу, наприклад, з гуми, гумотканини і т.і. Можливе застосування багатошарової мембрани типу: гума – каркас із пружної сітки – гума. В умовах підвищених температур робочої рідини потрібно використовувати мембрани з прогумованих, теплостійких, азбестових і скляних тканин з додаванням капронових ниток.

Мембранний гідроконтактор призначено для відокремлення робочої рідини, яка забруднена продуктами ерозії від чистої рідини, яка надходить в порожнини циліндрів 12 та 18. При цьому тиск робочої рідини повною мірою передається чистій рідині через еластичну мембрану.

Верхня камера гідроконтактора 39 з'єднана з магістраллю 16 робочої рідини, а нижня камера з'єднана через кран керування 15 з порожнинами циліндра 12 протитиску. Верхня камера гідроконтактора 41 з'єднана з магістраллю 16 робочої рідини, а нижня камера з'єднана через запірний пристрій 19 з порожниною циліндра 18 притискання камери. Розміри і об'єм гідроконтактора 41 менші, ніж гідроконтактора 39, оскільки перший, власне, тільки розділяє чисту і робочу рідину, а другий, до того ж, забезпечує подачу чистої

рідини в об'ємах, достатніх для заповнення циліндра 12 при переміщенні штока 2 в процесі обробки. Зазначимо, що можливе застосування лише одного гідроконтактора 39.

6.2.8. Щоб зменшити розміри гідравлічних циліндрів і, відповідно, габарити верстата в цілому, поміж мембранними гідроконтакторами і циліндрами притискання камери та протитиску розміщують гідравлічний мультиплікатор тиску.

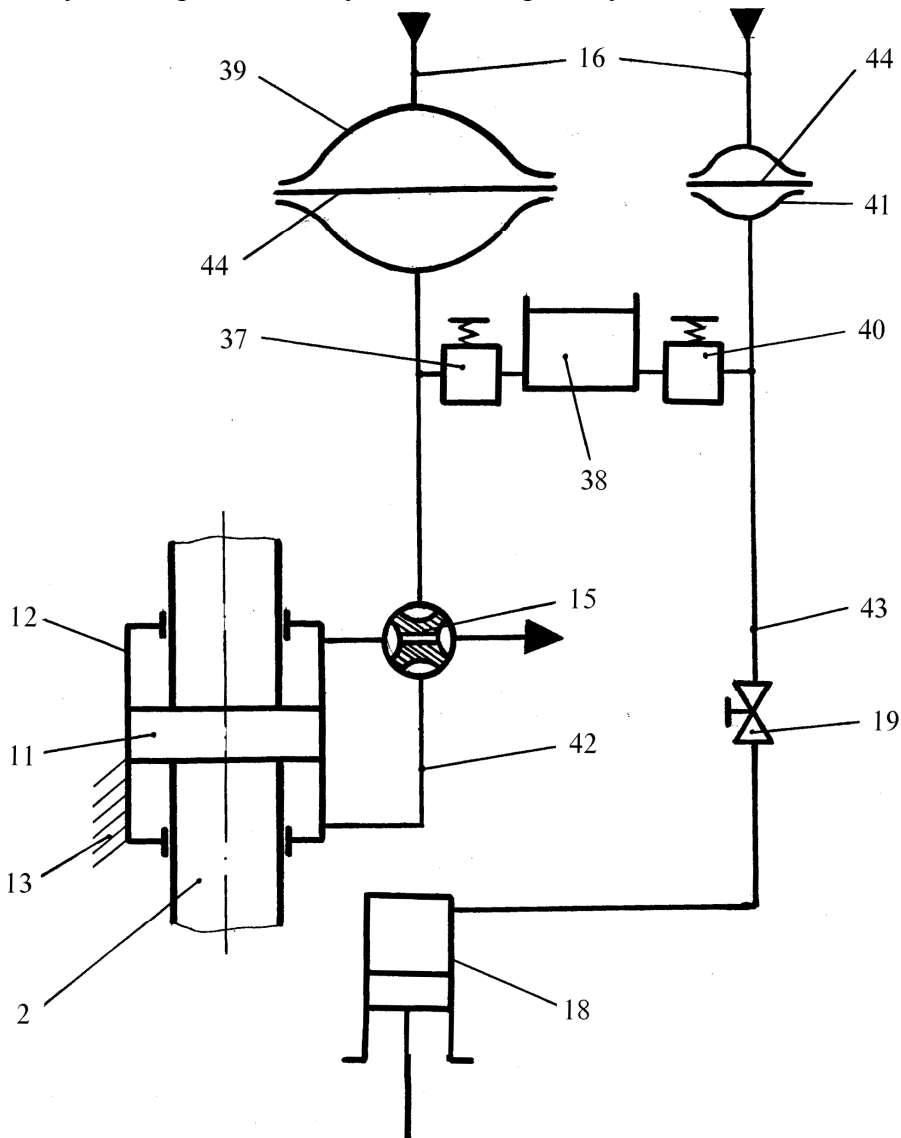


Рис. 6.14. Принципова схема верстата з гідро контактором

Наприклад, в магістралі гідроприводу притискання камери до заготовки (рис. 6.15) поміж мембранним гідроконтактором 41 і циліндром 18 розміщено гідравлічний мультиплікатор 45. При цьому нижня камера гідроконтактора з'єднана з порожниною більшого діаметра D_m мультиплікатора. Порожнина меншого діаметра d_m мультиплікатора з'єднана з порожниною циліндра 18 притискання камери. Сюди ж підведено трубопровід 43 чистої рідини, який через гідрозамок 40 з'єднаний з баком 38.

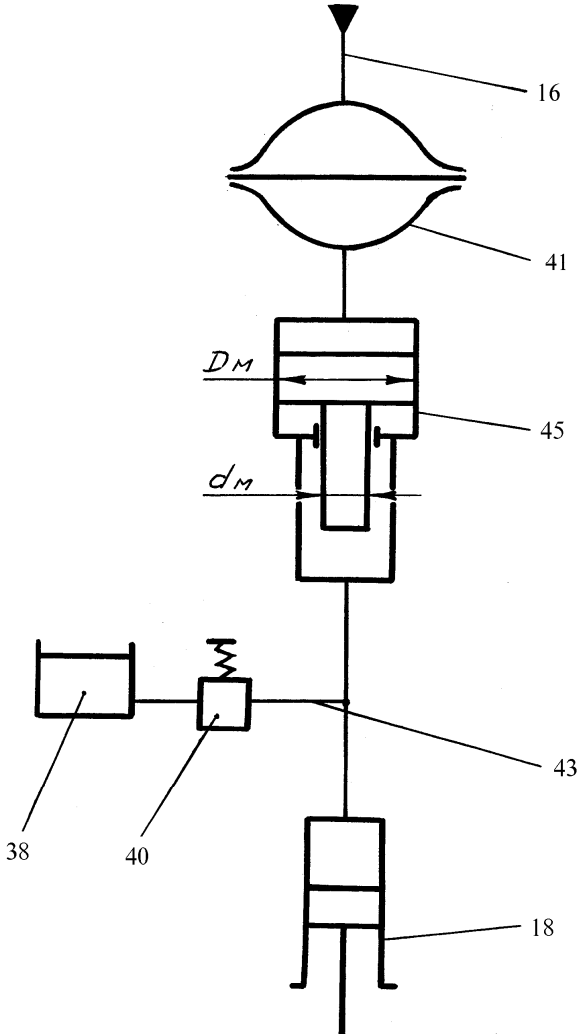


Рис. 6.15. Принципова схема верстата з гідроконтактором і мультиплікатором тиску робочої рідини

Верстат працює таким чином.

В вихідному положенні, коли на верстат встановлюють електрод 3 та заготовку 17, шток 2 з верхньою частиною камери 6 знаходиться в верхньому положенні і, при необхідності, переміщується вгору-вниз, приводом 1 подачі електрода. Можливо також зупинити і зафіксувати верхню частину камери 6 в означеному положенні по висоті за допомогою запірної пристрою 19.

Секції нижньої частини 9 камери встановлюють на заготовку 17, локалізуючи зону обробки (див. рис. 6.10). Регуляторами тиску 14 і 20 встановлюють потрібні тиски робочої рідини в циліндрі 12 гідроприводу протитиску і в циліндрі 18 гідроприводу притискання камери, а за допомогою крана керування 15 напірний трубопровід з'єднують, як потрібно, з верхньою чи нижньою порожнинами гідроциліндра 12. Шток 2 з електродом 3 опускають вниз приводом 1 подачі електрода до стикання верхньої частини 6 камери з її нижньою частиною 9. Ущільнення 10 камери дещо стискається і камера попередньо герметизується.

Таким чином, верхня частина 6 камери, яка встановлена на штоку 2, є елементом верстата, його постійним довгодіючим оснащенням, в той час як нижня частина 9 камери, власне, є індивідуальним, тимчасовим технологічним оснащенням, форма, розміри і конструктивні особливості якого визначаються вимогами конкретної технології. Нижня частина 9 може мати різну висоту, бути як суцільною і кріпитись до верхньої частини 6 камери, наприклад, болтами, так і складатись з кількох секцій; може мати різні форми і розміри в плані. Зазначимо, що для конкретних технологій типорозміри нижньої частини 9 камери доцільно уніфікувати. Все це помітно розширює технологічні можливості верстата і покращує умови його обслуговування.

При габаритних розмірах електрода в плані менших за діаметр штока, коли не можна здійснити локальне підведення робочої рідини в зону обробки, що в ряді випадків важливо, наприклад, коли розміри заготовки в плані перевищують розміри порожнини камери, а герметизація можлива тільки в зоні формують поверхні невеликого за своїми розмірами електрода, нижню частину 9 камери (див. рис. 6.11) доповнюють з її нижнього боку фланцем 21 з отвором звичайно спрощеної форми, наприклад круглої, з розмірами отвору більшими розмірів електрода в плані та розташованим по периметру

цього отвору ущільненням 22.

Коли відбувається процес обробки, тиск робочої рідини в камері завжди перевищує атмосферний. При наявності на нижній частині 9 камери фланця 21 з ущільненням 22 (див. рис. 6.11) тиск робочої рідини притискує фланець 21 до заготовки 17. Доцільно використати цей ефект для притискання камери до заготовки. Для цього частини 6, 9 та фланець 21 камери з'єднано в одне ціле, наприклад, болтами. При цьому спеціальний привод притискання камери вже не потрібен.

Принцип дії другого варіанту камери з самопритисканням (див. рис. 6.12) відрізняється тим, що в процесі обробки робоча рідина діє також на нижній торець верхньої секції 23, яка тиском рідини та зусиллям пружини 28 постійно притискується до верхньої частини 6 камери через ущільнення 10. В процесі обробки при опусканні штока 2 із закріпленою на ньому верхньою частиною 6 камери висота камери зменшується, секція 23 рухається донизу, а ущільнення 25 ковзає по внутрішній бічній поверхні секції 24, що забезпечує надійну герметизацію зони обробки.

При обробці вузьких щілин та пазів (див. рис. 6.13) при прямому напрямку прокачування рідина подається через наскрізний отвір 35 в штоку 2 і далі через зазор між електродами 3, а відводиться через отвори 36 в трафареті 31. При цьому стінками отворів в трафареті 31 і бічними поверхнями електродів утворюються комірочки 32, які являють собою канали для прокачування робочої рідини через зону обробки 33. Кількість електродів може бути різною (на рис. 6.13 для прикладу показано два електрода). Герметизуюча прокладка 34 щільно притискається до заготовки 17 і локалізує потік робочої рідини по контуру обробки. При зворотному напрямку прокачування робоча рідина подається через отвір 36 в трафареті 31, а відводиться через отвір 35 в штоку 2. На схемах напрямки прокачування робочої рідини показано стрілками.

Така конструкція камери з внутрішнім фланцем, виконаним у вигляді трафарету, дозволяє локально підвести робочу рідину в зону обробки кожного отвору або порожнини, виключаючи появу застійних зон.

При здійсненні процесу обробки приєднання циліндра 18 притискання камери до трубопроводу 16 робочої рідини через регулятор тиску 20 і запірний пристрій 19 (див. рис. 6.10) вирішує

проблему автоматичного притискання камери до заготовки із заданим зусиллям, при необхідності забезпечується зупинка і фіксація камери в заданому положенні.

При зміні площі обробки змінюється зусилля на шток 2 від тиску робочої рідини в камері на електрод 3 зверху і знизу (див. рис. 6.10). Тому зусилля на поршень 11 гідроприводу протитиску змінюється регулятором тиску 14. Потрібні значення тиску робочої рідини розраховуються в функції площі обробки в плані. За результатами цих розрахунків складається таблиця або будується графік, які надалі використовуються при реалізації конкретних технологій.

В гідроприводі протитиску і в гідроприводі притискання камери запропонованого верстата енергоносієм є робоча рідина. Проте, робоча рідина навіть після ретельного очищення забруднена продуктами ерозії у вигляді дрібних металевих часток. Тому робочу рідину відокремлено від чистої рідини, яка використовується в гідроприводах протитиску та притискання камери, за допомогою мембрани (діафрагми) 44 (рис. 6.14), яка встановлена в гідроконтакторах 39 і 41. При цьому тиск робочої рідини передається через мембрану 44, яка прогинається залежно від кількості чистої рідини, що надходить відповідно в порожнини циліндрів 12 та 18.

Таким чином гідравлічна система верстата являє собою слідкуючу систему, яка автоматично змінює зусилля протитиску на шток і зусилля притискання камери залежно від зміни тиску робочої рідини в зоні обробки. Порядок роботи такої гідравлічної системи полягає в наступному. Спочатку при ході електрода донизу за допомогою системи електрокерування (на рис. 6.14 і 6.15 умовно не показана) відкриваються гідрозамки 37 і 40, чиста рідина надходить з бака 38 і заповнює нижні порожнини гідроконтакторів 39 і 41, порожнини циліндра 12 протитиску і циліндра 18 притискання камери, а також трубопроводи 42 і 43. При цьому утворюється замкнена система чистої рідини, яка ізольована від робочої рідини, забрудненої продуктами ерозії. В момент початку обробки гідрозамки 37 і 40 автоматично закриваються, а тиск в гідросистемі чистої рідини надалі в процесі обробки залежить від тиску робочої рідини в магістралі 16. Зміна тиску робочої рідини через мембрани 44 гідроконтакторів 39 і 41 передається чистій рідині. Відповідно змінюється тиск в циліндрі 12 протитиску і циліндрі 18 притискання

камери і, як наслідок, автоматично змінюється зусилля протитиску на шток і зусилля притискання камери, що забезпечує стабільну і надійну роботу верстата.

При необхідності тиск чистої рідини підвищується порівняно з тиском робочої рідини за допомогою гідравлічного мультиплікатора тиску 45 (див. рис. 6.15). При цьому чиста рідина невисокого тиску (який дорівнює тиску робочої рідини) надходить в порожнину більшого діаметра D_m мультиплікатора і рухає його плунжер донизу. Рідина підвищеного тиску витісняється з порожнини меншого діаметра d_m в порожнину циліндра 18 притискання камери. Величина підвищення тиску мультиплікатором 45 дорівнює відношенню квадратів діаметрів D_m і d_m , а саме: $K_m = \frac{D_m^2}{d_m^2}$.

Після завершення підготовчих операцій, коли камера попередньо герметизується, вмикають прокачку робочої рідини, тиск якої дещо збільшується (до 0,1...0,2МПа), що забезпечує достатньо надійне притискання камери до заготовки 17 (див. рис. 6.10, 6.11, 6.12, 6.13). Вмикають технологічний струм, подають електрод 3 приводом подачі 1 і починають процес обробки. Тиск робочої рідини різко зростає (до 1...2МПа), що забезпечує надійне притискання камери до заготовки.

По завершенні процесу обробки вимикають технологічний струм і потім прокачку робочої рідини. Приводом 1 подачі електрода піднімають шток 2 і верхню частину 6 камери (див. рис. 6.10, 6.12) або ж всю зібрану камеру (поз. 6, 9, 21) догори. Прибирають з поверхні обробленої заготовки нижню частину 9 камери (див. рис. 6.10) або ж зібрану камеру (див. рис. 6.12, поз. 23...30). Знімають оброблену заготовку 17.

Результати практичної реалізації елементів верстата, згідно винаходу, підтверджують вказані раніше його переваги порівняно з відомими верстатами, а саме: спрощення конструкції, зменшення габаритів та металоємкості, розширення його технологічних можливостей, покращення умов обслуговування.

6.3. Станції робочої рідини

Станції робочої рідини призначені для подачі робочої рідини з параметрами тиску і витрат, що регулюються в широких межах, в робочу камеру верстата, а також для очищення рідини від продуктів

ерозії і її охолодження. Технічні характеристики таких станцій визначаються перш за все, максимальною продуктивністю процесу (який, в свою чергу, визначається максимальним струмом обробки), а також особливостями реалізації технологічних схем формоутворення. Варіанти конструктивного виконання таких станцій можуть бути найрізноманітнішими [48...67]. Розглянемо типову станцію робочої рідини для універсальних копіювально-прошивних верстатів при продуктивності обробки до $30000\text{мм}^3/\text{хв}$ (струм обробки до 1000А).

Станція складається (рис. 6.16.) з таких основних вузлів:

- насосної установки 1, яка містить шестеренний насос, електродвигун і запобіжний клапан оригінальної конструкції;
- фільтруючого модуля 2, що має систему сит, через які здійснюється фільтрація робочої рідини від твердої фази продуктів ерозії;
- бака 3 листовареної конструкції;
- корпусу 4, в якому змонтовано три фільтруючих гідроциклони, а також керуюча та контролююча апаратура (манометри, вентилі і т. і.). Крім того в корпусі розташовано повітряний теплообмінник, призначений для охолодження робочої рідини.

На рис. 6.17 наведена принципова гідравлічна схема станції робочої верстата АМ-1 за умови прокачування робочої рідини через між електродний зазор та використання гідро контактормів. Станція працює так.

В бак заливають робочу рідину об'ємом 2м^3 . Вмикають електродвигун насосної установки 1 і подають робочу рідину під технологічним тиском в герметизовану камеру верстата. При цьому тиск в камері регулюють з допомогою байпасної системи, яка містить вентиль 4 (2"). Контроль тиску в камері здійснюється за допомогою манометра 5. Максимально допустимий тиск в герметизованій камері ($P_{max} = 2\text{МПа}$) установлюється запобіжним клапаном 3. Після виконання технологічної операції робоча рідина разом з продуктами ерозії із робочої зони верстата надходить в фільтри грубої очистки 8, де очищується від відносно крупних часток ($d \geq 2\text{мм}$). По різниці тисків на вході і виході робочої рідини з кожного фільтра грубого очищення, що видно з показань манометрів, вбудованих в фільтр, робиться висновок про необхідність очищення даного фільтра від накопиченого шламу. При цьому перепад тисків не повинен перевищувати $0,05\text{МПа}$.

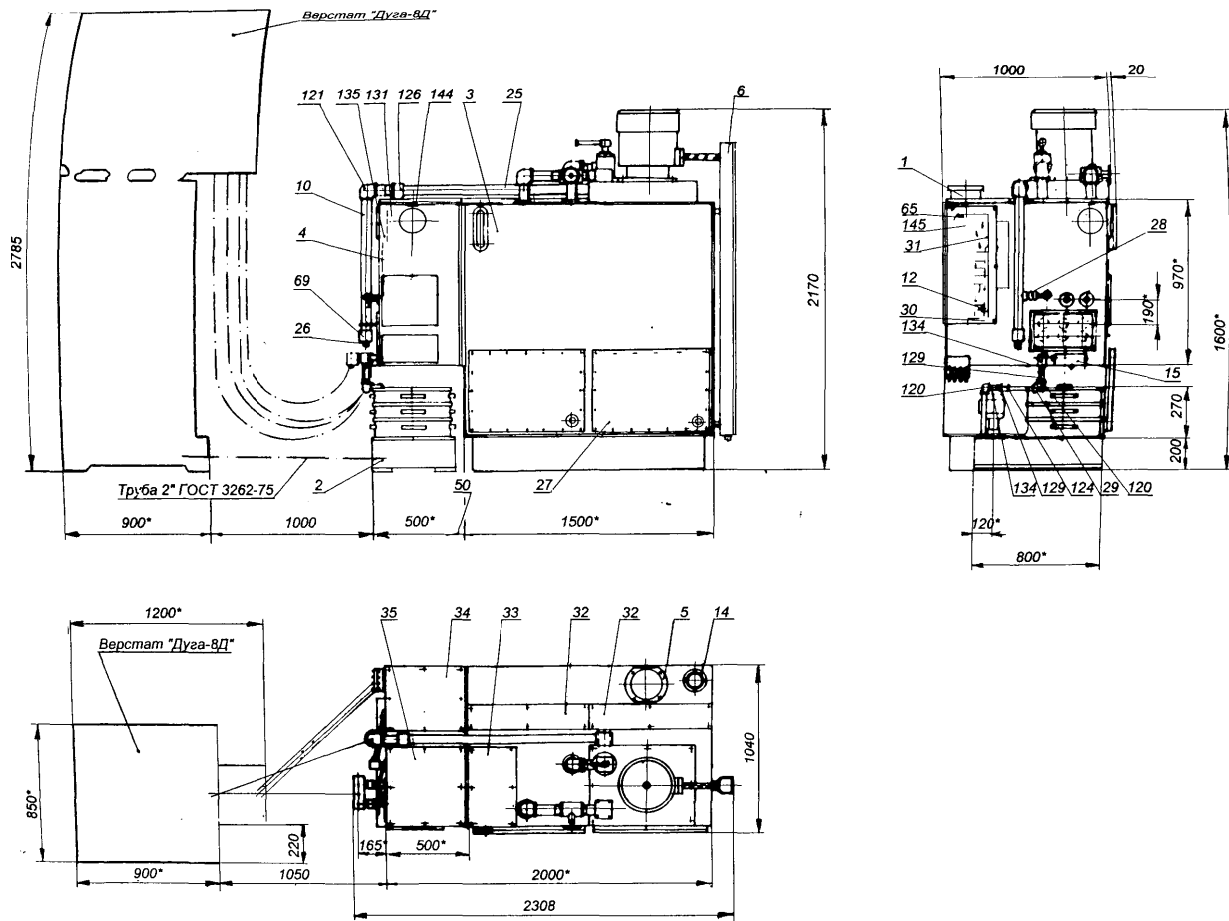


Рис. 6.16. Станція робочої рідини

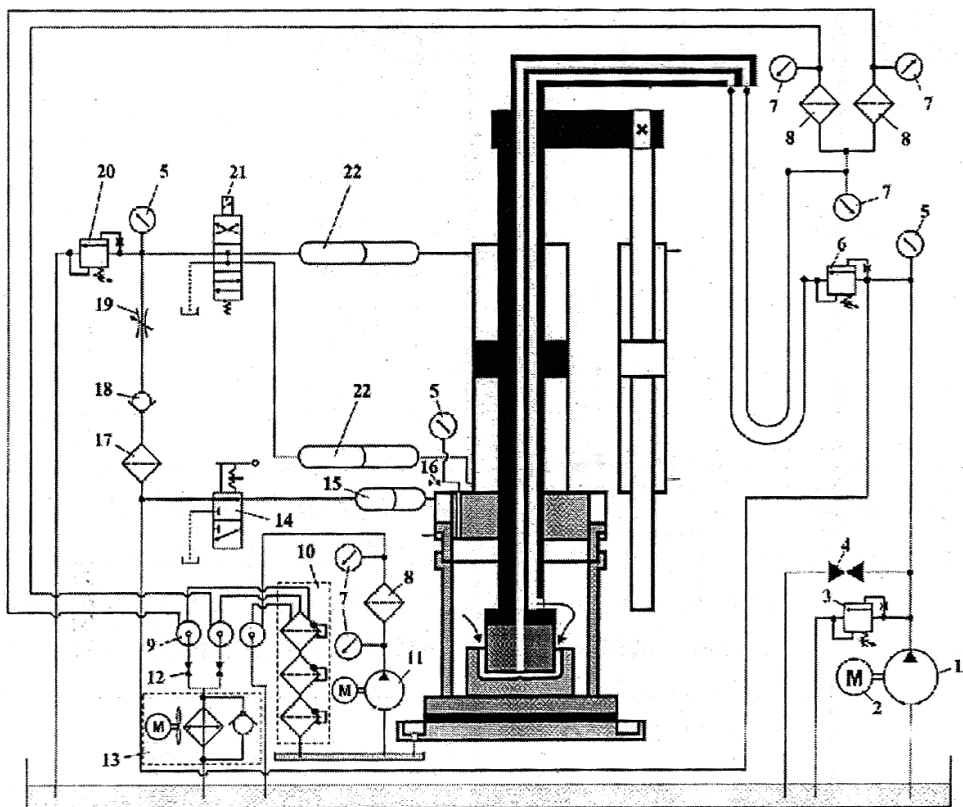


Рис. 6.17. Принципова гідравлічна схема станції робочої рідини верстата АМ-1

Далі робоча рідина з дрібною фракцією твердої фази продуктів ерозії направляється в гідроциклони 9, де самоочищається від основної маси продуктів ерозії. Ті, що залишаються, видаляються з гідроциклонів через круглий отвір діаметром 2мм в нижній частині конуса гідроциклонів разом з невеликою (по витраті) кількістю робочої рідини в фільтруючий модуль 10, де відбувається відокремлення твердої і рідкої фаз. Тверда фаза залишається на сітках модуля, які періодично очищуються, а рідка надходить в дренажний бак модуля. Рівень накопиченої в дренажному баку рідини регламентується автоматичним поплавковим пристроєм, який керує роботою електронасоса 11. Оскільки в дренажний бак попадає і забруднена продуктами ерозії робоча рідина (наприклад, дренаж зі столу верстата в момент розкриття герметизованої камери), електронасос видаляє її в основний бак через автономний фільтр грубого очищення 8, який працює послідовно з гідроциклоном.

Скидання забрудненої рідини з останнього гідроциклону здійснюється в фільтруючий модуль, чим забезпечується замкнутість фільтруючого циклу його роботи. Потім основна маса рідини, яка надходить від одного або двох гідроциклонів (їх кількість встановлюється з допомогою вентилів 12), направляється в повітряний теплообмінник 13, де охолоджується до нормальної (20...60°C) температури. В охолоджену стані робоча рідина надходить в основний бак. Рухаючись в баку по напрямку всмоктуючого патрубку насосної установки, робоча рідина послідовно проходить через дві вертикально встановлені сітки: сітка 1 має розмір вічка в світлі 0,10мм, а сітка 2 – 0,08мм. Ці сітки гарантують відокремлення від рідини випадкових часток, що надійшли в бак, і тим самим забезпечують нормальні умови процесу обробки та довготривалість роботи насоса.

6.4. Системи автоматичної подачі ЕІ

В якості виконавчих механізмів для подачі ЕІ може бути застосовано на малих і середніх верстатах електромеханічний привод (двигун постійного струму – черв'ячний редуктор – гвинтова пара), на крупних верстатах – гідравлічний привод (гідроциліндр – поршень) або ж гідромеханічний привод (гідромотор – черв'ячний редуктор – гвинтова пара).

В системах автоматичної подачі ЕІ верстатів РОД основним параметром регулювання прийнято величину МЕЗ, яка достатньо точно відображується напругою дуги. Структурна схема системи автоматичного регулювання МЕЗ для верстатів РОД в цьому випадку не має суттєвих відмін від відомих схем електроерозійних верстатів і в своїй принциповій частині полягає в наступному.

Сигнал у вигляді напруги дуги, що несе інформацію про величину МЕЗ, надходить через посилювач (в системах автоматичного регулювання непрямої дії) або безпосередньо (в системах автоматичного регулювання прямої дії) на привод, який здійснює подачу ЕІ. При цьому напруга дуги або, що теж, величина МЕЗ регулюється органом настройки, який регулює величину сигналу або ж діє на ланцюг посилювача.

На рис. 6.18 представлено функціональну схему автоматичної системи регулювання МЕЗ. Вона являє собою одноконтурну систему компенсаційного типу, в якій джерело живлення технологічним

струмом (ДЖ), що має крутопадаючу вольтамперну характеристику, підключено до міжелектродного проміжку (МЕП). Напруга на МЕП при горінні дуги залежить від величини МЕП, що дозволяє за рахунок зміни МЕП регулювати величину напруги, яка для даної автоматичної системи є параметром X_n , що регулюється. Поточне значення X_n подається на пристрій порівняння (ПП), куди також надходить сигнал X_3 з датчика напруги ЗН. Вихідний сигнал Y_a , що являє собою різницю $(X_3 - X_n)$, посилюється посилювачем (П). Посилений сигнал Y_b обробляється широтно-імпульсним модулятором ШІМ. Промодульований сигнал Y_m керує гідророзподілювачем ГР. Сигнал з гідророзподілювача Y подається на виконавчий орган ВО, який безпосередньо, діючи на МЕП, забезпечує підтримання регульованого параметра на заданому рівні.

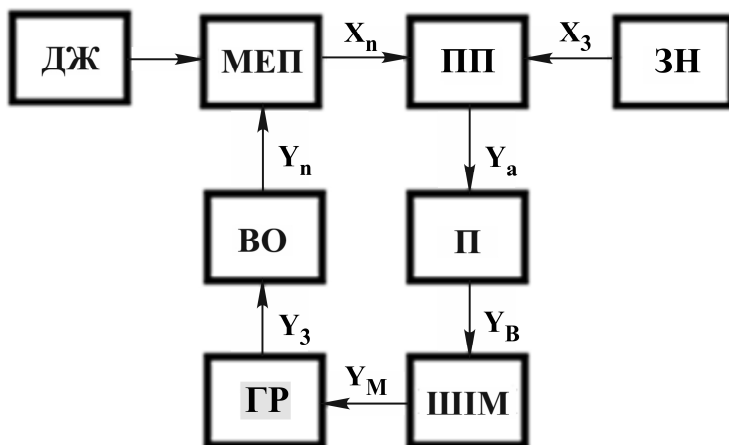


Рис. 6.18. Функціональна схема автоматичної системи регулювання МЕЗ

На рис. 6.19 приведено принципову гідравлічну схему регулятора МЕЗ, робота якого полягає в наступному. Мастило з бака 1 насосом 2 через фільтр 3 і зворотній клапан 5 подається до гідро розподільника (слідкуючого золотника) з електрокеруванням (типу УГЭ8-12/16) 7. Тиск в системі встановлюється за допомогою запобіжного клапана 4 і контролюється манометром 6. При зміні струму керування, який проходить через обмотки слідкуючого золотника, останній відкриває доступ маслу в верхню або нижню порожнину циліндра 8, забезпечуючи цим задану величину МЕЗ.

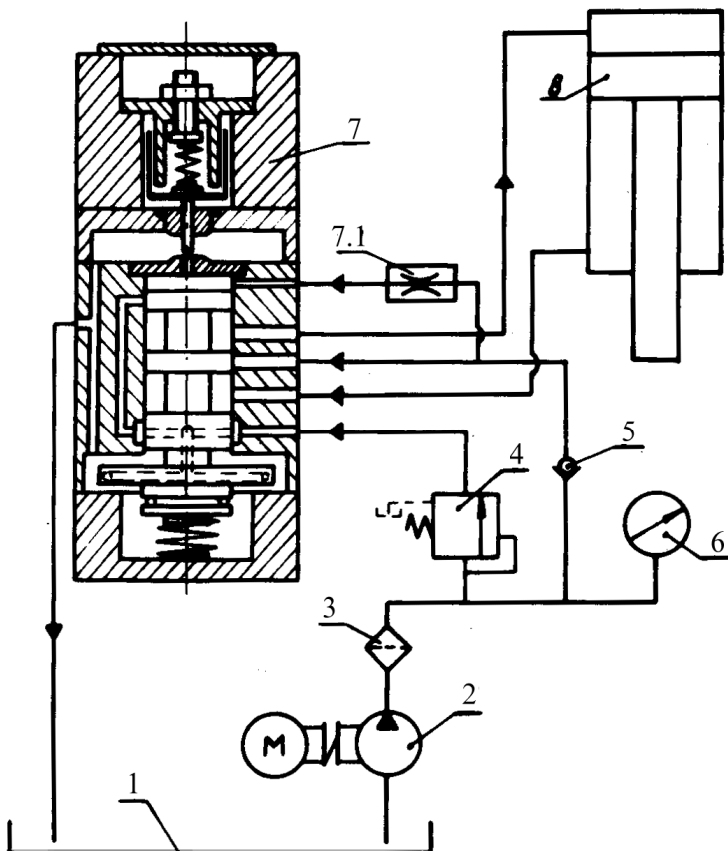


Рис. 6.19. Принципова гідравлічна схема гідравлічного регулятора МЕЗ

6.5. Джерела живлення технологічним струмом

Головні вимоги до джерел живлення технологічним струмом можуть бути визначені на основі аналізу особливостей взаємодії елементів системи «джерело живлення технологічним струмом – дуга обробки». Взаємодія джерел живлення і дуги обумовлена перш за все їх статичними вольтамперними характеристиками [155, с. 87...94]. Дослідження вольтамперних характеристик дуг, що горять в умовах РОД, показали, що вони є жорсткими (див. рис. 3.14) або зростаючими. Звідки, виходячи з класичної умови сталості системи «джерело живлення - дуга» джерело живлення повинно мати пологопадаючі статичні вольтамперні (зовнішні) характеристики [156, с. 99...102].

Процес РОД характеризується значними коливаннями напруги

на дузі (див. рис. 4.8). Амплітуда коливань напруги досягає 100...200% середнього значення напруги дуги, що приводить при пологопадаючих характеристиках джерел живлення струмом до значних коливань струму і порушенню сталості процесу. Тому з точки зору стабільності технологічного процесу оптимальними зовнішніми характеристиками джерел живлення такої дуги є крутопадаюча чи вертикальна [155, с. 88...94]. При цьому в зв'язку зі значними коливаннями напруги дуги з метою забезпечення стабільності горіння дуги і стабільності процесу напруга холостого ходу джерела живлення повинна в два-три рази перевищувати робочу напругу на дузі [66], яка в умовах РОД знаходиться в межах 25...50В і більше. Отже, напруга холостого ходу джерела живлення дуги повинна бути не менше 50...60В і може досягати 150В і більше.

Таким чином джерела живлення технологічним струмом для РОД повинні мати зовнішню крутопадаючу чи вертикальну характеристику при напрузі робочого ходу не менше 25...30В і при напрузі холостого ходу не менше 50...60В. Зазначимо, що потужність джерел живлення технологічним струмом яка визначає продуктивність обробки може досягати десятків і сотень кіловат, оскільки фізика процесу, технологія обробки і конструктивні особливості джерел живлення, які прості та дешеві, не ставлять тут помітних обмежень.

На цей час промисловість не випускає джерел живлення технологічним струмом для РОД, що змушує використовувати стандартні джерела живлення – випрямлячі для дугового зварювання і плазмового різання. При цьому треба враховувати таке:

1. Необхідно використовувати джерела живлення з падаючими зовнішніми характеристиками. Джерела живлення з жорсткими і пологопадаючими зовнішніми характеристиками мають порівняно малу напругу холостого ходу (40...50В) і, до того ж, щоб отримати падаючі характеристики їх (джерела живлення) необхідно оснащувати баластними реостатами, що не вигідно з економічної точки зору.

2. Робоча напруга дуги і, відповідно, напруга холостого ходу джерела живлення технологічним струмом в умовах РОД може перевищувати номінальну робочу напругу і напруги холостого ходу зварювальних джерел живлення. Тому може виникнути потреба в послідовному з'єднанні двох і більше однакових джерел живлення зварювальної дуги.

3. При необхідності підвищення продуктивності обробки, а отже технологічного струму, і при відсутності джерел живлення технологічним струмом відповідних характеристик, є можливість збільшити технологічний струм за рахунок паралельного з'єднання двох і більше джерел живлення зварювальної дуги.

4. Необхідно враховувати, що всі стандартні зварювальні джерела живлення при навантаженні їх на номінальний струм розраховані на тривалість роботи (ТР) не більше 65%. Тому при довготривалій роботі струм навантаження треба зменшити згідно формули [155, с. 97]:

$$I_{mp=100\%} = 0,77 \cdot I_{mp=60\%} \quad (6.1)$$

Треба зазначити, що електрофізичні особливості дуги і специфіка технології РОД потребують створення спеціальних джерел живлення технологічним струмом.

6.6. Верстати РОД

6.6.1. Універсальний копіювально-прошивний верстат моделі “Дуга-8Д”

6.6.1.1. Призначення і область застосування

Вертикальний двостояковий електроерозійний верстат моделі “Дуга-8Д” (рис. 6.20) реалізує технологічну схему формоутворення за принципом прошивання з об'ємним копіюванням форми ЕІ і призначено для виконання таких робіт:

- прошивання глухих і наскрізних круглих і фасонних отворів в струмопровідних заготовках;
- обробка фасонних порожнин молотових штампів, рівчакових вставок штампів КГШП та пресформ;
- багатоелектродне прошивання отворів за один хід ЕІ;
- обробка зовнішніх поверхонь деталей типу «стержень».

6.6.1.2. Технічна характеристика

Розміри робочої поверхні стола (ширина × довжина), мм	420 × 420
Найбільша маса ЕІ (графіт), кг	35
Найбільша маса заготовки, кг	100
Найбільший розмір обробленої порожнини в плані, мм	150
– при застосуванні спеціальної камери, мм	250

Внутрішній діаметр герметизованої камери, мм	160
Найбільша відстань від торцевої поверхні (пінолі) до робочої поверхні столу, мм	325
Робочий хід (пінолі), мм	200
Установче вертикальне переміщення інструментальної головки, мм	300
Найбільша продуктивність по сталі 45 при струмі 1000А, мм ³ /хв	25000
Межі регулювання технологічного струму, А	50...1000
Найменша шорсткість обробленої поверхні, R_a , мкм . .	6,3
Сумарна електропотужність, кВт	100
Габаритні розміри, мм	1200×850×
(довжина × ширина × висота)	×2740
Маса верстата, кг	2100
Площа установки, м ²	17

6.6.1.3. Комплект установки

Верстат “Дуга-8Д” являє собою установку, що має такі складові:

1. Верстат “Дуга-8Д”.
2. Станція робочої рідини (див. рис. 6.16, 6.17).
3. Станція гідроприводу.
4. Два зварювальних випрямлячі типу ВДУ-506.
5. Електрошкафа.

6.6.1.4. Опис верстата

Верстат “Дуга-8Д” складається з таких основних вузлів (див. рис. 6.20): інструментальної головки 1, стола 2, станини 3, основи 4, огорожі 5 та підставки 6. В станині 1 (рис. 6.21) рухомо змонтована інструментальна головка (рис. 6.22). Станина виконана у вигляді замкнутої прямокутної рами, яка складається з верхньої траверси 3 і двох напрямних стійок-колон 4, 5 та нижньої траверси 6. Верхня траверса 3 обладнана локальною, складеною, швидкозмінною герметизованою камерою 7, яка закріплена центрально відносно напрямних стійок-колон 4, 5. Камера обмежує зону обробки навколо

ЕІ 8, який закріплено на електродотримачі 9.

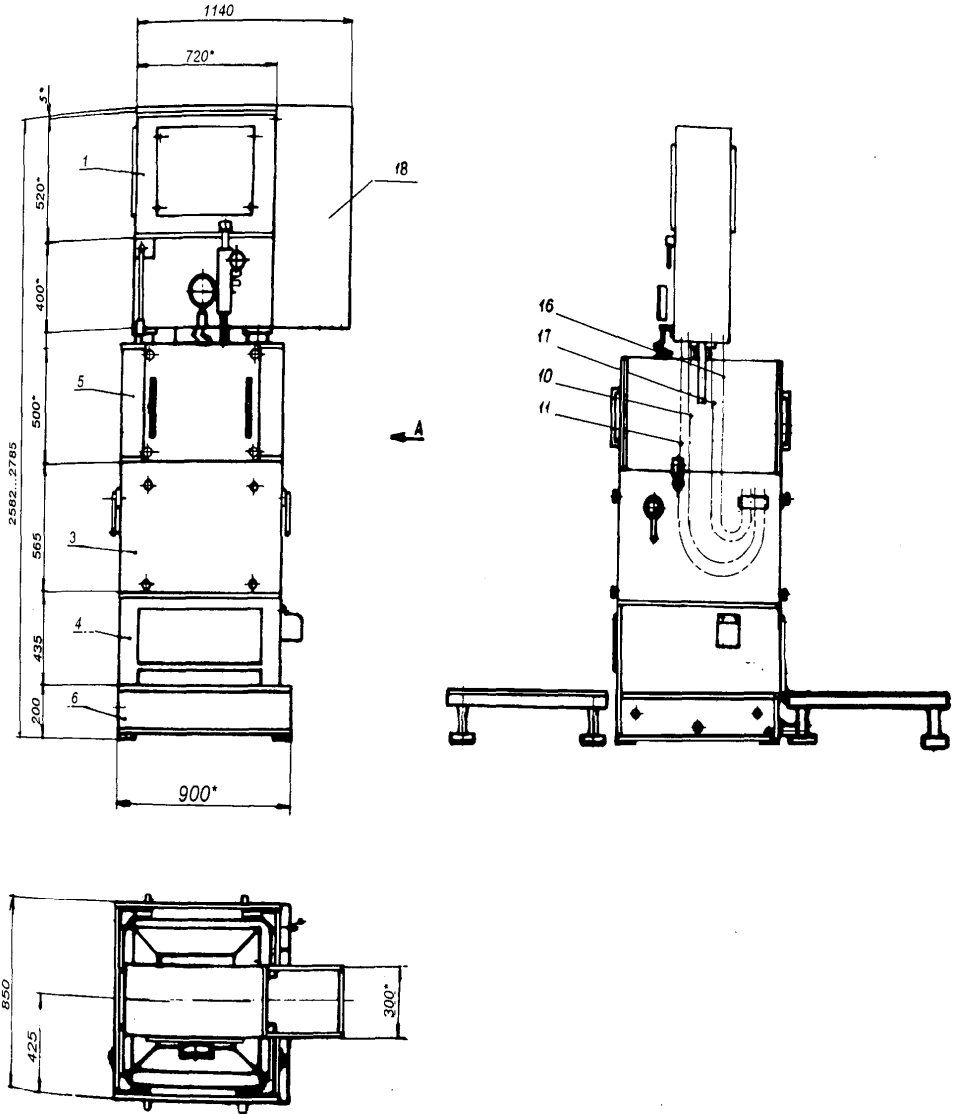


Рис. 6.20. Загальний вид верстату «Дуга – 8Д»

Верстат обладнано координатним столом 10 для установочних переміщень заготовки 11. Вузол переміщення 13 інструментальної головки 3 являє собою силовий гідроциліндр, змонтований всередині рами так, що вісь прикладення його зусилля співпадає з рівнодіючою зусиль притискування герметизованої камери 7 до заготовки 11. Розташування вузла переміщення 13 інструментальної головки 2

всередині рами дозволяє уникнути штучного збільшення габаритів верстата, що забезпечує компактність конструкції.

A-A

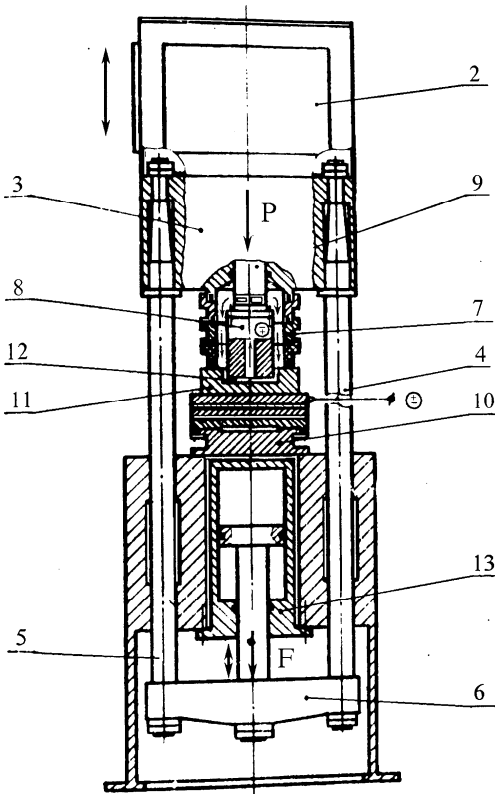


Рис. 6.21. Кінематична схема верстату «Дуга – 8Д»

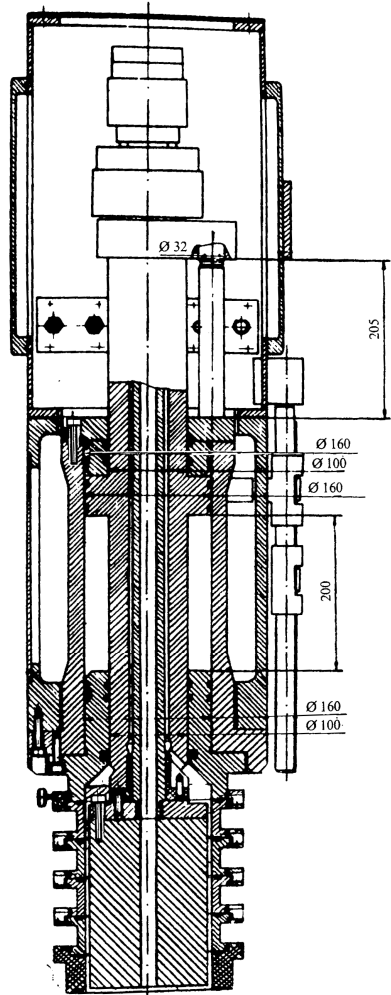


Рис. 6.22. Інструментальна головка верстату «Дуга – 8Д»

Перед початком обробки інструментальна головка 2 і електродотримач 9 знаходяться в крайньому верхньому положенні, а герметизовану камеру 7 знято. Заготовку 11 установлюють на координатний стіл 10. ЕІ 8 закріплюють на електродотримачі 9 і виставляють його по відношенню до заготовки 11. Потім збирають складену герметизовану камеру 7 і, керуючи гідроприводом вузла

переміщення 13 інструментальної головки 3, переміщують інструментальну головку 3 вниз до притискання герметизованої камери 7 до заготовки 11. При цьому центральне замикання силових ланцюгів системи «станина 1 – інструментальна головка 2 – герметизована камера 7» виключає можливість появи нецентрального зусиль і дозволяє забезпечити відповідну точність обробки.

Після вищезазначених підготовчих операцій вмикають систему подачі робочої рідини в МЕЗ 12, джерело живлення технологічним струмом, систему автоматичної подачі ЕІ і починають обробку заготовки 11.

Для контролю положення штока відносно верхньої траверси, а також для контролю глибини обробки, інструментальну головку обладнано вузлом «Глибиномір», який забезпечує відлік переміщень штока з точністю 1мм за рахунок переміщень движка відносно лінійки (хід 200мм) та «тонкий» відлік з точністю 0,01мм за рахунок використання часового індикатора ИЧ-25 (хід 25мм).

Крім того, верстат має індукційний датчик цифрової індикації величини переміщень шпинделя типу Ф-5147 (точність – 0,001мм).

Інструментальна головка обладнана вузлом «струмопровід», який змонтовано на верхній частині штока і який дозволяє підвести технологічний струм до ЕІ до 2000А, що суттєво розширює технологічні можливості верстата.

В магістралі силових гідроциліндрів переміщення штока (пінолі) і вузла «інструментальна головка» передбачено вузол «кран-гідродросьель», який призначено:

- для фіксації в будь-якому положенні вузла «інструментальна головка» при виконанні установчих переміщень; при цьому вузол «кран – гідро дросель» працює в режимі гідравлічного замка;

- для фіксації в будь-якому положенні вузла «шток»; при цьому вузол «кран-гідродросьель» працює в режимі гідравлічного замка.

Слідкуючий привод верстата – електрогідравлічний з використанням дроселюючого гідророзподільника з електромагнітним керуванням УЭ 85-10-20.

6.6.1.5. Станція гідроприводу

Станція гідроприводу призначена для переміщення ЕІ в налагоджувальному і слідкуючому режимах, а також для підняття та опускання герметизованої камери верстата (рис. 6.23).

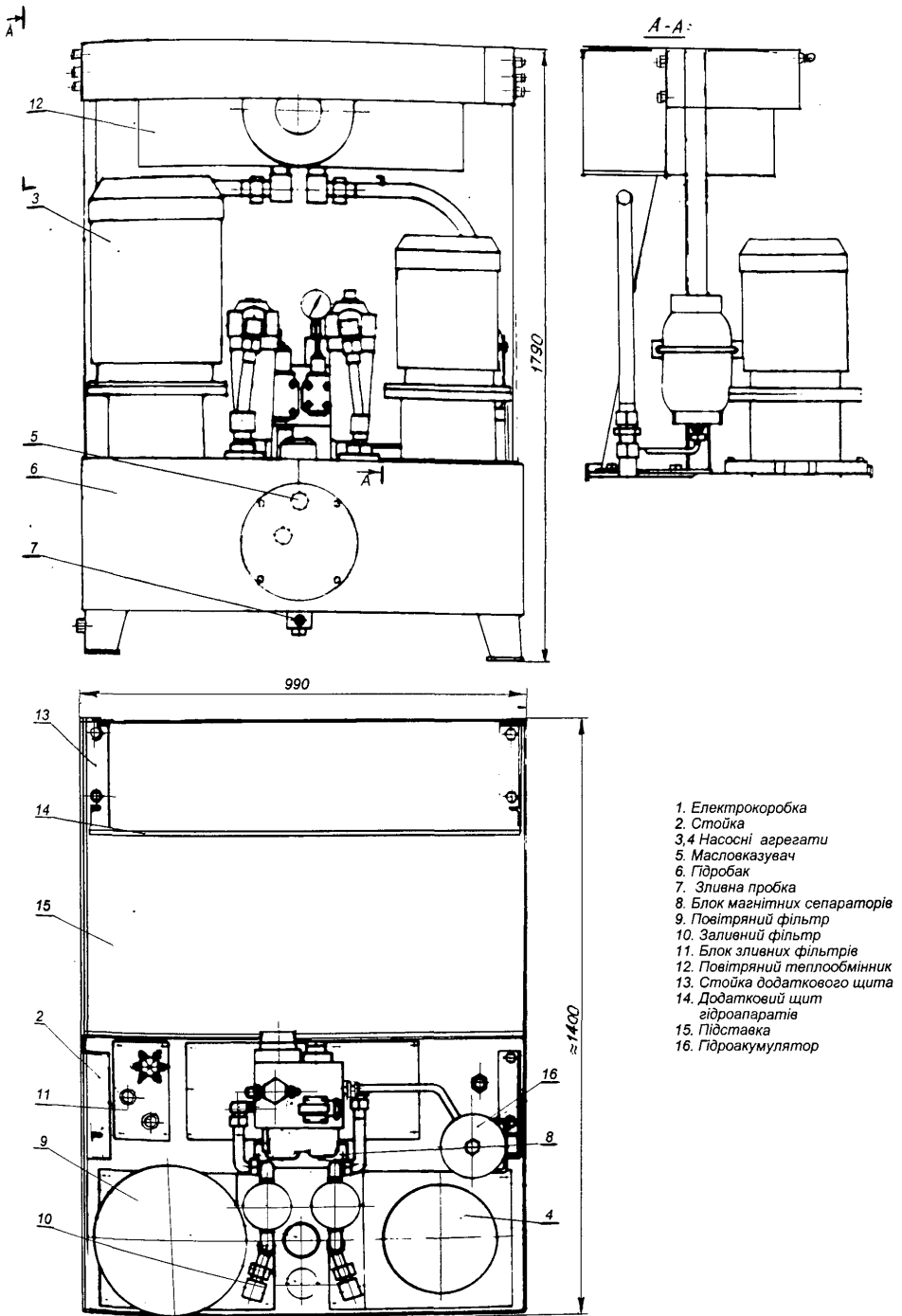


Рис. 6.23. Станція гідроприводу

Станція гідроприводу виконана на базі серійної насосної установки ЗС 160.А.В.6.3.12. 2.2.-1.12.-1.2.2.-В.6.3.50.7.5. До цієї насосної установки приєднано підставку 15 із закріпленим на стінках 13 додатковим щитом 14 для гідропанелі і гідроапаратів, які призначені для реалізації процесу РОД.

Насоси Г12-3М (рис. 6.26) продуктивністю 12 л/хв і 50 л/хв підключені через зворотні клапани 1МКО-10-20. В гілках кожного з насосів передбачено фільтри 1ФГМ16-10К-УХЛ4 та 2ФГМ32-10К-УХЛ4. Дроселюючий гідророзподільувач УЄ85-10-20 призначено для привода штока гідроциліндра подачі ЕІ в функції напруги на електродах. Паралельно дроселюючому встановлено перший гідророзподільувач ВЕХ 16.44.В110.УХЛ4, який призначено для керування прискореним переміщенням штока гідроциліндра подачі. Другий гідророзподільувач ВЕХ 16.44.В110.УХЛ4 призначено для керування переміщенням герметизованої камери.

В одній із гілок гідроциліндра переміщення герметизованої камери встановлено гідрозамок М-ЗКУ 20/320 УХЛ 4, який запобігає вільному опусканню її від власної ваги при вимкненні насоса або витіканню рідини із гідросистеми. Гідроклапани тиску ПГ 54-34 і ПБГ 54-34 призначено для регулювання тиску в гідролініях. Регулятори потоку служать для регулювання швидкості переміщення робочих органів верстата. Зливи робочої рідини з апаратів об'єднано в загальну магістраль і надходять в теплообмінник. В якості робочої рідини рекомендується індустриальне масло ИГП-18 ТУ 38-101-413-78 при температурі експлуатації 20...50°С. Для підтримки заданої температури масла в станції гідроприводу застосовують регулятор температури ТРС104, який керує роботою електродвигуна вентилятора повітряного теплообмінника Г 44-25. Щоб згладити пульсації тиску застосовують гідроакумулятор 2,5-160 ТГЛ.

Станція гідроприводу має такі особливості. В режимі «контроль» обидва насоси вмикаються незалежно. В режимі «робота» вмикаються обидва насоси і при натисненні кнопки «Пуск» вмикається на підведення гідророзподільувач ВЕХ 16.44.В.110.УХЛ4 керування прискореним переміщенням ЕІ. На початку процесу зазначений гідророзподільувач перемикається в нейтральне положення та вмикається насос більшої продуктивності. По закінченні процесу вмикається насос більшої продуктивності, а гідророзподільувач перемикається на відведення.

6.6.2. Спеціалізований горизонтальний прошивний верстат моделі “Дуга-13”

Спеціалізований горизонтальний електроерозійний прошивний верстат моделі “Дуга-13” з чотирма незалежними інструментальними головками [55] призначено для прошивання отворів діаметром 35мм на глибину до 2800мм в валках каландрів (рис. 6.24). Верстат реалізує технологічну схему формоутворення по принципу прошивання з копіюванням форми ЕІ з прокачуванням робочого середовища в напрямку від периферії до центра ЕІ.

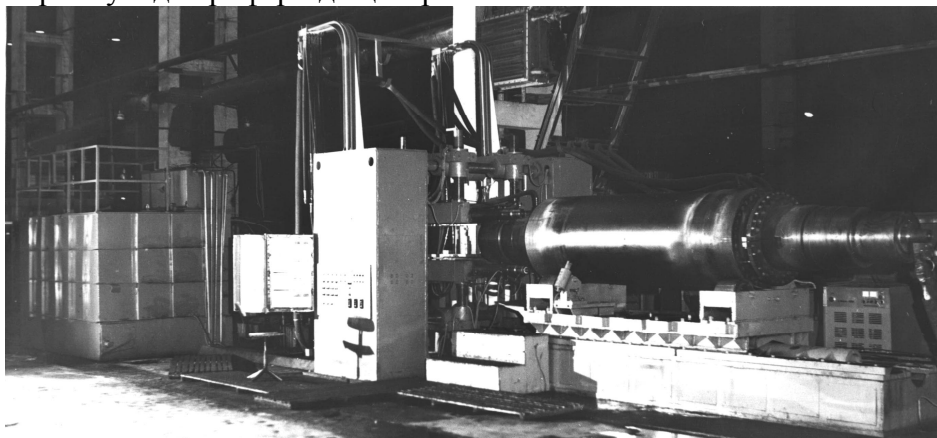


Рис. 6.24. Верстат “Дуга – 13”

Технічна характеристика.

Діаметри отворів, які отримують, мм	35
Найбільша глибина отворів, мм	2800
Кількість отворів, які отримують одночасно	4
Найбільша продуктивність обробки чотирма головками, мм ³ /хв	100000
Шорсткість обробленої поверхні, R_a , мкм	до 12,5
Зона термічного впливу, мм	до 0,01
Робоча рідина	вода технічна
Об'єм робочої рідини в баку, л	12000
Насосна установка робочої рідини	
- тип насоса	ЦНСГ-38-220
- продуктивність	650
- максимальний тиск, МПа	2,2
- потужність електродвигуна, кВт	40

Регулятор міжелектродного зазору	електро-гідравлічний з використанням гідро-розподільника типу 12Г68-11
Джерело живлення технологічним струмом	чотири зварювальних випрямляча типу ВДУ-1201 до 4000
Струм обробки, А.	до 4000
Габарит верстата (довжина×ширина×висота), мм	4200×3540×4000
Маса верстата, кг	10 000
Площа установки, м ²	90

Верстат “Дуга-13” (рис. 6.25, 6.26, 6.27, 6.28) складається з таких основних вузлів: станини 1, чотирьох інструментальних головок 2, чотирьох механізмів позиціонування 3, інструментальних головок 2 та установочного стола 23.

Станина верстата (див. рис.6.27, 6.28) виконана в вигляді основи 1, на якій встановлено дві вертикальні стойки 2 і які з’єднано поміж собою чотирма горизонтальними гвинтами 3. На гвинтах 3 змонтовано чотири механізми позиціонування інструментальних головок 4 (по два механізми на кожній парі гвинтів). Кожен механізм позиціонування являє собою два черв’ячно-гвинтових редуктора 5, 6, призначених для незалежного горизонтального і вертикального переміщення однієї інструментальної головки. З метою розвантаження підшипників черв’ячного вала від осьових зусиль останній виконано з двома черв’яками, один з яких з лівою навивкою різьби, а другий – з правою.

На чотирьох парах паралельно працюючих вертикальних гвинтів 7 жорстко закріплено чотири траверси 8.

На траверсах змонтовано інструментальні головки 9. Кожна інструментальна головка 9 виконана в вигляді гідроциліндра 10, в якому змонтовано герметизовану камеру 11 і шток електродотримача 12 з поршнем 13.

Герметизована камера 11 являє собою гідроциліндр з поршнем. Вона приводиться в рух від рідини гідроприводу і служить для герметизації зони обробки, направлення штока електродотримача та

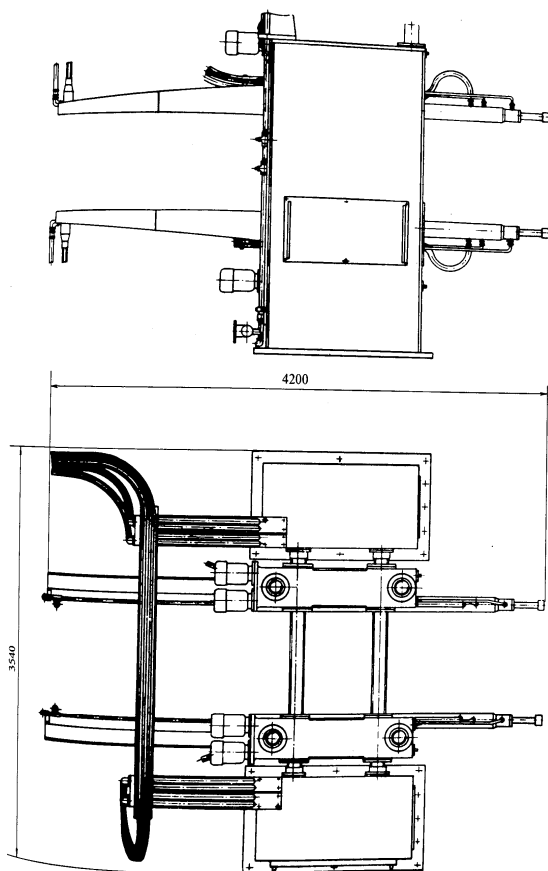


Рис. 6.25. Верстат «Дуга-13» (загальний вид)

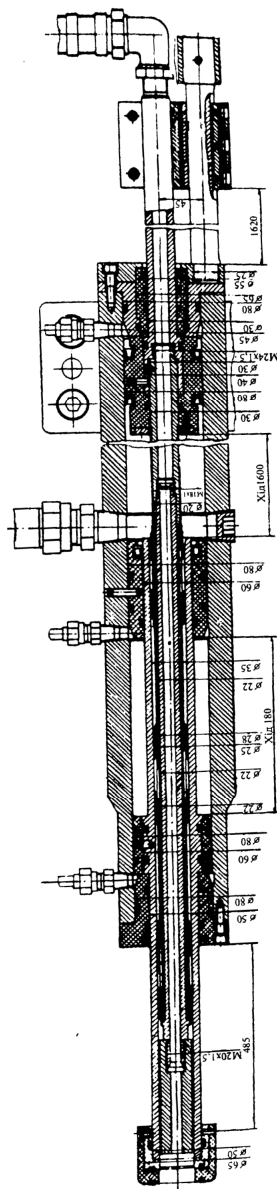


Рис. 6.26. Інструментальна головка верстату «Дуга-13» (розріз)

полегшення заміни ЕІ.

Шток електродотримача 12 виконано порожнистим і обладнано пружинними, здатними адаптуватись до зміни діаметра, напрямними елементами 14. На його кінці закріплено ЕІ 17, якому надається рух подачі посередництвом рідини гідроприводу, що подається в порожнину 18, яка зв'язана з регулятором тиску в функції МЕЗ. ЕІ утримується постійним зусиллям, яке створюється тиском робочої рідини, що подається в порожнину 19 і діє на поршень 13. Шток зафіксовано від провертання планкою 20 і напрямником 21. В місцях контакту з корпусними деталями шток ізолюовано (див. розріз інструментальної головки, див. рис.6.26).

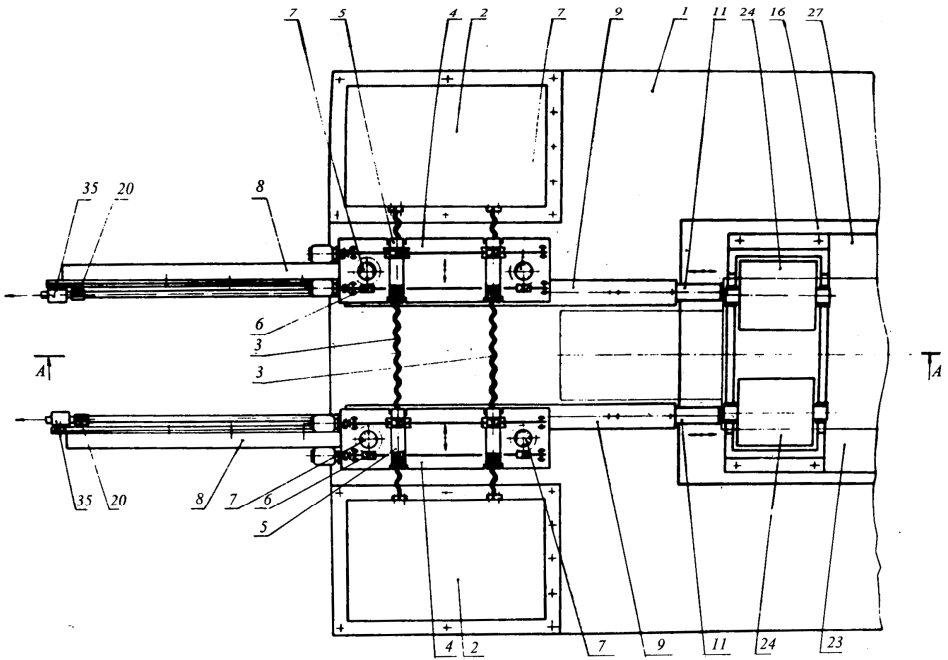


Рис. 6.27. Кінематична схема верстату «Дуга-13» (вид в плані)

Кожна інструментальна головка 9 обладнана датчиком 35, який встановлено на електроізоляторі 26 та з'єднано електрично з блоком цифрової індикації (на кресленні не показано) і який дозволяє контролювати необхідну глибину прошивання.

Заготовка (валок) 22 розташована на установочному столі 23 на опорах 24 і 25. Опори 25 виконано в вигляді роликів з буртами, які сприймають навантаження від ваги заготовки 22 і зусилля

притискання герметизованих камер 11 інструментальних головок 9.

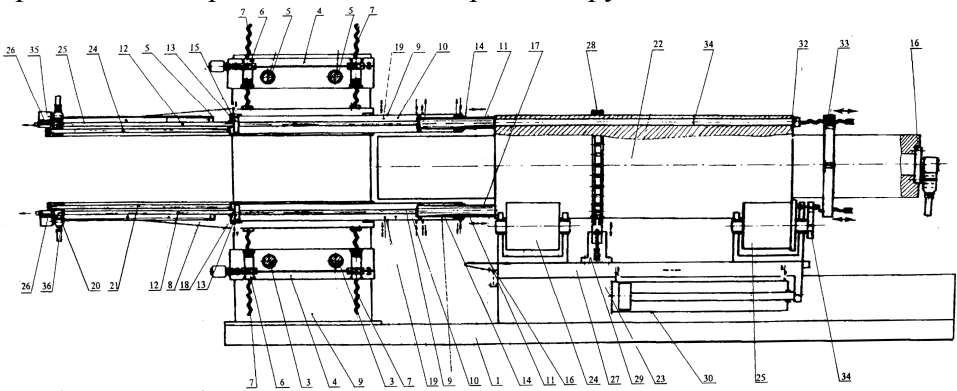


Рис. 6.28. Кінематична схема верстату «Дуга-13»

Для зручності установки заготовки верхня плита (каретка 27) установочного стола 23 виконана рухомою в напрямку подачі і приводиться в рух рідиною гідроприводу, що подається в порожнини гідроциліндра 30. По контуру каретки 27 передбачена ємкість 16, що призначена для локального зливу дренажу робочої рідини з герметизованих камер 11 і отворів 34, які обробляються.

Провертання заготовки на необхідний кут здійснюється за допомогою відкритого циліндричного зубчатого редуктора 31 з ручним приводом. Фіксація деталі від провртання здійснюється за допомогою бандажа 28 і гвинтового уловлювача 29 з ручним приводом.

Для прошивання наскрізних отворів передбачено герметизуючі упори 32, що змонтовані на бандажі 33.

Технологічний струм необхідної полярності підводиться від джерел живлення до заготовки 22 за допомогою клєми 15, а до штока електродотримача 12 інструментальних головок 9 – за допомогою планок 20.

На установочний стіл 23 установлюють заготовку 22, що підлягає обробці. Уловлювачем 29 по фіксаторах бандажа 28 закріплюють заготовку від провртання. Потім вмикається гідравлічний привод (на кресленні не показано). Рухому каретку 27 установочного стола 23 разом із заготовкою 22 переміщують гідроциліндром 30 в вихідне робоче положення.

Черв'ячно-гвинтовими редукторами 5 і 6 механізмів позиціонування 4 виставляють інструментальні головки 9 на

необхідні для обробки координати.

На штоках електродотримачів 12 закріплюють ЕІ 17. Герметизовані камери 11 притискають до заготовки 22, локально обмежуючи зону обробки. Включають систему подачі робочої рідини в МЕЗ, а також джерела живлення технологічним струмом і починають процес електроерозійної обробки заготовки 22.

Регулювання МЕЗ кожної інструментальної головки здійснюється одночасно в функції гідравлічного опору зазору і в функції міжелектродного потенціалу.

Продукти ерозії видаляються із зони обробки робочою рідиною через центральні отвори в ЕІ 17 і штоках електродотримача 12.

Керування верстата здійснюється з пульта керування.

6.6.3. Спеціальний горизонтальний різьбонарізний верстат моделі “Дуга-15”

Спеціальний горизонтальний різьбонарізний електроерозійний верстат моделі “Дуга-15” [57] призначено для нарізання внутрішньої конічної різьби $K1^{1/2}$ ” в валках каландрів, що дозволяє вирішити проблему отримання різьб у відбіленому шарі чавуну. Верстат реалізує технологічну схему прямого копіювання, коли ЕІ отримує гвинтову подачу (осьову і кругову), а робоча рідина прокачується поміж електродами.

Технічна характеристика

Матеріал, що обробляється.	відбілений чавун, HRC 55...60
Різьба, що отримується.	$K 1^{1/2}$ ”, ГОСТ6211-69
Швидкість обробки, мм/хв.	4...8
Шорсткість поверхні Ra, мкм.	6,3
Зона термічного впливу, мм.	відсутня
Робоча рідина.	мастило індустріальне И12А, ГОСТ 20000799-7
Об’єм робочої рідини бака, л.	3500

Насос подачі робочої рідини:

- продуктивність, л/хв. 70
- максимальний тиск, МПа. 6,3
- потужність електродвигуна, кВт. 10

Привод подачі ЕІ. електро-механічний

Джерело живлення технологічним струмом:

- тип. ВДУ-50 4
- межі регулювання струму, А. 50-500

Габарит верстата (довжина×ширина×висота), мм 150×1300×1700

Маса верстата, кг. 1000

Площа установки, м². 90

Верстат «Дуга-15» (рис.6.29, 6.30, 6.31) складається з таких основних вузлів: станина 1, стіл установочний 3, інструментальна головка 11, механізм подачі ЕІ 18.

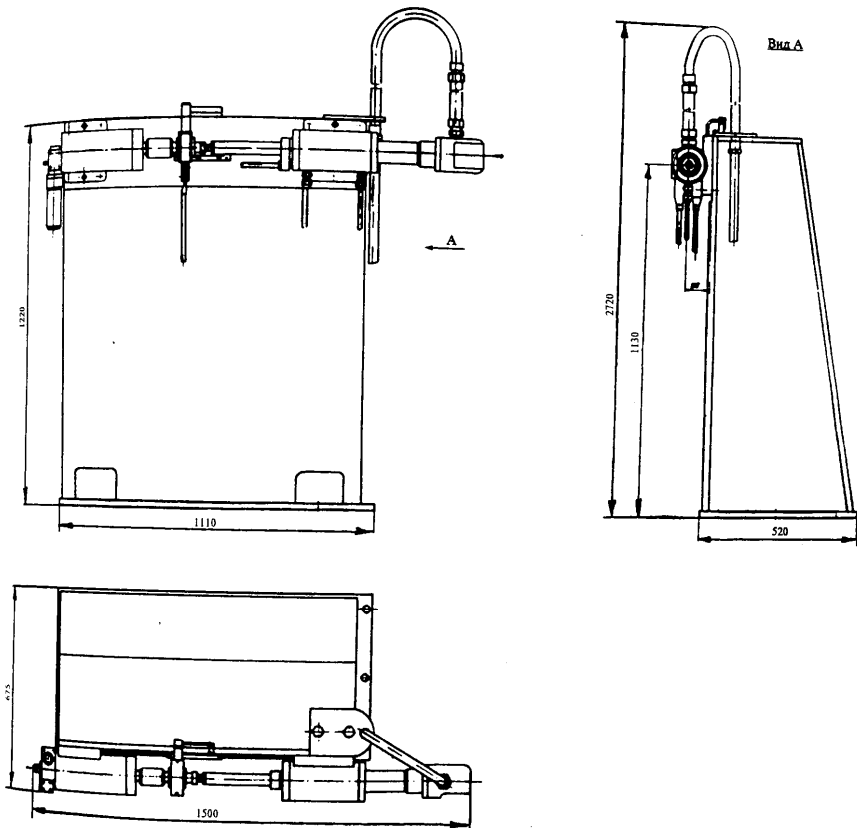


Рис. 6.29. Верстат «Дуга-15» (загальний вид)

6.6.4. Переносна електроерозійна машина моделі “Дуга-23”

6.6.4.1. Призначення і область застосування

Переносна електроерозійна машина “Дуга-23” [59] призначена для прошивання наскрізних і глухих круглих чи близьких до них отворів діаметром від 8 до 25мм в деталях, виготовлених переважно з важкооброблюваних електропровідних матеріалів. Завдяки наявності вакуумних захватів (присосок) вона може бути встановленою на будь-якій відносно гладкій поверхні в будь-якому положенні в просторі без додаткового кріплення і може бути використана, зокрема, при виконанні судноремонтних робіт для прошивання отворів в маломагнітних важкооброблюваних сталях, де аналогічні свердлувальні машини з електромагнітними башмаками не можуть бути застосованими.

Переносна електроерозійна машина “Дуга-23” розроблена в двох варіантах виконання:

- “Дуга-23М” з електромеханічним приводом;
- “Дуга-23Г” з електрогідралічним приводом.

На рис.6.32 і 6.33 показана установка “Дуга-23М” в робочому положенні, коли вона встановлена на вертикальній поверхні, що обробляється.

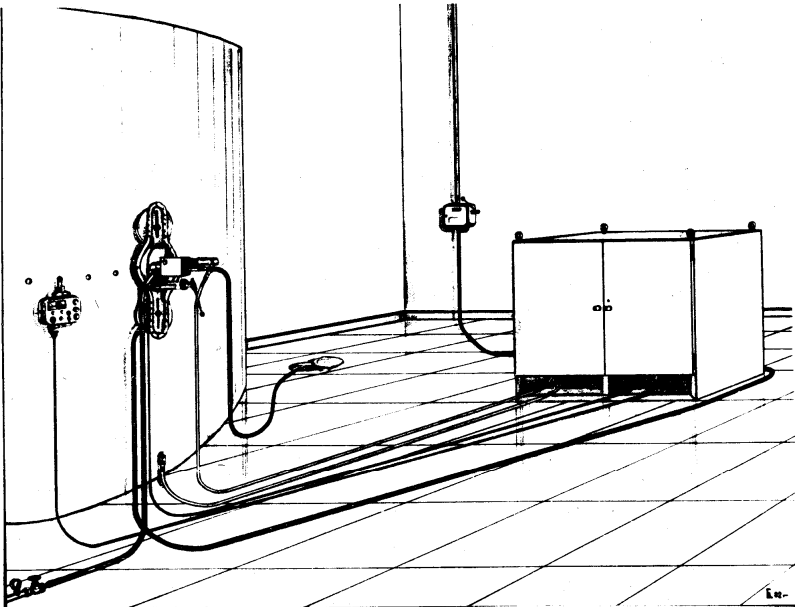


Рис. 6.32. Переносна електроерозійна машина “Дуга-23М” в робочому положенні

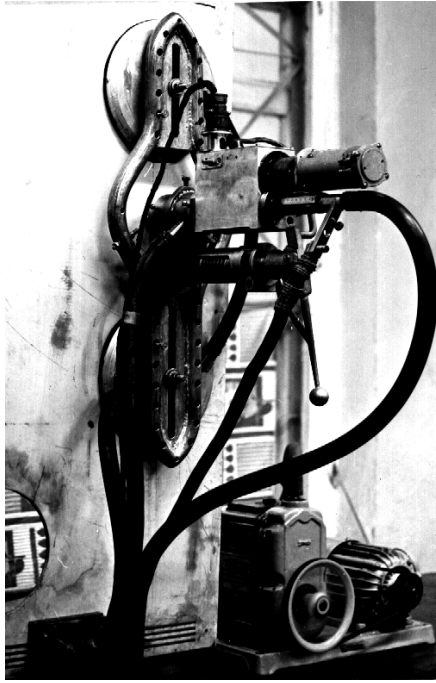


Рис. 6.33. Переносна електроерозійна машина “Дуга – 23М”

6.6.4.2. Технічна характеристика

Діапазон діаметр отворів, які отримують, мм	8...25
Найбільша продуктивність по сталі Ю-3, мм ³ /хв	до 1600
Шорсткість обробленої поверхні, R_a , мкм	до 12,5
Хід штока, мм	80
Характеристика вакуумних захватів:	
– найбільший діаметр, мм	250
– кількість захватів, шт.	2
– найменша відстань від центра отвору, що прошивається, до центру захвату, мм	160
– найбільша відстань від центра отвору, що прошивається, до центра захвату, мм	312
Спосіб позиціонування ЕІ відносно деталі.	по керну
Характеристика робочого середовища:	
– склад	вода технічна
– робочий тиск, МПа.	> 0,5 МПа

– спосіб нагнітання.	від цехової напірної магістралі
Габарити (довжина×ширина×висота), мм	800×300×600
Джерело живлення технологічним струмом	ВДУ-504
Вакуумний насос	ВН-461М
Параметри машини “Дуга-23М”	електромеха- нічний
– привод переміщення штока	15
– маса машини, кг	800
– маса установки в контейнері, кг	1900×1500 ×1700
Параметри машини “Дуга-23Г”:	електро- гідравлічний
– привод переміщення штока	13
– маса машини, кг	2000
– маса установки в контейнері, кг	2000×1500× 1950
– габарити контейнера (довжина×ширина×висота), мм	

6.6.4.3. Комплект установки “Дуга-23М”

Машина “Дуга-23М” являє собою установку, що складається з таких основних вузлів: власне машина “Дуга-23М”, вакуумний насос, переносний блок керування, електрошафа, джерело живлення технологічним струмом.

З метою забезпечення мобільності установки та зручностей транспортування основні вузли і приналежності змонтовано в перевізному контейнері (рис.6.34).

Контейнер 1 включає в себе:

- інструментальну головку 2;
- електрошафу 4;
- вакуумний насос 5 типу ВН-461М;
- зварювальний випрямляч 6 типу ВДУ-504;
- ящик 7 з технологічним інструментом;
- ящик 8 із запасними і змінними деталями машини;
- ящик 9 з ЕІ, виготовленими переважно з графітових матеріалів;
- шафу 10 для техдокументації та аптечку 11;

- електрокабель 12 живлення електродвигуна переміщення штоку;
- переносний блок керування 13;
- електрокабель 14 переносного блока керування;
- два електрокабеля 15 живлення машини технологічним струмом;
- рукав 16 дренажу рідини;
- рукав 17 вакуум-насоса;
- електрокабель 18 живлення установки (~380 В);
- електрокабель заземлення 20;
- інструкція 21 по експлуатації установки і правилах ТБ.

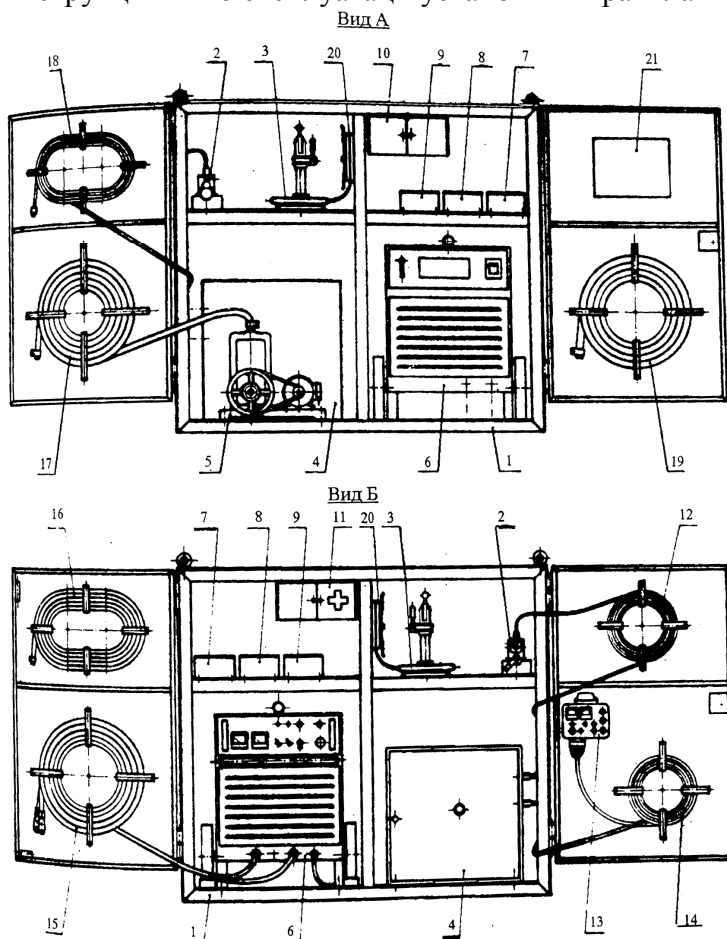


Рис. 6.34. Види на контейнер машини «Дуга-23М» з відкритими передніми і задніми дверима

6.6.5. Електроерозійні головки РОД до металорізальних верстатів

Переважна більшість металорізальних верстатів може бути обладнана ЕЕГ РОД без втрати металорізальними верстатами їх основних функцій, що значно розширює технологічні можливості останніх. Для цього звичайно достатньо замінити металорізальний інструмент верстата на ЕЕГ. Розглянемо типові конструкції ЕЕГ РОД до металорізальних верстатів.

6.6.5.1. Електроерозійна прошивна головка АМН-1 до настільного свердлувального верстата

6.6.5.1.1. Призначення і область застосування

Електроерозійна прошивна головка АМН-1 до настільного свердлувального верстата призначена для прошивання наскрізних та глухих отворів різних поперечних перерізів, для виготовлення фасонних стержнів та порожнин в деталях з будь-яких металів і сплавів, зокрема загартованих сталей і твердих сплавів, а також для випалювання залишків поламаного інструменту. Вона значно розширює технологічні можливості свердлувального верстату, перетворюючи його за 5 хвилин наладки в електроерозійний верстат, а, при необхідності, за ті ж 5 хвилин знову в свердлувальний. Для цього свердло замінюється на електроерозійну головку.

Головка знаходить застосування в ремонтних майстернях, інструментальних цехах, а в ряді випадків і в основному виробництві для виготовлення серійних деталей.

6.6.5.1.2. Технічна характеристика

Найбільший поперечний розмір електрода, мм	40
Найбільша глибина прошивання, мм	
– без перестановки головки.	40
– з перестановкою головки	80
Джерело живлення технологічним струмом	зварювальні випрямлячі струм до 300 А
Джерело живлення робочої рідини.	гідростанція або водопровідна мережа тиском >0,3МПа
Швидкість прошивання, мм/хв	до 20

6.6.5.1.3. Комплект установки

Установка складається із свердлувального настільного верстату, власне головки, джерела живлення технологічним струмом (яким є звичайний зварювальний випрямляч, можна трансформатор), джерела живлення робочою рідиною (гідростанції або, найпростіше, водопровідна мережа тиском $> 0,3\text{МПа}$) та комплекту універсальних пристроїв.

6.6.5.1.4. Опис установки

Установка включає в себе свердлувальний верстат 1 (рис.6.35), в якому взамін свердла закріплюють електроерозійну головку 2. Джерелом живлення електричним струмом є випрямляч 3, один полюс якого з'єднують з головкою, а другий зі столом свердлувального верстата. Вода від водопровідної мережі 4 надходить до електроерозійної головки, а після головки іде на злив 5.

В залежності від умов замовника (покращення зручностей в експлуатації, відсутність водопровідної мережі з необхідними показниками тиску води, необхідність підвищення якості обробки та зменшення зносу електрода і т.і.) головка може комплектуватись по спецзамовленню пультом керування та станцією робочої рідини з використанням певного виду робочої рідини, наприклад масла індустріального.

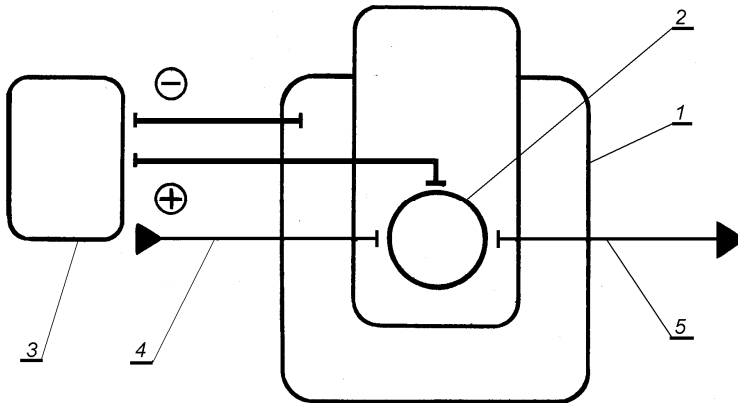


Рис. 6.35. Принципова схема підключення ЕЕГ АМН-1

Інструментом є електроди відповідних форм та розмірів, що закріплюються в електроерозійній головці.

Робота установки полягає в наступному. Спочатку застопорюють шпиндель верстата від обертання. Потім монтують головку з електродом, підключаючи її до джерел живлення

електричним струмом та робочої рідини згідно наведеної схеми. Далі закріплюють на столі верстата деталь. Головку опускають донизу до стискання її з деталлю, герметизуючи зону обробки. Електрод при цьому знаходиться на відстані декількох міліметрів від деталі. Потім пускають робочу рідину. Вмикають електричний струм. Подають шпиндель верстата, а значить і електрод (як і при свердлуванні) донизу. Починається процес обробки. надалі не треба допускати коротких замикань. Це не важко, оскільки, як і при свердлуванні, добре відчутним є протитиск на шпиндель і, відповідно, на ручку подачі шпинделя. По закінченні процесу спочатку (обов'язково) вимикають струм, потім робочу рідину і лише потім піднімають головку та знімають деталь.

Вказана послідовність роботи є обов'язковою.

6.6.5.1.5. Опис ЕЕГ

Головка АМН-1 складається (рис.6.36) зі шпинделя 4, по якому вільно рухається камера 3 з ущільненням 9. На нижню частину камери нагвинчено ізолятор 2 з ущільненням 1, що герметизує камеру при її притисканні до заготовки чи спеціального пристрою. Шпиндель ізольовано від тримача 8 прокладками 6 і 7. Кріплення головки в верстаті здійснюють за допомогою тримача 8.

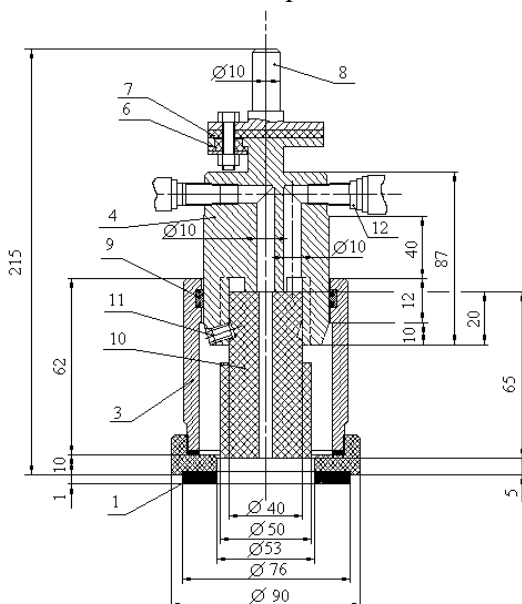


Рис. 6.36. Електроерозійна головка АМН – 1

6.6.5.2. Електроерозійна головка АМН-2 до свердлувального верстата для прошивання вузьких щілин в листовому металі. При отриманні вузьких щілин в листовому металі з використанням пробивних штампів існує проблема стійкості пробивних пуансонів і, в цьому зв'язку, є обмеження ширини щілини, яка не може бути меншою товщини заготовки. В цих випадках звичайно застосовують ЕРО. Проте традиційні способи ЕРО не забезпечують достатньо високої продуктивності. Тому помітний практичний інтерес являють собою ЕЕГ РОД АМН-2 до свердлувальних верстатів, які відрізняються від ЕЕГ АМН-1 лише тим, що ізолятор 2 (див. рис. 6.36) являє собою трафарет (див. рис. 6.13), який забезпечує течу рідини згідно визначеної технологічної схеми формоутворення і дозволяє отримувати, наприклад, в листовому матеріалі із нержавіючої сталі товщиною 3мм одночасно десять щілин розмірами в плані 2×20мм кожна за одну хвилину при реалізації технологічного струму 200А.

Звернемо увагу, що ЕЕГ АМН-1 та АМН-2 дозволяють реалізувати практично всі розділові операції, що є характерними для листового штампування. Залишається лише визначити область раціонального застосування таких ЕЕГ. Очевидно, це, перш за все, дрібносерійне виробництво, коли переваги ЕЕГ РОД порівняно зі штампами є особливо переконливими, а саме: ЕЕГ являють собою просте універсальне оснащення і достатньо лише замінити ЕІ і, інколи, трафарет, щоб реалізувати на таких ЕЕГ будь-які розділові операції, обмежені лише габаритами ЕЕГ. До того ж при цьому використовується просте і дешеве обладнання (свердлувальні верстати проти дорогих і потужних пресів). Зазначимо, проте, що свердлувальні верстати не повною мірою відповідають вимогам точності і жорсткості і тому в таких випадках доцільно використати спеціальні, конструктивно прості верстати РОД, що забезпечують такі вимоги.

6.6.6. Копіювально-прошивний верстат моделі АМ-1

6.6.6.1. Призначення та галузь застосування. Універсальний вертикальний електроерозійний копіювально-прошивний верстат моделі «АМ-1» (рис. 6.37), що реалізує технологічну схему формоутворення по принципу прошивання з об'ємним копіюванням форми ЕІ, призначено для РОД деталей, які виготовлено із будь-яких

струмопровідних, переважно важкооброблюваних матеріалів, зокрема ливарної високоміцної сталі 110Г13Л та твердих сплавів.

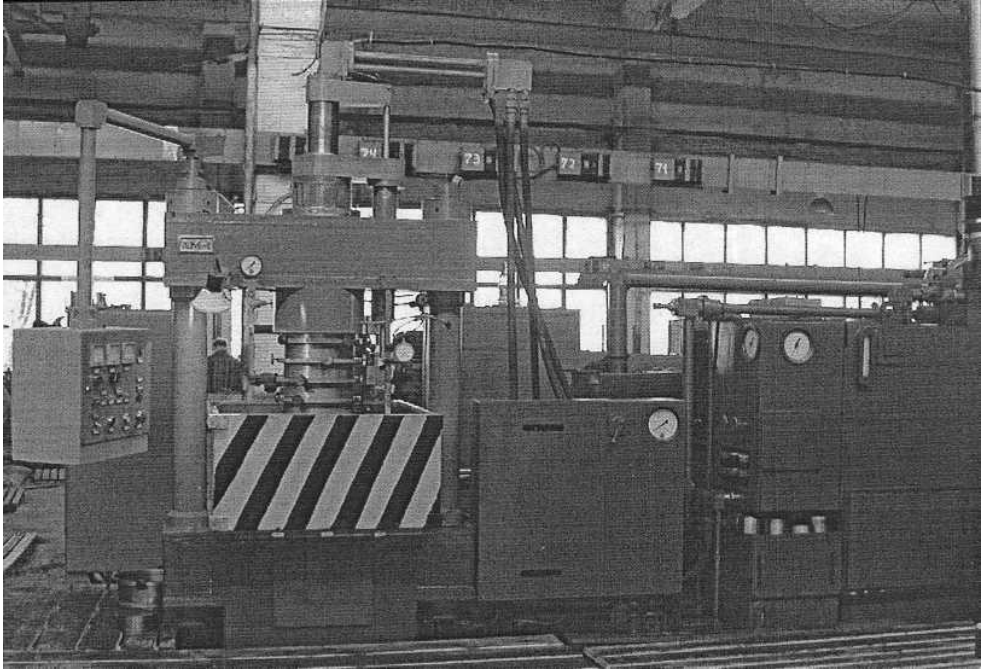


Рис. 6.37. Електроерозійний копіювально-прошивний верстат моделі “АМ-1”

Верстат може бути використано для виконання наступних робіт:

- прошивання отворів простої (круглої, n -граної) та складної форми перерізу (прямокутної, фасонної та конічної) в умовах зворотного способу прокачування робочої рідини крізь торцевий МЕЗ;
- прошивання фасонних порожнин кувальних штампів та прес-форм в умовах зворотного способу прокачування робочої рідини крізь торцевий МЕЗ;
- виготовлення стрижнів простої та складної форми в умовах прямого способу прокачування робочої рідини крізь торцевий МЕЗ.

6.6.6.2. Технічна характеристика верстата

Розміри робочої поверхні нерухомого стола (ширина×довжина), мм	880×1190
Діаметр рухомого стола, мм	600
Найбільша маса електрода-інструмента, кг:	

- графітового	50
- металевого	200
Найбільша маса деталей, що обробляється, кг	600
Найбільший діаметр (розмір в плані) порожнини, що обробляється, мм	300
Внутрішній діаметр герметизованої камери, мм ...	320
Найбільша відстань між робочою поверхнею нерухомого стола та торцевою поверхнею шпинделя плити, мм	670
Хід шпинделя, мм	400
Наявність зрівноважувача осевого зусилля шпинделя	є
Привід слідкування за торцевим міжелектродним зазором	електро-гідравлічний
Найбільша продуктивність обробки по сталі 45 при технологічному струмі 1200А, мм ³ /хв.	27 000
Найменша шорсткість обробленої поверхні по ГОСТ2789-73, мкм	Ra3,2
Межі регулювання сили технологічного струму, А .	50-1200
Сумарна потужність джерел живлення технологічним струмом, кВт	134
Габарити верстата (довжинахширинахвисота), мм ..	2440×2100×3005
Маса верстата, кг	2500
Площа установки, м ²	24

6.6.6.3. Комплект установки. До складу верстата «АМ-1» що являє собою установку, входять наступні елементи (рис. 6.38): 1 – верстат «АМ-1»; 2 – станція робочої рідини; 3 – станція гідроприводу; 4 – електрошафа захисно-пускових апаратів; 5 – інструментальна тумбочка; 6 – джерело живлення технологічним струмом (зварювальний випрямляч ВДУ 1201).

6.6.6.4. Опис механічної частини. Верстат складається з наступних основних вузлів та деталей: інструментальної головки; траверси та станини, що виконані методом зварювання; стола на аеростатичній опорі; пульта гідрокерування; пульта керування; поворотного кронштейна; восьми електрокабелів; шести затискних механізмів; опори; проміжного баку.

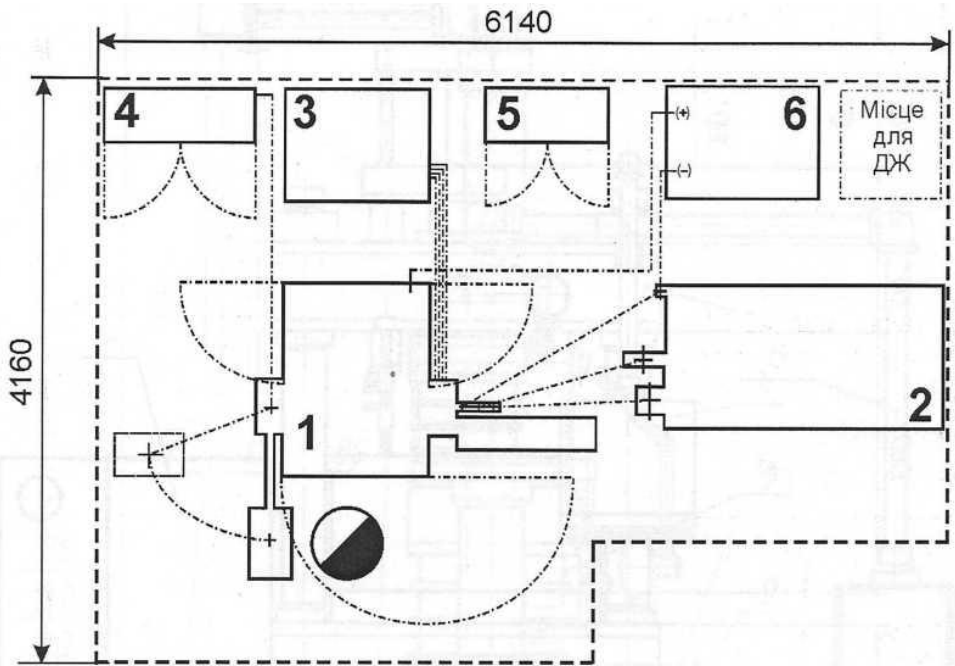


Рис. 6.38. Габаритне креслення установки «АМ-1»

Станина з двома жорстко змонтованими стояками та поперечною траверсою утворюють замкнену прямокутну раму. В траверсі по центру змонтовано інструментальну головку (рис. 6.39) – головний вузол верстата, що визначає його технологічні можливості. Таке компонування головки в порталній рамі забезпечує рівномірний розподіл навантаження від силової дії робочої рідини в герметичній камері на елементи верстата, що позитивно впливає на точність обробки та спрощує його конструкцію порівняно з верстатом моделі «Дуга-8Д».

Для розвантаження привода подачі електрода від осьових зусиль на шток в результаті тиску робочої рідини в камері на електрод і шток, верстат обладнано двобічним гідроприводом протитиску (див. п. 6.2.6, рис. 6.10).

Герметизація робочої зони верстата здійснюється шляхом вертикального притиснення кілець герметичної камери кільцевим гідроциліндром, що може працювати як від робочої рідини, так і від рідини станції гідроприводу. Щоб запобігти попаданню забрудненої продуктами ерозії робочої рідини в систему гідроприводів, обидві порожнини циліндра гідроприводу протитиску з'єднано з одного боку

через гідрозамок з баком чистої рідини, а з другого боку через мембранний гідроконтактор з напірним трубопроводом робочої рідини. Аналогічно порожнина циліндра притискання камери з'єднана через гідрозамок з баком, а через мембранний гідроконтактор з напірним трубопроводом (див. п. 6.2.7).

Верстат «АМ-1» працює таким чином. У вихідному положенні кільця герметичної камери знято, шпindelь знаходиться у середньому положенні (для зручності кріплення ЕІ). ЕІ безпосередньо, або на електродотримачі надійно кріплять до

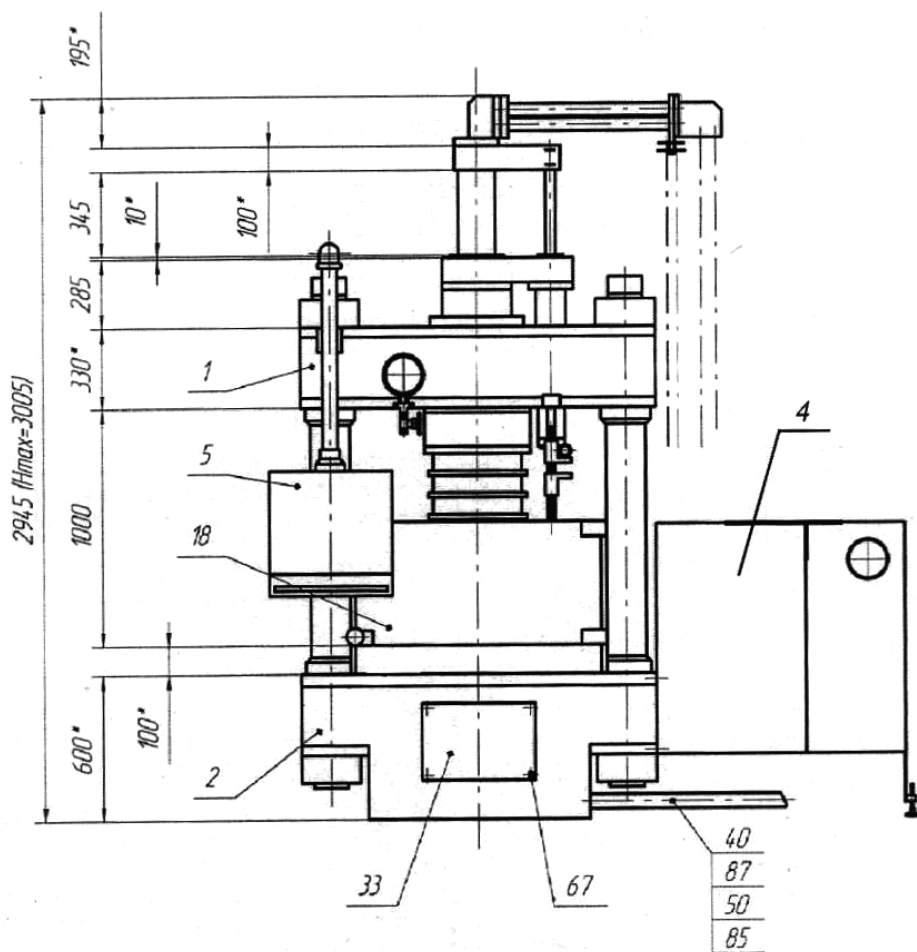


Рис. 6.39. Верстат «АМ-1» (вид спереду)

шпиндельній плиті болтами для забезпечення якісного струмовідводу з боку шпинделя та уникнення нагрівання і дугоутворення в місці контакту. Монтують кільця верхньої половини герметичної камери. На столі поза робочої зони встановлюють та закріплюють болтами електрод-заготовку (безпосередньо до столу або з використанням проміжної технологічної плити). Стіл разом з ЕЗ переміщують в горизонтальній площині по плиті в робочу зону верстата. Якщо ЕЗ встановлена в технологічній пристрій, тобто вже зпозиціонована відносно стола, то залишається лише зафіксувати стіл відносно плити верстата за допомогою фіксаторів стрижневого типу, а далі змонтувати кільця нижньої половини герметичної камери. Якщо ЕЗ вільно закріплена на столі, тобто не зпозиціонована відносно нього, то спочатку фіксують стіл, позиціонують ЕЗ відносно ЕІ, а вже далі монтують кільця нижньої половини герметичної камери. Герметизують камеру шляхом вертикального переміщення її верхньої кільцевої частини вниз за допомогою гідравлічного приводу. Включають електродвигун насосу подачі робочої рідини в робочу зону верстата під технологічним тиском (робочий тиск – 0,4...2МПа). Верстат забезпечує як пряме так і зворотне прокачування робочої рідини крізь торцевий МЕЗ. Включають джерело живлення технологічним струмом (при використанні зварювального випрямляча ВДУ1201 сила струму змінюється в межах 100...1200А; можуть використовуватися інші джерела живлення) і в слідкуючому режимі переміщення шпинделя (з використанням дроселюючого розподільника УГЗ- 12/16) здійснюють обробку виробу. При обробці матеріал електродів перетворюється в порошок, який вилучається із зони обробки потоком робочої рідини і, в кінцевому випадку, накопичується у збірнику шламу вузла «Станція робочої рідини» (див. ст. 173-177). Матеріал ЕІ (як правило електроерозійний графіт марки МПГ-7) зношується значно менше матеріалу ЕЗ: відносний лінійний знос його при обробці сталей лежить у межах 0,1...1%. Глибину обробки контролюють за допомогою вузла «Глибиномір» з точністю до 1мм по металевій лінійці, або з точністю 0,01мм за

допомогою годинникового індикатору. Після досягнення певної глибини обробки плавно зменшують технологічний струм до нуля, відключають джерело живлення технологічним струмом та електродвигун насосу робочої рідини і розгерметизують камеру. Верстат передбачає видалення робочої рідини із камери через наскрізний отвір в плиті, або на плиту. В обох випадках рідина прямує в дренажний бак, а з нього перекачується в агрегат для її відновлення (очищення та охолодження).

6.7. Висновки

6.7.1. Фізичні умови реалізації процесу визначають такі основні елементи установки для РОД: власне верстат, який має станину, стіл, на якому кріпиться заготовка, електроерозійну (інструментальну) головку, в якій кріпиться ЕІ і яка забезпечує підведення технологічного струму і підведення та відведення із зони обробки робочої рідини та реалізацію відповідної технологічної схеми формоутворення в цілому та різні механізми, що забезпечують рух відповідних елементів верстата; систему (станцію) живлення робочою рідиною; систему автоматичної подачі ЕІ; джерело живлення технологічним струмом.

6.7.2. При проектуванні верстатів РОД реалізовано концепцію локального підведення робочої рідини в зону обробки, для чого розроблено системний ряд ЕЕГ різноманітних конструкцій. Це дозволяє не лише усунути недоліки існуючих електроерозійних верстатів (складність конструкції, металоємкість, незручність обслуговування), але й реалізувати процес РОД на будь-яких металорізальних верстатах без втрати останніми своїх основних функцій, що значно розширює їх технологічні можливості.

6.7.3. Запропоновано принципові схеми ЕЕГ і локальних камер, які класифіковано за способом підведення і відведення робочої рідини в зоні обробки, а саме: герметизовані локальні камери, які поділяються на камери з приводом притискання і камери з самопритисканням та негерметизовані локальні камери, що

поділяються на камери-огорожі, камери-затоплення, камери затоплення потоками керованої дії та подвійні камери затоплення потоками керованої дії.

6.7.4. На підставі аналізу і узагальнень теоретичних і експериментальних даних та практичного досвіду викладено основні особливості проектування верстатів РОД у вигляді основних типових конструкторських рішень, що в підсумку дозволяє на підставі відповідних уніфікованих підходів проектувати як універсальні та спеціальні копіювально-прошивні верстати РОД, так і ЕЕГ РОД до металорізальних верстатів.

6.7.5. Описано принципові схеми, типові конструкції і порядок роботи та сформульовано вимоги до станцій робочої рідини, систем автоматичної подачі ЕІ та джерел живлення технологічним струмом верстатів РОД.

6.7.6. Наведено технічні характеристики, призначення та область застосування, комплект установки, опис конструкцій та порядок роботи типових верстатів і ЕЕГ РОД, а саме: універсального копіювально-прошивного верстата моделі "Дуга-8", спеціалізованого горизонтального прошивного верстата моделі "Дуга-13", спеціального горизонтального різьбонарізного верстата моделі "Дуга-15", переносної електроерозійної машини моделі "Дуга-23", ЕЕГ РОД до металорізальних верстатів, зокрема, моделей АМН-1 та АМН-2, до настільних свердлувальних верстатів, копіювально-прошивного верстату моделі АМ-1.

6.7.7. Показано, що як універсальні, так і спеціальні верстати РОД можуть бути високоефективно використані як в інструментальному, так і в основному виробництвах, а прості і дешеві ЕЕГ РОД до металорізальних верстатів значно розширюють технологічні можливості останніх без втрати ними своїх основних функцій і помітно розширюють область практичного застосування РОД в інструментальному і основному виробництвах, а також при виконанні ремонтних робіт і, можуть знайти широке застосування при виконанні розділових операцій листового штампування замість дорогих штампів в умовах дрібносерійного виробництва.

7. ТИПОВІ ПРОЦЕСИ РОД

Можливості практичної реалізації процесів металообробки визначаються, перш за все, можливостями реалізації відповідних технологічних схем формоутворення, які, як зазначалось, в умовах РОД можуть бути різноманітними. При цьому порівняно прості типові процеси РОД, наприклад, формоутворення простих за формою отворів та порожнин, реалізується без ускладнень, якщо використати вище викладені уніфіковані технологічні прийоми (див. 5.1). Що ж до достатньо складних, оригінальних та унікальних процесів, то вони вимагають індивідуальних підходів та відповідного теоретичного та експериментального доопрацювання. Описані саме такі процеси РОД, що отримали практичне застосування та є конкурентоспроможними порівняно з іншими альтернативними процесами металообробки.

7.1. РОД порожнин штампів для гарячого об'ємного штампування

Порожнини штампів для гарячого об'ємного штампування звичайно мають складну форму в плані і достатньо крупногабаритні. Тому при отриманні таких порожнин способом РОД застосовують описаний прийом багатозонного прокачування (див. рис. 5.1), [105]. Окрім того такі порожнини мають складний рельєф, що характеризується наявністю виступів та заглибин. Щоб його отримати технологічні канали в ЕІ розташовують на заглибинах та виступах, а прокачування робочої рідини в МЕЗ здійснюють в напрямку від каналів заглибин до каналів виступів. Проте виступи можуть бути різної висоти, що порушує стабільність процесу. Тому з метою підвищення стабільності процесу, канали виступів, які на початку процесу не знаходяться в робочому контакті з поверхнею, що обробляється, попередньо закривають електродними пластинами [95].

На рис. 7.1. зображено принципові схеми початку (а) і завершення (б) процесу обробки порожнин складного рельєфу. Процес обробки здійснюється в герметизованій камері 1. Електрична дуга 2 горить поміж ЕІ 3 і ЕЗ 4 в поперечному потоці робочої рідини. Канали зливу ЕІ 3, що на початку процесу не лежать в одній площині з поверхнею ЕЗ 4, попередньо закриті мідною фольгою (рис. 7.2. а) або ж алюмінієвими ковпачками (рис. 7.2. б). Нагнітання робочої рідини здійснюють в МЕЗ через канали 6, які розташовано в заглибинах 7 ЕІ 3. відведення робочої рідини та продуктів ерозії з

МЕЗ здійснюють через канали 8, 9, що розташовані на виступах 10 ЕІ. При цьому канали 9 виступів 10, які не лежать в одній площині з поверхнею заготовки 4 і попередньо закриті електропровідним матеріалом 11, відкриваються за рахунок електроерозійного руйнування цього матеріалу при стиканні з поверхнею заготовки 4.

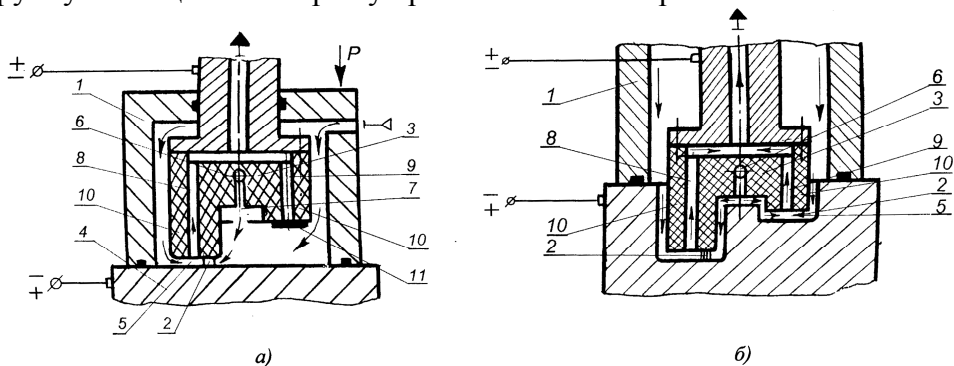


Рис. 7.1. Принципова схема початку (а) і завершення (б) процесу обробки порожнин складного рельєфу

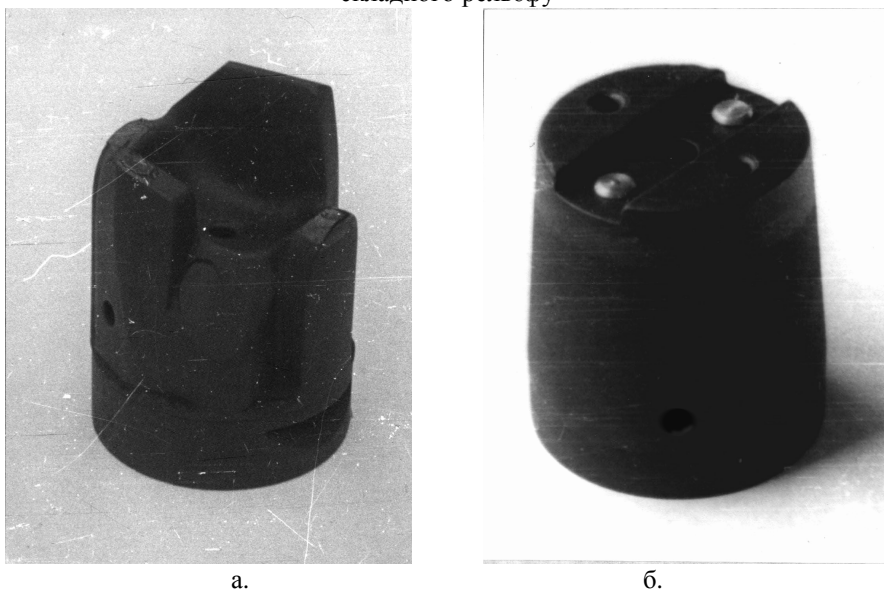


Рис. 7.2. ЕІ для РОД порожнин складного рельєфу (а – канали зливу закриті мідною фольгою; б – канали зливу закриті алюмінієвими ковпачками)

Опишемо, для прикладу, особливості процесу РОД порожнини рівчачкової вставки штампа КГШП для поковки “Шатун тракторний” [60]. Згідно викладеного, реалізують технологічну схему

формоутворення за принципом прошивання з об'ємним копіюванням форми ЕІ і з використанням багатозонної, а саме чотирьохзонної, прокачки робочої рідини через МЕЗ. Для цього на ЕІ виконано три щілиноподібні надрізи шириною 0,3...0,5 мм з розрахунку, щоб ширина надрізу не перевищувала двох міжелектродних зазорів (рис. 7.3). За даних умов технологічний виступ в щілині не утворюється. в центральній частині кожної зони ЕІ виготовляють технологічний канал, причому діаметри каналів в крайніх зонах приймають рівними діаметрам отворів вставки під виштовхувачі. Окрім того, щоб позбавитись раптового розширення потоку на виході з МЕЗ і пов'язаного з цим погіршення якості обробки через утворення в цих місцях довгих (типу зварювальних) дуг, в отвори заготовки під виштовхувачі вставляють спеціальні конуси, що формують потік, виконуючи роль дифузорів. Для зменшення електроерозійного зносу конуси виготовляють з електроерозійного графіту.

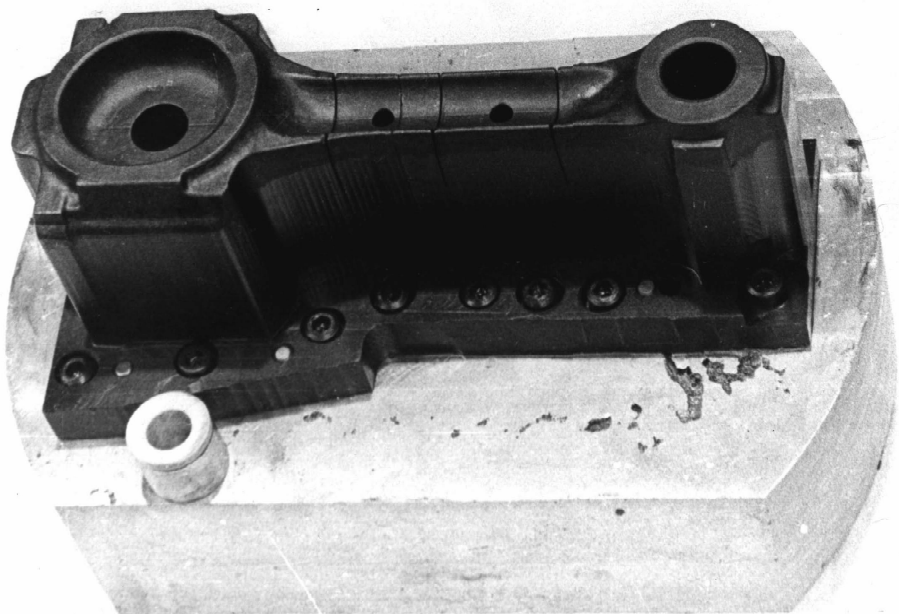


Рис. 7.3. ЕІ на електродотримачі для РОД порожнини рівчачової вставки штампа КГШП для поковки "Шатун тракторний"

Складний рельєф поверхні рівчачової вставки ускладнює рівномірну течу робочої рідини і потребує застосування одного з таких технологічних прийомів.

Приюм 1. Підвищені витрати робочої рідини на початку

процесу обробки у відкриті середні технологічні канали компенсують відповідною характеристикою насосної установки. Звичайно з цією метою використовують потужні відцентрові багатоступеневі насоси підвищених витрат (до 400л/хв і більше). Цей прийом не є оптимальним, проте завдяки універсальності і простоті реалізації є доцільним, зокрема, його було застосовано на верстаті “Дуга-11” при обробці порожнин рівчакової вставки штампа КГШП для поковки типу “Шатун тракторний”.

Прийом 2. Технологічні канали на випуклій поверхні ЕІ на початку процесу обробки перекривають кранами. При досягненні глибини обробки, що відповідає початку формування випуклості, крани відкривають. цей прийом потребує від оператора підвищеної уваги.

Прийом 3. Технологічні канали на випуклій поверхні попередньо подовжують до горизонтальної поверхні ЕІ, по якій починається формування випуклості, і закривають тонкостінними ковпачками (заглушками), наприклад, із алюмінію. При досягненні глибини прошивання, коли починається формування випуклої поверхні порожнини вставки, відбувається електроерозійне руйнування ковпачка, що забезпечує оптимальне протікання процесу.

Схематично процес формування порожнини рівчакової вставки штампа КГШП для поковки “Шатун тракторний” показано на рис. 7.4.

Важливим етапом технологічної підготовки виробництва є розробка технологічного оснащення. Розглянемо пристрій для РОД порожнини рівчакової вставки штампа КГШП для поковки “Шатун тракторний” (рис. 7.5).

Нагнітання робочої рідини в МЕЗ здійснюється з герметизованої камери верстата і щілиноподібних надрізів, виконаних на ЕІ 2, а видалення через технологічні канали в ЕІ 2 і електродотримачі 25. канали електродотримача з'єднано з каналами штока верстата. Базування ЕІ по відношенню до ЕЗ здійснюється за допомогою базової 23 і проміжної 24 плит. На базовій плиті 23 жорстко закріплено уловлювачі 14, 19, якими фіксується ЕЗ (рівчакова вставка). На вставку зверху установлюється проміжна плита 24, положення якої визначається за допомогою фіксаторів 11 та втулок 10, 13. Проміжна плита 24 має дві жорстко запресовані колонки 20, а електродотримач 25 електроізолювані втулки 1. При підготовці пристрою до роботи електродотримач 25 разом із

закріпленням ЕІ 2 одягають на колонки 20. Такий спосіб базування ЕІ по відношенню до ЕЗ дозволяє забезпечити точність установки $\pm 0,02$ мм. Виготовлення кріпильних та штифтових отворів в ЕІ 2 та електродотримачі 25 на координатно-розточувальному верстаті забезпечує швидку заміну ЕІ без подальшої його доробки.

Процес РОД порожнини рівчакової вставки штампа КГШП для поковки «Шатун тракторний» здійснюють в три етапи (рис. 7.6.):

1 етап – чорнова обробка при поступовому збільшенні технологічного струму від мінімального 50А до максимального 400...450А;

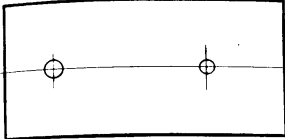
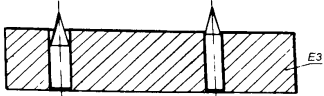
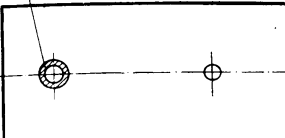
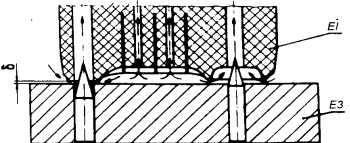
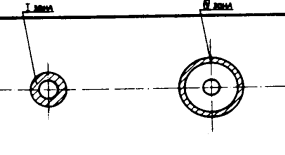
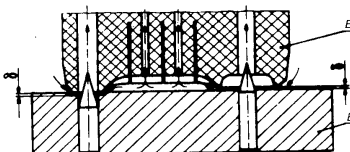
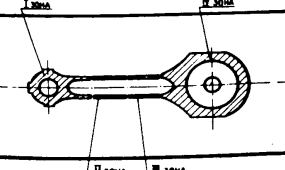
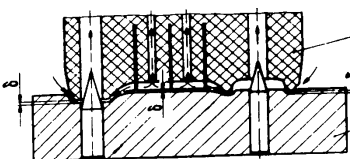
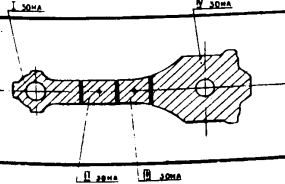
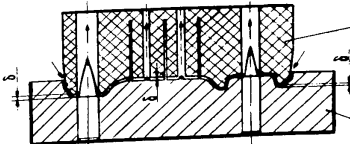
Етапи робіт		Електроерозійні сліди на ЕЗ (вид в плані)	Осьовий розріз
№ п/п	Найменування		
0	Вихідна заготовка		
1	Початок формування I зони		
2	Початок формування IV зони		
3	Початок формування II і III зони		
4	Кінець обробки		

Рис. 7.4. Принципова схема процесу формування порожнини рівчакової вставки штампа КГШП для поковки «Шатун тракторний»

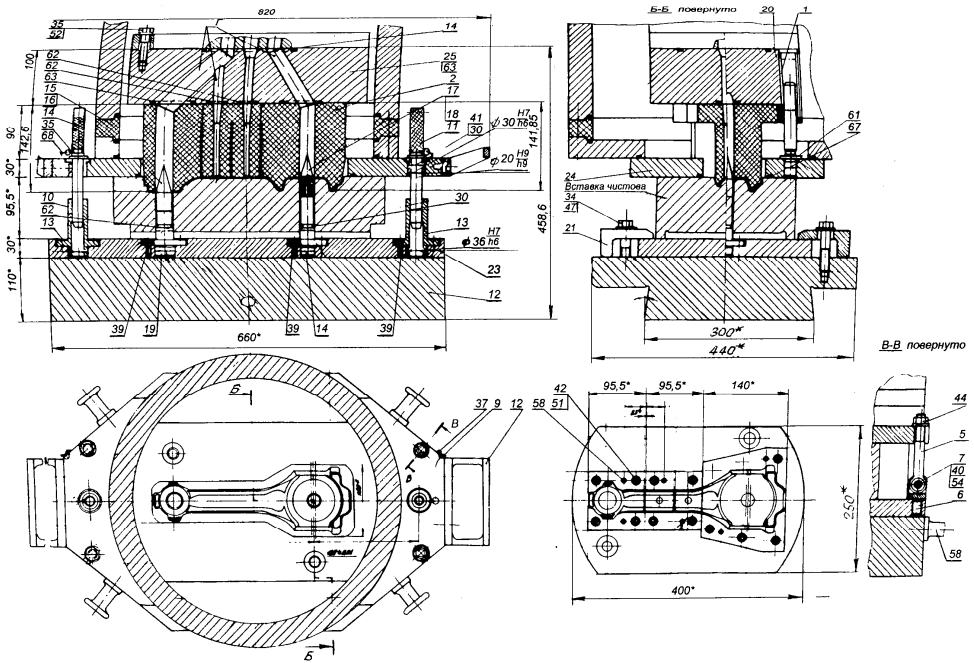


Рис. 7.5. Пристрій для РОД порожнини рівчаквої вставки штампа КГШП для поковки «Шатун тракторний»

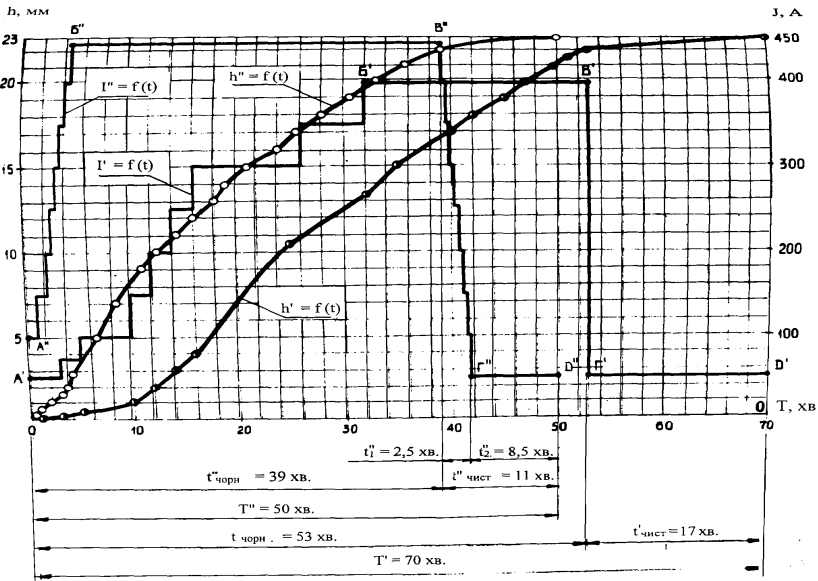


Рис. 7.6. Графік зміни технологічного струму і глибини обробки в часі при РОД порожнини рівчаквої вставки штампа КГШП для поковки «Шатун тракторний»

2 етап – чорнова обробка при максимальному технологічному струмі 400...450А;

3 етап – чистова обробка при зменшенні технологічного струму до 50А.

При цьому є різні варіанти зміни технологічного струму в часі. Оптимальним (рис. 7.6.) можна визнати $I''=f(t)$, коли загальний час обробки складає 50хв. Зазначимо, що при реалізації відомих способів ЕРО таку порожнину обробляють за 7...9 годин.

Отримані результати по шорсткості обробленої поверхні (Ra 3,2...6,3) і точності формоутворення цієї порожнини ($\pm 0,1$ мм) дозволяють рекомендувати використання процесу РОД для чистової обробки порожнини кувальних штампів без додаткової слюсарної доводки.

7.2. РОД спряжених пар робочих деталей розділових штампів

Стійкість спряжених пар робочих деталей розділових штампів (пуансонів та матриць) визначається насамперед рівномірністю та оптимальною величиною зазору між пуансоном і матрицею. Сучасним способом отримання таких спряжених пар є електроерозійна обробка, зокрема, коли способом зворотного копіювання ЕІ отримують пуансон, який надалі використовують, по-перше, як пуансон-інструмент (робоча деталь штампа) і, по-друге, як пуансон-електрод (інструмент для ЕРО) для отримання спряженої матриці способом прямого копіювання. Недоліком зазначеного способу отримання спряжених пар пуансон-матриця є надто обмежені можливості отримання необхідних зазорів між пуансоном і матрицею. При цьому найбільш ефективним способом ЕРО є високопродуктивний спосіб РОД.

Запропоновано новий спосіб отримання спряжених пар «пуансон-матриця» розділових штампів [21], прототипом якого є спосіб, згідно якого пуансон-інструмент і пуансон-електрод для отримання спряженої матриці отримують способом зворотного копіювання із застосуванням первинного пластинчастого електрода-інструмента з отвором.

Спосіб відрізняється тим, що використовуючи факт зносу графітового ЕІ 1 отримують способом зворотного копіювання безступеневий пуансон 2 (на рис. 7.7 показано його поздовжній

переріз) змінного по довжині поперечного перерізу. Такий безступеневий пуансон має уклон, який може бути охарактеризований співвідношенням

$$\psi = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{2 \cdot L_n}, \quad (7.1)$$

де a_{\min} і a_{\max} – відповідно, початковий і кінцевий розміри безступеневого пуансона, мм ;

L_n – довжина безступеневого пуансона (відстань між a_{\max} і a_{\min}), мм.

Надалі, згідно виконаних розрахунків виконавчих розмірів пуансона-інструмента, пуансона-електрода і графітового ЕІ використовують певні ділянки отриманого безступеневого пуансона як пуансон-інструмент, а інші – як пуансон-електрод для отримання спряженої матриці.

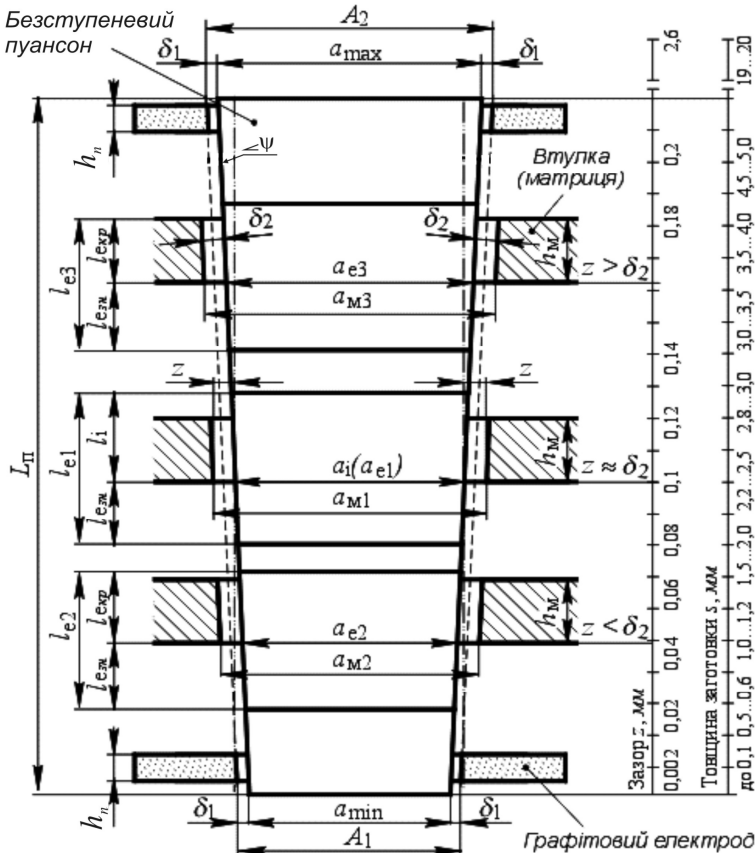


Рис. 7.7. Схема отримання безступеневого пуансон-інструмента та пуансон-електрода

Графітовий ЕІ 1 має розміри: товщину h_n , розмір на початку обробки A_1 і в кінці обробки A_2 .

Безступеневий пуансон 2 має розміри: довжину L_n , менший поперечний розмір a_1 і більший поперечний розмір a_2 .

Розрізняють пуансон-інструмент, робочий розмір якого a_i та пуансон-електроди з розмірами a_{e1} , a_{e2} , a_{e3} , якими отримують отвори, a_{m1} , a_{m2} , a_{m3} , у спряжених матрицях.

Двосторонній зазор між пуансоном і матрицею визначається як $2z = a_{m(2,3)} - a_i$. Цей зазор залежить від товщини матеріалу заготовки ($S = 0,1 \dots 20$ мм) і коливається в межах $2z = 0,004 \dots 5,2$ мм.

Міжелектродний зазор при РОД між графітовим електродом і пуансоном $2\delta_1 = A - a$, між спряженою матрицею і пуансоном-електродом – $2\delta_2 = a_m - a_e$.

Коли врахувати, що орієнтовно $\delta_2 = 0,1$ мм, то треба розрізнити три ділянки на пуансоні L_n :

1. $z = \delta_2$;
2. $z < \delta_2$;
3. $z > \delta_2$.

При $z = \delta_2$, що спостерігається при відокремленні матеріалу товщиною $S = 2,0 \dots 2,8$ мм, пуансон-інструмент довжиною l_i може бути об'єднаний з пуансоном-електродом довжиною $l_{e_{zn}}$ що зношується при виготовленні матриці і надалі відрізається після прошивання матриці як відхід. Тоді загальна висота пуансона

$$L_n = l_i + l_{e_{zn}}, \quad (7.2)$$

де
$$l_{e_{zn}} = (1 \dots 2) \cdot h_m, \quad (7.3)$$

де h_m – висота робочого пояса матриці, мм.

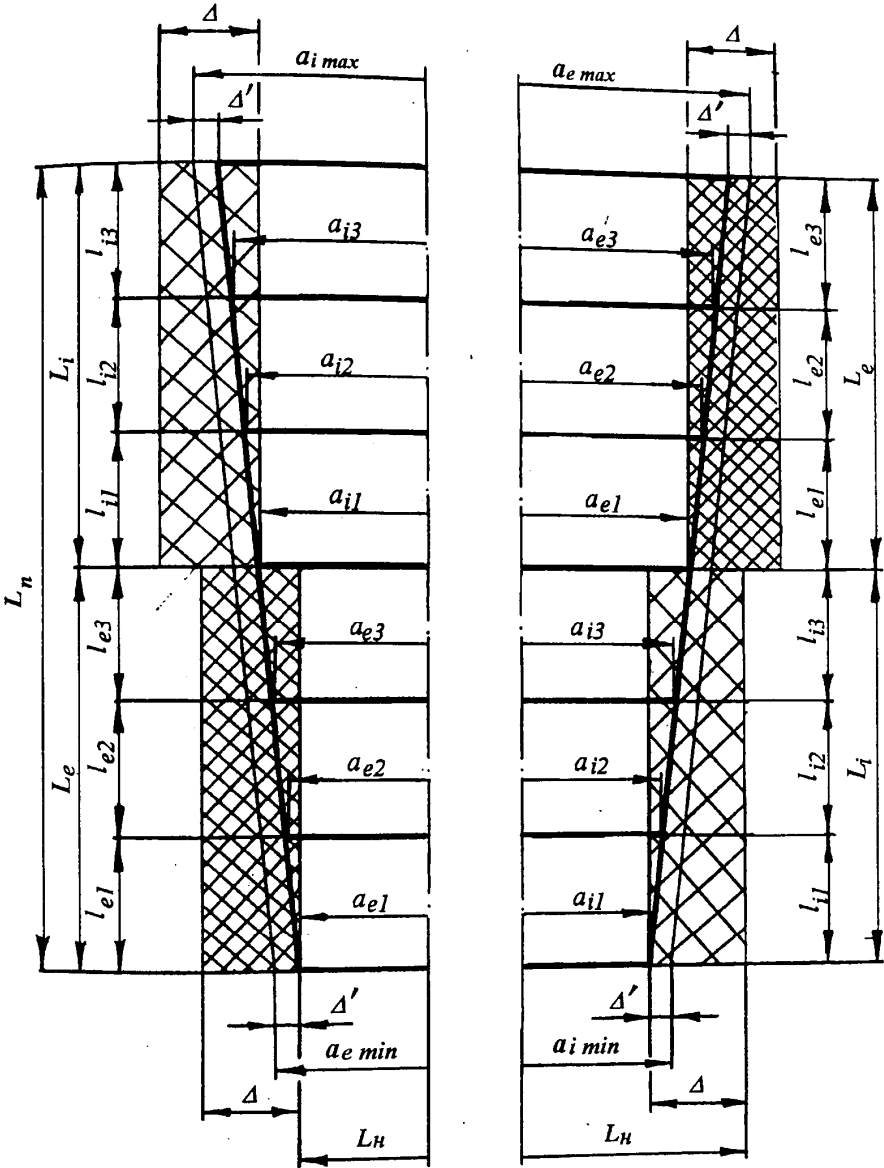
При $z < \delta_2$ відбувається вирубування-пробивання тонколистового матеріалу ($S < 2$ мм). Ділянку пуансона з розмірами a_i і l_i використовують як інструмент, а спряжену матрицю калібрують електродом розмірами a_{e2} , l_{e2} .

При $z > \delta_2$ штампують заготовки товщиною $S = 2,8 \dots 20$ мм. Ділянку пуансона з розмірами a_i і l_i використовують як інструмент, а спряжену матрицю калібрують електродом розмірами a_{e3} , l_{e3} .

При відомому розмірі поперечного перерізу пуансона-інструмента a_i потрібний розмір пуансона-електрода $a_{e1(2,3)}$ знаходять за формулою, мм :

$$a_{e1(2,3)} = a_i + (z - \delta_2) \quad (7.4)$$

На рис. 7.8 показана схема до розрахунку виконавчих розмірів пуансона-інструмента, пуансона-електрода, матриці і графітового ЕІ.



а) $z < \delta_2$

б) $z > \delta_2$

Рис. 7.8. Розрахункова схема виконавчих розмірів пуансон-інструмента та пуансон-електрода

Вихідні дані: креслення деталі (номінальні розміри елементів L_H , товщина заготовки S), точність виготовлення деталі (величина поля допуску Δ , що залежить від розміру штампованого елемента).

Розрахунок виконують в такій послідовності.

1. Визначають довжини пуансонів:

а) Довжина пуансона-інструмента l_i визначається за кресленням штампа конструктивно, бажано мінімальна ;

б) Довжина пуансона-електрода l_e визначається за формулою, мм:

$$l_e = l_{e_{кр}} + l_{e_{зн}} = l_{e_{кр}} + (1...2) \cdot h_m, \quad (7.5)$$

де $l_{e_{кр}}$ – довжина кріпильної частини, що приймається конструктивно;

$l_{e_{зн}}$ – довжина частини, що зношується при прошиванні спряженої матриці:

в) Довжина комплекту пуансонів-інструментів (якщо їх кілька), мм

$$L_i = \sum_n l_i, \quad (7.6)$$

де n – кількість пуансонів в комплекті;

г) Довжина комплекту пуансонів-електродів (коли їх кілька), мм

$$L_e = \sum_n l_e \quad (7.7)$$

д) Довжина заготовки під безступеневий пуансон, мм

$$L_n = L_i + L_e \quad (7.8)$$

2. Виходячи з креслення деталі, залежно від її товщини S визначають величину двобічного зазору $2z$ і, порівнюючи z із δ_2 , обирають подальшу схему розрахунків, розрізняючи операції вирубування та пробивання: 1. $z = \delta_2$; 2. $z < \delta_2$; 3. $z > \delta_2$.

3. При вирубуванні.

3.1. Визначають поперечні розміри інструментів :

а) Визначають розмір матриці

$$a_m = (L_H - P_{зн})^{+\delta_m}, \quad (7.9)$$

де L_H – номінальний розмір деталі, мм;

$P_{зн}$ – припуск на знос матриці, мм;

δ_m – допуск на виготовлення матриці, мм;

б) Визначають розмір пуансона-електрода

$$a_e = a_{e1} = a_m - 2 \cdot \delta_2 \quad (7.10)$$

в) Визначають розмір пуансона-інструмента

$$a_i = a_{i1} = a_e - (z - \delta_2) \quad (7.11)$$

3.2. Визначають розрахунковий уклон, виходячи з умови :

а) коли $z < \delta_2$, то
$$\psi_p = \frac{a_{i1} - a_{e1}}{2 \cdot L_e}, \quad (7.12)$$

б) коли $z > \delta_2$, то
$$\psi_p = \frac{a_{e\max} - a_{e1}}{2 \cdot L_e}, \quad (7.13)$$

де $a_{e\max}$ – максимальний поперечний розмір безперервного пуансона, визначається за формулою, мм :

$$a_{e\max} = a_{e1} + L_e \cdot \left(\frac{e_{e1} - a_{i1}}{L_i} \right) \quad (7.14)$$

Коливання поперечного розміру безступеневого пуансона обмежене величиною поля допуску на виготовлення деталі Δ . Тому доцільно ввести поняття допустимого уклону $[\psi_\delta]$.

3.3. Допустимий уклон визначають за формулою

$$[\psi_\delta] = \frac{0,5 \cdot \Delta}{L_e} \quad (7.15)$$

4. При пробиванні

4.1. Визначають поперечні розміри інструментів:

а) Розмір пуансона-інструмента

$$a_i = a_{i1} = (L_H - \Pi_{3H})_{-\delta_n}, \quad (7.16)$$

де δ_n – допуск на виготовлення пуансона, мм.

б) Розмір пуансона-електрода за формулою (7.4);

в) Розмір матриці

$$a_m = a_i + 2z \quad (7.17)$$

4.2. Визначають розрахунковий уклон, виходячи з умови:

а) коли $z < \delta_2$, то
$$\psi_p = \frac{a_{i\max} - a_{i1}}{2 \cdot L_i}, \quad (7.18)$$

де $a_{i\max}$ – максимальний поперечний розмір безступеневого пуансона визначається за формулою, мм :

$$a_{i\max} = a_{i1} + L_i \cdot \left(\frac{a_{i1} - a_{e1}}{L_e} \right) \quad (7.19)$$

$$\text{б) коли } z > \delta_2, \text{ то } \psi_p = \frac{a_{e1} - a_{i1}}{2 \cdot L_i}, \quad (7.20)$$

4.3. Допустимий уклон визначають за формулою

$$[\psi_\delta] = \frac{0,5 \cdot \Delta}{L_i} \quad (7.21)$$

5. Визначають початковий розмір безступеневого пуансона.

$$\text{При } \psi_p = [\psi_\delta]: \text{ коли } z < \delta_2, \text{ то } a_{\min} = a_{e1}, \quad (7.22)$$

$$\text{коли } z = \delta_2, \text{ то } a_{\min} \approx a_i \approx a_e, \quad (7.23)$$

$$\text{коли } z > \delta_2, \text{ то } a_{\min} = a_{i1} \quad (7.24)$$

$$\text{При } \psi_p < [\psi_\delta]: \text{ коли } z < \delta_2, \text{ то } a_{\min} = a_{e1} + 2 \cdot \Delta', \quad (7.25)$$

$$\text{коли } z > \delta_2, \text{ то } a_{\min} = a_{i1} + 2 \cdot \Delta', \quad (7.26)$$

де Δ' – величина, що визначається в межах допуску на виготовлення деталі і ϵ його часткою; приймається з врахуванням технологічної та експлуатаційної доцільності.

При $\psi_p > [\psi_\delta]$ за рахунок зменшення L_i чи L_e забезпечують $\psi_p = [\psi_\delta]$.

6. Визначають виконавчі розміри графітового ЕІ.

а) Виконавчий розмір, мм:

$$A_1 = a_{\min} + 2\delta_1 \quad (7.27)$$

б) Залежно від ψ_p за діаграмами визначається висота робочого пояса h_n графітового ЕІ.

7.3. РОД глибоких отворів

РОД глибоких отворів [9] діаметром до 60 і довжиною до 2800мм реалізуються на спеціальних верстатах моделі “Дуга-12”, “Дуга-13” і інші, принципова схема яких показана на рис. 7.9 ЕІ 4 з напрямними елементами 5 закріплено на штангу-струмовод 7, що проходить крізь герметизовану камеру 6, яка з’єднана з насосною станцією подачі робочої рідини (технічної води або масла). Деталь 3, що оброблюється, і штанга-струмовід з’єднані згідно зазначеної полярності з випрямлячем 8. Привод подачі шанги-струмовода (на рис. 7.9 не показано) підключено до слідкуючої системи 9 керування, яка також зв’язана з випрямлячем і забезпечує стабільність процесу

обробки.

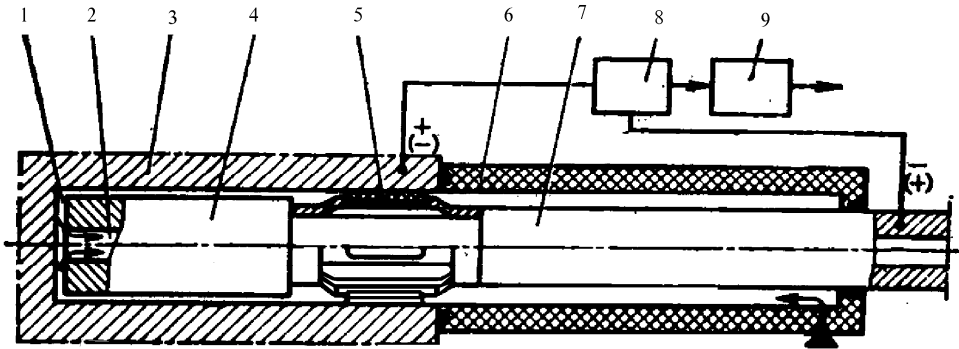


Рис. 7.9. Принципова схема установки для РОД глибоких отворів

Робоча рідина, що подається в камеру 6, створює в МЕЗ 1 тиск, необхідний для реалізації процесу. Продукти ерозії видаляються через отвір 2 в електроді. При обробці отворів діаметром більше 50 мм доцільно використовувати трепануючий електрод. Стержень, що утворюється при цьому можна видалити відомими засобами.

Для оцінки області раціонального застосування процесу РОД при обробці глибоких отворів розглянемо його особливості і порівняємо зі способами глибокого свердлування.

Продуктивність обробки. Продуктивність РОД, як зазначалось, визначається головним чином величиною технологічного струму та теплофізичними властивостями матеріалу, який обробляється. При обробці сталі і чавуну питома продуктивність процесу РОД глибоких отворів складає $Ma = 25...30 \text{ мм}^3/\text{А} \cdot \text{хв}$. Величина технологічного струму обмежена можливостями джерела живлення, допустимою густиною струму ЕІ і провідністю штанги-струмоводу. Практика показала, що графітові ЕІ нормально працюють при густині струму до $2 \text{ А}/\text{мм}^2$. Провідність штанги-струмоводу визначається площею її поперечного перерізу, яка складає 0,15...0,5 площі поперечного перерізу отвору, що обробляється.

Враховуючи зазначені обмеження на рис. 7.10 приведено залежності швидкості V обробки від діаметра D отвору, що оброблюється, а саме: при свердлуванні низьколегованих сталей (крива 1), високолегованих сталей і сплавів (крива 2) і титанових сплавів (крива 3) та при РОД при обмеженні по струмопровідності штанги-струмоводу (крива "а"), по технологічному струму ЕІ (крива "б") і по струму джерела живлення при питомій продуктивності

$Ma = 25\text{мм}^3/\text{А}\cdot\text{хв}$. При $D \leq 12\text{мм}$ швидкість обмежена поперечним перерізом штанги-струмопроводу, при $D > 12\text{мм}$ – максимально допустимим для даного ЕІ струмом або струмом джерела живлення. На рис. 7.10 приведено також залежності V від D , які отримано при свердлуванні глибоких отворів в низько- і високолегованих сталях та в титанових сплавах із яких видно, що при обробці жароміцних і корозійностійких сталей та титанових сплавів спосіб РОД забезпечує більшу продуктивність, ніж свердлування. Зазначимо, що зміна форми поперечного перерізу не впливає суттєво на продуктивність РОД.

Точність обробки і якість поверхневого шару. Внаслідок несилового характеру взаємодії ЕІ і ЕЗ при РОД коливання твердості заготовки не впливають на точність оброблених отворів. Тому забезпечується більш висока, ніж при свердлуванні, точність отворів в поздовжньому перерізі і повністю виключається непрямолінійність їх осі навіть при розташуванні отворів на лінії поділу різнорідних матеріалів.

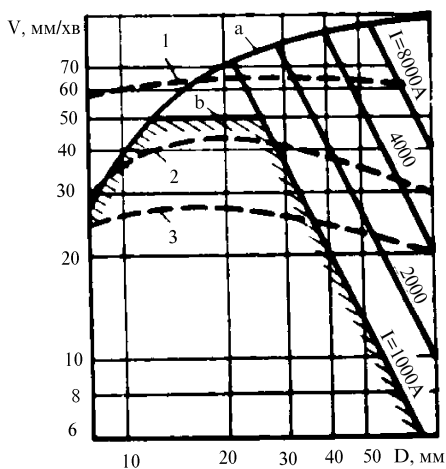


Рис. 7.10. Залежність швидкості V обробки глибоких отворів від їх діаметру D при свердлуванні та при РОД

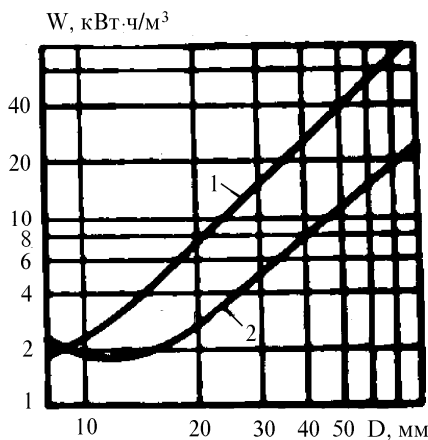


Рис. 7.11. Залежність витрат енергії W на одиницю довжини глибокого отвора в сталях від його діаметра D при обробці РОД (крива 1) і свердлуванні (крива 2)

Точність отворів за поперечним перерізом залежить перш за все від стабільності МЕЗ. При чорновій обробці похибка діаметра складає 0,15...0,3мм, при чистовій – не перевищує 0,05мм. Оскільки обробка здійснюється за принципом копіювання, похибки форми поперечного перерізу ЕІ повністю переносяться на отвір. Шорсткість поверхні складає $Ra = 25...50\mu\text{м}$ при чорновій і $Ra = 6,3\mu\text{м}$ при чистовій обробці. Глибина зони термічного впливу залежить головним чином від динамічного тиску робочої рідини і властивостей матеріалу, що оброблюється, і може регулюватись в межах від 0 до 0,1мм. Оброблені РОД поверхні можна надалі оброблювати різанням, а також електрофізичними та електрохімічними способами.

Удосконалення конструкцій деталей. Враховуючи можливості способу РОД, на етапі проектування машин можна покращити їх експлуатаційні характеристики, оскільки продуктивність обробки практично не залежить від твердості матеріалу і форми отвору. Є можливість високопродуктивно обробляти глибокі отвори трикутної, овальної та інших форм, а при незначному ускладненні верстата – гвинтові, конічні отвори та отвори змінного поперечного перерізу (наприклад, з місцевим розширенням). В усіх цих випадках забезпечується продуктивність не нижча, ніж при свердлуванні отворів в сталях.

Енерговитрати. При РОД енергія витрачається в основному на руйнування металу та на прокачування робочої рідини через МЕЗ. Доля енергії, яка витрачається на прокачування робочої рідини складає до 70 % загальних витрат при обробці отворів $\varnothing 40\text{мм}$. При зростанні діаметра отвору зростає доля витрат на руйнування металу.

При обробці сталі при питомій продуктивності $Ma = 25\text{мм}^3/\text{А}\cdot\text{хв}$. і напрузі дуги 30В загальні витрати складають десь $2\cdot 10^4\text{кВт}\cdot\text{г}/\text{м}^3$ ($2,5\text{кВт}\cdot\text{г}/\text{кг}$). Дослідження показали (рис. 7.11), що при $D \geq 15...20\text{мм}$ витрати енергії на одиницю довжини обробленого отвору способом РОД в 3...3,5 рази більше, ніж при свердлуванні.

Інструмент. ЕІ для РОД виготовляють з графіту марок МПГ-6

і МПГ-7. Їх стійкість залежить від режиму обробки та робочої рідини. При обробці сталей знос ЕІ досягає 10% при використанні технічної води і не перевищує 1% при використанні рідин із нафтопродуктів. Один ЕІ обробляє отвори, довжина яких складає в середньому 1,5м при використанні технічної води і 15м – при використанні рідин із нафтопродуктів. Свердло (з внутрішнім відведення стружки) такого ж діаметра обробляє (з переточками) отвори загальної довжини 60м. Проте відносно низька стійкість ЕІ компенсується простотою його виготовлення і малою вартістю. Дослідження показали, що при обробці отворів діаметром до 80мм витрати на ЕІ значно нижчі, ніж на свердла при глибокому свердлуванні.

Обладнання. Установка для РОД складається з верстата, станції робочої рідини і джерела живлення технологічним струмом. Відсутність приладу обертання і несиловий характер взаємодії інструмента з заготовкою дозволяють значно спростити конструкцію верстата та зменшити його металоємкість.

Можлива одночасна обробка декількох отворів, що можуть бути близько розташованими, або обробка одного отвору з двох сторін одночасно. Знайдено технічні рішення, які дозволяють відмовитись від використання люнетів, зменшити довжину станини і знизити вимоги до точності напрямних верстата. Робочу рідину (технічну воду або нафтопродукти) подають практично під таким же тиском, як і змащувально-охолоджуючі рідини при глибокому свердлуванні.

Джерелом технологічного струму є зварювальні випрямлячі типу ВДУ 1601. Для збільшення технологічного струму декілька випрямлячів, наприклад типу ВДУ 504, включають паралельно. Оскільки при РОД нескладно отримувати об'єктивну інформацію про величину технологічного струму і МЕЗ, про напругу на ЕІ та тиск робочої рідини і т. і., то процес обробки легко автоматизується. вартість установки для РОД в 2...4 рази менше вартості аналогічного по призначенню верстата для глибокого свердлування.

7.4. Багатоелектродне прошивання отворів та порожнин способом РОД

Спосіб РОД дозволяє високоефективно реалізувати процес багатоелектродного прошивання отворів та порожнин, наприклад при виготовленні сіток, що мають отвори помітних розмірів і тому треба забезпечити високу продуктивність на великих технологічних струмах. Для цього достатньо за рахунок реалізації відповідної технологічної схеми формоутворення забезпечити в зоні обробки необхідні гідродинамічні умови течії робочої рідини та щоб питомий технологічний струм по сумарній площі поперечних перерізів ЕІ не перевищував $1...2\text{А/мм}^2$. Порівняно з багатоінструментальною обробкою в умовах обробки металів різанням такий процес значно спрощує обладнання, бо для того щоб підвести енергію від джерела живлення в зону обробки достатньо забезпечити лише електричний (а не кінематичний та силовий) зв'язок. Окрім того є можливість значно підвищити продуктивність обробки за рахунок реалізації в зоні обробки значних технологічних струмів. При цьому, як зазначалось (див. 4.2), дуга може одночасно горіти на декількох електродах і отже енергія технологічного струму може дрібнитись згідно технологічних потреб.

На рис. 7.12 показано пристрій РОД для одночасного прошивання дванадцяти отворів діаметром 18мм рівномірно розташованих по колу діаметром 200мм на глибину 100мм на копіювально-прошивному верстаті “Дуга-8Г” [43]. Пристрій має колектор 1, в якому розташовано дванадцять нахилених зливних отворів під кутом 45° до осі. Ці отвори з'єднано зі зливним отвором в штоку 14. В обоймі 2 закріплено гвинтами 4 дванадцять електродотримачів 3, що направляються втулками 5, запресованими в кондуктор 7. Останній базується по циліндричній поверхні “А” деталі 15. Графітові електроди 6 запресовано в електродотримачі 3 з натягом 0,01мм. Герметизуюча камера 8 кріпиться гвинтами 10 до траверси верстата. Кондуктор 7 кріпиться до камери 8. Приєднання колектора 1 до штока та обойми 2 до колектора 1 здійснюється гвинтами 9. Для

герметизації зони обробки в камері 8 і кондукторі 7 установлено герметизуючі гумові кільця 11, 12, 13.

При струмі обробки 450А лінійна швидкість переміщення ЕІ складає 3мм/хв, що порівняно зі свердлуванням в 5 разів швидше.

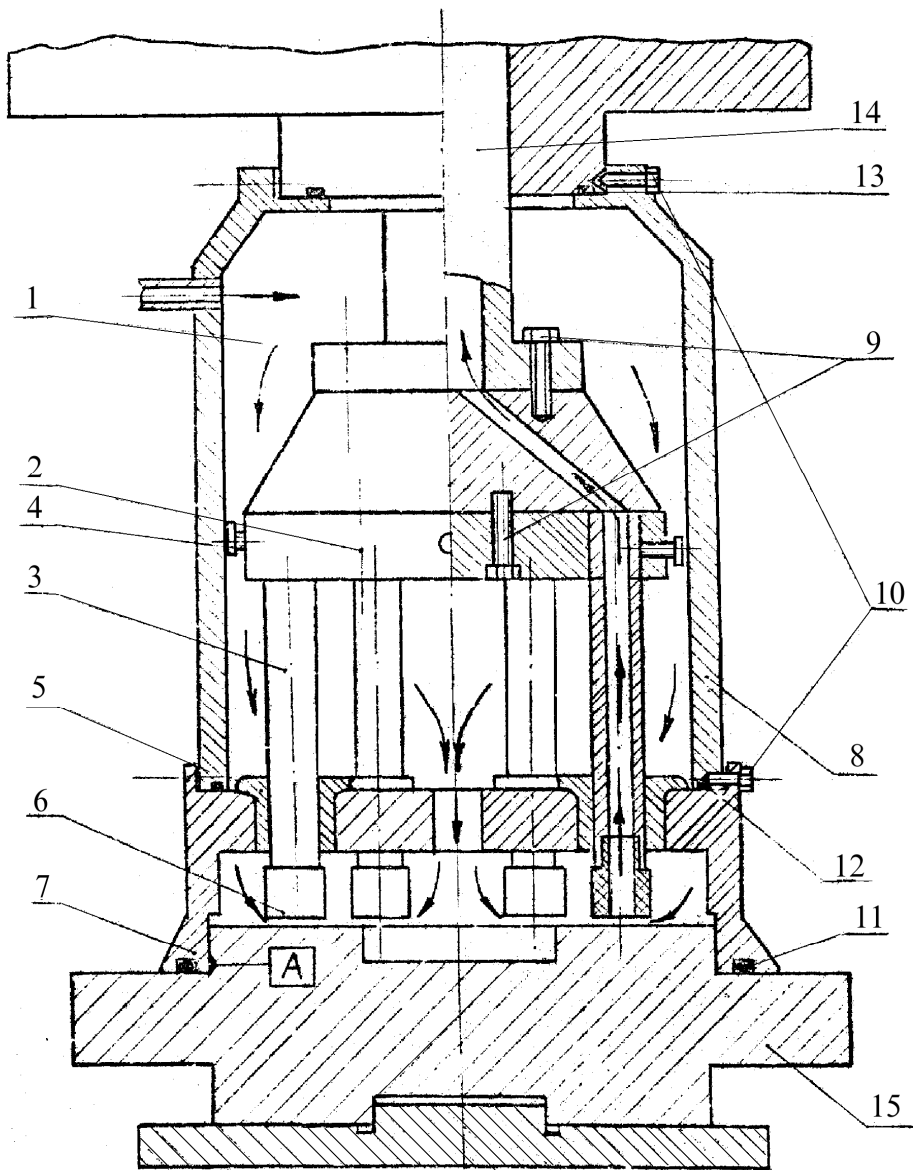


Рис. 7.12. Пристрій для одночасного прошивання дванадцяти отворів способом РОД

7.5. Очищення способом РОД твердосплавних вставок пресформ для синтезу алмазів

Пресформи, що використовують при синтезі алмазів, повинні мати підвищену механічну та теплову стійкість, витримувати великі циклічні перепади температур і тисків, бути електропровідними. Такі властивості мають тверді сплави на основі карбіду вольфраму і карбіду титану. частіше матеріалом вставок пресформ є твердий сплав на основі карбіду вольфраму марок ВК-6, ВК-8.

При синтезі алмазів в результаті багаторазової взаємодії твердого сплаву з киснем атмосфери в умовах високих температур і тисків відбувається його знеуглецювання і, отже, його знеміцнення і руйнування. Це руйнування відбувається в області дії найбільш високих температур, тобто в центральній частині твердосплавної вставки пресформи, і призводить до збільшення робочого об'єму пресформи і, отже, до порушення технологічних параметрів синтезу алмазів. Наслідком цього є необхідність періодичного поновлення заданого об'єму робочої камери за допомогою нікелевої і інших підсипок.

В результаті нагрівання при повторних актах синтезу підсипка плавиться, розтікається і прилипає до стінок робочої камери, порушуючи її геометрію. Подальше прогоряння твердого сплаву під шаром нікелевої підсипки призводить до погіршення електропровідності струмовідної частини твердосплавної вставки і порушення робочих режимів.

В зв'язку з цим розплавлену підсипку треба періодично видаляти і очищати робочу камеру від продуктів вигару. Звичайно видалення підсипки і продуктів вигару здійснюється шляхом механічного вибивання з допомогою зубила і молотка, що в умовах великих залишкових напруг в твердому сплаві небезпечно для робітників. Окрім того, наявність крупних, глибоких тріщин та сколів в твердому сплаві після третьої-четвертої підсипки взагалі роблять недоцільним очищення вставок, оскільки внаслідок сильного механічного і дифузійного зчеплення розплаву підсипки з твердим сплавом подальша експлуатація таких вставок стає неможливою. Це призводить до збільшення витрат дефіцитного і дорогого матеріалу, що відбивається на собівартості продукції.

Очищення твердосплавних вставок пресформ для синтезу алмазів способом РОД [42, 64] дозволяє уникнути зазначених

недоліків їх механічного очищення.

На рис. 7.13 показана принципова схема верстата моделі “Дуга-18” для очищення твердосплавних вставок пресформ для синтезу алмазів. Станина 7 верстата зварна і має піддон для зливання дренажної рідини. На станині жорстко закріплено інструментальну головку з електрогідравличним регулятором МЕЗ. ЕІ 3 установлено на шпинделі 2 з допомогою різьбового з’єднання. Робоча зона навколо ЕІ 3 обмежена кільцевою герметизованою камерою 4. Контроль положення шпинделя 2 відносно корпуса інструментальної головки здійснюється посередництвом лінійки 1. Обойма 5 змонтована на штоку 8 силового гідроциліндра 6 і служить для позиціонування оброблюваної деталі 9 (блок-матриці). Гідроциліндр 6 призначено для герметизації зони обробки.

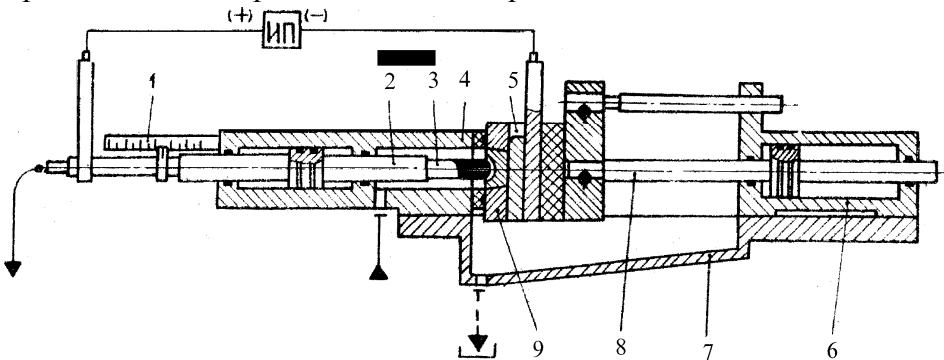


Рис. 7.13. Принципова схема верстата моделі “Дуга – 18” для очищення твердосплавних вставок прес-форм для синтезу сплавів

Робота верстата полягає в наступному. Блок-матрицю 9, що підлягає очищенню, установлюють в обойму 5. Керуючи гідроциліндром 6, обойму 5 переміщують в крайнє ліве положення до притискання блок-матриці 9 до герметизованої камери 4. Потім вмикають систему прокачування робочої рідини через МЕЗ в напрямку від периферії до центру ЕІ 3, джерело живлення технологічним струмом і ведуть обробку (очищення) твердосплавної вставки.

7.6. Висновки

7.6.1. Найрізноманітніші порівняно прості процеси РОД, наприклад, утворення простих за формою отворів та порожнин, реалізуються, якщо використати викладені в роботі уніфіковані технологічні прийоми.

7.6.2. Досить складні, оригінальні та унікальні процеси РОД вимагають індивідуальних підходів та відповідного теоретичного та експериментального доопрацювання. В цьому зв'язку описано такі процеси: РОД порожнин штампів для гарячого об'ємного штампування, РОД спряжених пар робочих деталей розділових штампів, РОД глибоких отворів, багатоелектродне прошивання отворів та порожнин способом РОД і очищення способом РОД твердосплавних вставок пресформ для синтезу алмазів.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Позначення	Найменування	Одиниця виміру
<i>T</i>	температура	°К
<i>I</i>	струм	А
<i>U</i>	напруга	В
<i>U_к</i>	падіння напруги в катодній області дуги	В
<i>U_а</i>	падіння напруги в анодній області дуги	В
<i>U_с</i>	падіння напруги в стовбі дуги	В
<i>L</i>	довжина дуги	м
<i>S</i>	площа поперечного перерізу дуги	м ²
<i>E</i>	напруженість електричного поля	В/м
<i>K</i>	об'ємна густина теплової потужності	Вт/м ³
<i>j</i>	густина електричного струму	А/м ²
<i>P</i>	потужність електричної дуги	Вт
<i>P_к</i>	теплова потужність дуги, що реалізується в катодній області дуги	Вт
<i>P_а</i>	теплова потужність дуги, що реалізується в анодній області дуги	Вт
<i>P_с</i>	теплова потужність дуги, що реалізується в стовпі дуги	Вт
<i>ρ</i>	об'ємна густина	кг/м ³
<i>v</i>	швидкість	м/с
<i>V</i>	об'єм	м ³
<i>δ</i>	міжелектродний зазор (МЕЗ)	мм
<i>P_д</i>	динамічний тиск потоку	Па
<i>M</i>	продуктивність обробки	м ³ /хв
<i>a</i>	питомі витрати електроенергії	кВт·год/кг
<i>Ra</i>	висота мікронерівностей	мкм
<i>H</i>	глибина зони термічного впливу	мкм
<i>γ</i>	відносний об'ємний знос	%
<i>EI</i>	електрод-інструмент	-
<i>EЗ</i>	електрод-заготовка	-
<i>ЕЕГ</i>	електроерозійна головка	-
<i>ЕРО</i>	електророзрядна обробка	-
<i>РОД</i>	розмірна обробка електричною дугою	-
<i>МЕП</i>	міжелектродний проміжок	-

ЛІТЕРАТУРА

1. Попилов Л. Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов. Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материала. – М.: Машиностроение, 1982.
2. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою як високоефективний альтернативний процес металообробки // Збірник наукових праць КІСМ. Вип 1. Кіровоград: КІСМ, 1997. – с.153-156.
3. Носуленко В. І. Стационарна електрична дуга як джерело тепла для електроерозійної обробки // Збірник наукових праць КІСМ. Вип 1. Кіровоград: КІСМ, 1997. – с.167-171.
4. Носуленко В. І. Про якість джерел тепла на електродах і полярність електричної ерозії при РОД // Збірник наукових праць КІСМ. Вип 2. Кіровоград: КІСМ, 1998.
5. Носуленко В. І. Фізичний механізм електричної ерозії при РОД // Збірник наукових праць КІСМ. Вип 2. Кіровоград: КІСМ, 1998.
6. Носуленко В. И., Мещеряков Г. Н. Размерная обработка металлов электрической дугой // Электронная обработка материалов. – 1981. – №1. – с.19-23.
7. Носуленко В. И., Львов Б. В., Карпенко И. И. Электроэрозионный станок для глубокой прошивки “Дуга-13” // Технология и организация производства. – 1986. – №4. – с.47-48.
8. Носуленко В. И., Редько Ю. П., Дмитриев В. С., Ермолаев Ю. А., Бугаев В.Г. Электрогидравлические системы электроэрозионного копировально-прошивочного станка “Дуга-8Б” // Конструирование и технология производства с/х машин. – 1986. – выпуск 16. – с.64-66.
9. Носуленко В. И., Лебедев Ю. В., Львов Б. В. Размерная обработка глубоких отверстий электрической дугой // Станки и инструмент. – 1987. – №2. – с.24-26.

10. Носуленко В. И., Лебедев Ю. В., Львов Б. В. Огненное сверло // Наука в СССР. – 1989. – №3. – с.52.
11. Носуленко В. И., Боков В. М., Лебедев Ю. В. Перспективы и области рационального применения размерной обработки металлов электрической дугой // Электронная обработка материалов. – 1993. – №6. – с. 16-18.
12. Носуленко В. И., Боков В. М., Роздайбеда П. Ф., Литвин Б. Н. Исследование продуктов эрозии, полученных при размерной обработке электрической дугой сплава ВТЗ-1// Межвузовский сборник научных трудов “Вопросы формирования метастабильной структуры сплавов”. – Днепропетровск ДГУ,1982. – с. 110-119.
13. Носуленко В. И., Редько Ю. П., Боков В. М., Конструкции и опыт эксплуатации электродов-инструментов при размерной обработке дугой // Проектирование и эксплуатация инструмента и оснастки для электрофизической и электрохимической обработки металлов. Под ред. Веромана В. Ю. – Ленинград: ЛДНТП. – 1984. – с. 63-66.
14. Носуленко В. И., Львов Б. В. Влияние режимов размерной обработки электрической дугой на структуру и свойства железоуглеродистых сплавов // Межвузовский 216 сборник научных трудов “Вопросы формирования метастабильной структуры сплавов”. – Днепропетровск: ДГУ, 1984. – с. 162-174.
15. Носуленко В. И., Литвин Б. Н., Коновалов Я. Г. Влияние электроэрозионной обработки на структуру и свойства твёрдых сплавов// Межвузовский сборник научных трудов “Вопросы формирования метастабильной структуры сплавов”. – Днепропетровск ДГУ,1985. – с. 138-148.
16. Боков В. М., Носуленко В. И. Технология и оборудование размерной обработки электрической дугой // Прогрессивные технологические процессы и оборудование ЭФХК обработки. Материалы семинара. – М.: МДНТП. – 1989. – с. 32-37.

17. Носуленко В. И., Боков В. М. Размерная обработка электрической дугой деталей основного производства // Повышение эффективности применения электрофизических и электрохимических методов обработки материалов. Материалы НТС 6-7 декабря 1990 г./Под ред. Ушомирского П. А. – Л.: ЛДНТП. – 1990. – с. 28-29.
18. Носуленко В. И., Гончарова Л. Н., Худoley С. А. О силовом воздействии рабочей жидкости на элементы конструкции станков размерной обработки дугой // Повышение технического уровня сельскохозяйственных машин. – Киев: УМК ВО, 1991. – с. 123-128.
19. Боков В. М., Носуленко В. И., Єсяян В. А. Про технологічну можливість розмірної обробки електричною дугою пуансонів складного профілю // Розробка і технологія виробництва сільськогосподарських машин. – К.: ІСДО. – 1994. – с. 166-168.
20. Боков В. М., Носуленко В. И., Куликов С. А. Технологія переробки відпрацьованого твердосплавного інструменту у металевий порошок // Проблеми розробки, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки. – Кіровоград: КІСМ. – 1995. – с. 30-32.
21. Носуленко В. И., Гросул І. А. Отримання фасонних спряжених пар “пуансон-матриця” методом РОД. // Проблеми розробки, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки. – К.: КІСМ. – 1995. – с. 26-30.
22. Боков В. М., Носуленко В. И., Єсяян В. А. Розмірна обробка електричною дугою монолітних пуансонів // Підвищення технічного рівня сільськогосподарського виробництва на машинобудуванні. – К.: КІСМ. – 1996. – с. 110-116.
23. Мещеряков Г. Н., Носуленко В. И., Мещеряков Н. Г., Боков В. М., Коноваленко Ю. В. Некоторые физические принципы создания разновидностей обработки металлов концентрированными источниками энергии // Труды

- всесоюзной научно-технической конф. “Комбинированные электроэрозионно-электрохимические методы размерной обработки металлов”. – Уфа: УАИ. – 1982. – с. 7-11.
24. Носуленко В. И., Крышкин Б. Б. Обработка полостей штампов объёмной штамповки дуговым разрядом в поперечном потоке рабочей среды // Труды региональной научно-технической конф. “Прогрессивная малоотходная технология в производстве продукции сельскохозяйственного машиностроения”. – Челябинск: ЧПИ. – 1983. – с. 31-32.
25. Носуленко В. И., Великий П. Н., Коновалов Я. Г. Электрическая дуга в поперечном потоке жидкости как источник тепла для размерной обработки металлов // Труды VI Всесоюзной конференции “Теплофизика технологических процессов”. – Ташкент: ТПИ. – 1984. – с.41.
26. Носуленко В. И., Львов Б. В., Лебедев Ю. В. Технологические возможности обработки глубоких отверстий электрической дугой // Труды 6-й Всесоюзной конференции “Прогрессивная технология обработки глубоких отверстий” / Под ред. Уткина Н. Ф., Муссаэляна Г.А. – ЦНИИИнформации. – 1985. – с. 46-47.
27. Носуленко В. И., Крышкин Б. Б. Повышение стойкости штампов методом электрохимической обработки с применением дугового разряда // Труды Всесоюзной научно-технической конференции “Конструирование и производство сельскохозяйственных машин”. – Ростов-на-Дону: РИСХМ. – 1985. – с. 129-130.
28. Мещеряков Г. Н., Носуленко В. И., Боков В. М. Технологические аспекты применения последовательной эрозионно-химической обработки // Труды VII Всесоюзной конференции “Электрохимическая размерная обработка деталей машин “ЭХО – 86”. – Тула: ТПИ. – 1986. – с. 71-73.
29. Носуленко В. И., Боков В. М. Перспективы применения размерной обработки металлов электрической дугой // Труды Первого Всесоюзного съезда технологов-машиностроителей. –

- М.: НИАТ. – 1989. – с. 34-35.
30. Носуленко В. И., Лебедев Ю. В. Электроэрозионная обработка на металлорежущих станках с ЧПУ // Труды “Станки – 91”. – Киев: КПИ. – 1991. – с. 78.
 31. Носуленко В. И., Лебедев Ю. В. Технологические возможности размерной обработки дугой // Труды международного юбилейного симпозиума по ЭЭО. – М.: НПО “Техномаш”. – 1993. – с. 31-32.
 32. Носуленко В. И., Роздайбеда П. Ф., Литвин Б. Н. Характеристика и термическая устойчивость порошков алюминиевых сплавов // Библиографический указатель ВИНТИ “Депонированные рукописи”, №2, 1978, приложение №2.
 33. Носуленко В. И. Размерная обработка металлов стационарной электрической дугой: Дис... канд. техн. наук: 05.03.04. – Кировоград, 1977. – 202 с.
 34. Носуленко В. И. Размерная обработка металлов стационарной электрической дугой: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.03.04. / ТПИ. – Тула, 1977. – 26 с.
 35. Носуленко В. И., Редько Ю. П. Размерная обработка металлов электрической дугой. – Кировоград: 1980. – 6 с. (Информлисток / Кировоградский ЦНТИ №80-29).
 36. Носуленко В. И., Боков В. М., Редько Ю. П. Электроэрозионный копировально-прошивочный станок модели “Дуга-8”. – Кировоград: 1981. – 6 с. (Информлисток / Кировоградский ЦНТИ №81-13).
 37. Носуленко В. И., Львов Б. В., Боков В. М., Дмитриев В. С. Электроэрозионный станок для глубокой прошивки отверстий модели “Дуга-12”. – Кировоград: 1982. – 6 с. (Информлисток / Кировоградский ЦНТИ №82-14).
 38. Носуленко В. И., Боков В. М., Дмитриев В. С. Переносная электроэрозионная машина модели “Дуга-23М”. – Кировоград: 1983. – 4 с. (Информлисток / Кировоградский ЦНТИ №83-15).

39. Носуленко В. И. Перспективы и области рационального применения электрофизических и электрохимических методов размерной обработки металлов. – Кировоград: 1984. – 12 с. (Препр. / Кировоградский ЦНТИ).
40. Носуленко В. И., Крышкин Б. Б., Боков В. М., Редько Ю. П., Великий П.Н. Технология и оснастка для размерной обработки и упрочнения электрической дугой штампов объёмной штамповки. – Кировоград: 1984. – 4 с. (Информлисток / Кировоградский ЦНТИ №84-21).
41. Носуленко В. И., Боков В. М. Электроэрозионный копировально-прошивочный станок модели “Дуга-11”. – Кировоград: 1984. – 11 с. (Информлисток / Кировоградский ЦНТИ №84-21).
42. Носуленко В. И., Коновалов Я. Г., Боков В. М., Татаров А. В. Электроэрозионный станок модели “Дуга-18”. – Кировоград: 1985. – 5 с. (Информлисток / Кировоградский ЦНТИ №85-26).
43. Носуленко В. И., Олененко В. Н., Собинов А. Г., Великий П. Н., Андронов А. В., Балакин В. И. Приспособление для одновременной прошивки 12-ти отверстий способом размерной обработки дугой. – Кировоград: 1988. – 4 с. (Информлисток / Кировоградский ЦНТИ №88-60).
44. Носуленко В. И., Крышкин Б. Б., Великий П. Н. Размерная обработка дугой штампов для конических шестерен. – Кировоград: 1989. – 4 с. (Информлисток / Кировоградский ЦНТИ №89-25).
45. Носуленко В. И., Великий П. Н., Москаленко М. И., Заболотный Г. В., Спицын И. А. Прошивка отверстий в магнитах способом размерной обработки дугой. – Кировоград: 1990. – 3 с. (Информлисток / Кировоградский МТЦНТИ №90-24).
46. Носуленко В. И., Великий П. Н., Москаленко М. И., Заболотный Г. В. Размерная обработка дугой звеньев тяговых цепей. – Кировоград: 1992. – 2 с. (Информлисток / Кировоградский

ЦНТИЭИ №03-92).

47. Носуленко В. И., Боков В. М. Высокопроизводительный электроэрозионный станок “Дуга-8Д”. – Кировоград: 1994. – 5 с. (Информлисток / Кировоградский ЦНТИ №94-1).
48. Носуленко В. И., Боков В. М., Качанов Ю. Ф., Люльчак В. А. Разработка конструкции, изготовление и исследование станка для прошивки отверстий и полостей стационарным электрическим разрядом: Отчёт о НИР № 158 / КИСМ. – № ГР 73067774; Инв. № Б 562681. – Кировоград, 1976. – 124 с. ДСП.
49. Носуленко В. И., Олененко В. Н., Боков В. М. Исследование и разработка технологического процесса получения отверстий в деталях тракторов методом размерной обработки дугой: Отчёт о НИР № 291 / КИСМ. – № ГР 76064908; Инв. № Б 601344. – Кировоград, 1977. – 60 с. ДСП.
50. Носуленко В. И., Боков В. М., Покрышкина В. А., Роздайбеда П.Ф., Зайцев Ю. Н., Дмитриев А. С., Колодяжная Н. Г., Люльчак В. А. Исследование процесса, разработка конструкции, изготовление и внедрение станка для размерной обработки деталей стационарным электрическим разрядом: Отчёт о НИР № 302, 334 / КИСМ. – № ГР 76064909; Инв. № 975239. – Кировоград, 1978. – 171 с. ДСП.
51. Носуленко В. И., Боков В. М., Черняк В. Т., Львов Б. В., Запороженко В.С. Исследование и разработка технологических процессов обработки деталей и штампов способом размерной обработки электрической дугой (РОД): Отчёт о НИР № 385 / КИСМ. – № ГР 7808363; Инв. № Б 830825. – Кировоград, 1979. – 236 с. ДСП.
52. Носуленко В. И., Татаров А. В., Пукалов В. П., Сикирда В. А., Тканов Е.Г., Боков В. М., Дмитриев А. С. Исследование технологических характеристик процесса и внедрение в производство высокопроизводительного станка для электроэрозионной обработки деталей электродвигателей: Отчёт

- о НИР № 326 / КИСМ. – № ГР 78003681; Инв. № Б 985723. – Кировоград, 1980. – 60 с. ДСП.
53. Носуленко В. И., Олененко В. Н., Великий П. Н., Боков В. М., Дмитриев А.С., Сикирда В. А. Исследование, разработка технологического процесса получения отверстий и полостей в штампах и деталях тракторов методом размерной обработки дугой. Исследование и разработка процесса выжигания и удаления сломанного инструмента из деталей тракторов стационарным электрическим разрядом: Отчёт о НИР № 348, 472 / КИСМ. – № ГР 80067927; Инв. № Б 02816014491. – Кировоград, 1980. – 89 с. ДСП.
54. Носуленко В. И., Редько Ю. П., Запорожченко В. С., Сикирда В. А., Боков В. М., Дмитриев А. С. Разработка конструкции, изготовление и исследование универсального станка для прошивки отверстий и полостей в деталях штампов и прессформ стационарным электрическим разрядом: Отчёт о НИР № 205 / КИСМ. – № ГР 74050438; Инв. № 02820073469. – Кировоград, 1982. – 79 с. ДСП.
55. Носуленко В. И., Львов Б. В., Запорожченко В. С., Боков В. М., Сикирда В.А., Дмитриев А. С. Разработка конструкции, изготовление и исследование специализированного электроэрозионного станка для глубокой прошивки отверстий способом РОД: Отчёт о НИР № 403 / КИСМ. – № ГР 79024783; Инв. № 02830028892. – Кировоград, 1982. – 152 с. ДСП.
56. Носуленко В. И., Боков В. М. Разработка и исследование высокопроизводительных способов обработки титановых сплавов: Отчёт о НИР № 435 / КИСМ. – № ГР 80046173; Инв. № 02815014492. – Кировоград, 1982. – 98 с. ДСП.
57. Носуленко В. И., Львов Б. В., Сикирда В. А., Дмитриев А. С. Разработка и внедрение технологического процесса получения конических резьб с использованием стационарного дугового разряда: Отчёт о НИР № 453 / КИСМ. – № ГР 80065121; Инв. №

0028891. – Кировоград, 1982. – 48 с. ДСП.
58. Носуленко В. И., Сикирда В.А., Львов Б. В., Боков В. М., Дмитриев А. С. Исследование, разработка и внедрение технологии и оборудования для прошивки глубоких отверстий в корпусных деталях методом размерной обработки дугой: Отчёт о НИР № 474 / КИСМ. – № ГР 80072892; Инв. № 02830043964. – Кировоград, 1982. – 83 с. ДСП.
59. Носуленко В. И., Боков В. М., Дмитриев А. С., Великий П. Н., Леви Б.М. Исследование, разработка и внедрение технологии и оборудования для прошивки отверстий в маломагнитных сталях: Отчёт о НИР № 514 / КИСМ. – № ГР 01824022863; Инв. № 02830007723. – Кировоград, 1982. – 79 с. ДСП.
60. Носуленко В. И., Боков В. М., Дмитриев А. С., Колодяжная Н. Г., Лопата Л.А. Исследование, разработка и внедрение технологии и оборудования для размерной обработки дугой полостей штампов: Отчёт о НИР № 424 / КИСМ. – № ГР 79024781; Инв. № 02830060982. – Кировоград, 1983. – 173 с. ДСП.
61. Носуленко В. И., Крышкин Б. Б., Великий П. Н., Запорожченко В. С., Боков В. М., Редько Ю. П., Дмитриев А. С., Жукова Л. Л. Исследование и разработка технологических процессов, изготовление и внедрение копировально-прошивочного станка для размерной обработки дугой деталей штампов: Отчёт о НИР № 530 / КИСМ. – № ГР 01821040290; Инв. № 02840065896. – Кировоград, 1983. – 250 с. ДСП.
62. Носуленко В. И., Боков В. М., Шияненко Л. П. Исследование процесса, разработка технологии и модернизация станка для размерной обработки электрической дугой деталей отрасли: Отчёт о НИР № 482, 582 / КИСМ. – № ГР 81066917; Инв. № 02840074944. – Кировоград, 1984. – 88 с. ДСП.
63. Носуленко В. И., Запорожченко В. С., Боков В. М., Редько Ю. П., Бугаев В.Г., Чигрина Ж. А. Исследование, разработка и

- внедрение установки и технологических процессов для обработки деталей двигателей способом РОД: Отчёт о НИР № 486 / КИСМ. – № ГР 81027428; Инв. № 02850070453. – Кировоград, 1985. – 127 с. ДСП.
64. Носуленко В. И., Коновалов Я. Г., Собинов А. Г., Запорожченко В. С., Боков В. М., Великий П. Н., Татаров А. В. Исследование и разработка технологических процессов, разработка, конструирование, изготовление и внедрение установки для очистки твердосплавной вставки блок-матрицы: Отчёт о НИР № 558 / КИСМ. – № ГР 01830068097; Инв. № 02860107720. – Кировоград, 1986. – 140 с. ДСП.
65. Носуленко В. И., Крышкин Б. Б., Великий П. Н., Собинов А. Г., Петренко В.Г. Исследование процесса и разработка технологии калибровки шлицевых отверстий в деталях комбайнового моста способом размерной обработки электрической дугой: Отчёт о НИР № 608 / КИСМ. – № ГР 01850047654; Инв. № 03860022664. – Кировоград, 1986. – 77 с. ДСП.
66. Носуленко В. И., Боков В. М., Жердий В. М., Бугаев В. Г. Исследование процесса, разработка станка и технологии размерной обработки электрической дугой (РОД) фасонных полостей в деталях отрасли: Отчёт о НИР № 599 / КИСМ. – № ГР 01840038174; Инв. № 02880010358. – Кировоград, 1987. – 76 с. ДСП.
67. Носуленко В. И., Великий П. Н., Шепельский Н. В., Боков В. М., Худoley С.А. Исследование, разработка и внедрение технологии и оборудования для размерной обработки дугой штампов и деталей отрасли: Отчёт о НИР № 61.02.86 / КИСМ. – № ГР 01860066645; Инв. № 09890018514. – Кировоград, 1990. – 100 с. ДСП.
68. А. с. 368965 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/02. Способ электрофизической обработки металлов / В. И. Носуленко (СССР). – № 1223593/25-8; Заявлено 04.03.68; Не подлежит

опубл. в откр. печати.

69. А.с. 544206 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/02. Способ электрофизической размерной обработки металлов / В. И. Носуленко, Г. Н. Мещеряков (СССР). – № 2138401/08; Заявлено 12.06.75; Не подлежит опубл. в откр. печати.
70. А.с. 544510 СССР, М. Кл. В 22 F 9/00. Способ получения металлических порошков / В. И. Носуленко, Г. Н. Мещеряков, Н. И. Варич, Б. Н. Литвин, П. Ф. Роздайбеда, В. М. Боков (СССР). – № 2037835/02; Заявлено 24.06.74; Опубл. 30.01.77, Бюл. №4.
71. А.с. 622227 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/02. Способ электрофизической размерной обработки металлов / В. И. Носуленко, Г. Н. Мещеряков, Ю.Ф. Качанов, В. Е. Рубин (СССР). – № 2392401/25-08; Заявлено 08.09.76; Не подлежит опубл. в откр. печати.
72. А.с. 661666 СССР, М. Кл. Н 01 Р 39/00. Токосъёмное устройство / В. Е. Рубин, В. И. Носуленко, Ю. Ф. Качанов, В. М. Боков (СССР). – № 2556891/24-07; Заявлено 21.12.77; Опубл. 05.05.79, Бюл. №17.
73. А.с. 668167 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/02. Способ электрофизической размерной обработки металлов / В. И. Носуленко, В. А. Чердак (СССР). – № 2392402/25-08; Заявлено 08.09.76; Не подлежит опубл. в откр. печати.
74. А.с. 671133 СССР, М. Кл. В 23 К 9/16. Способ дуговой резки металлов / В. И. Носуленко, Ю. Ф. Качанов (СССР). – № 2516741/25-27; Заявлено 10.08.77; Не подлежит опубл. в откр. печати.
75. А.с. 698251 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/00. Способ электрофизической размерной обработки металлов / В. И. Носуленко, В. С. Запорожченко, И.Н. Соколенко, В. Д. Черняк, А. В. Татаров, (СССР). – № 2628504/25-08; Заявлено 19.06.78; Не подлежит опубл. в откр. печати.

76. А.с. 708619 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/02. Устройство для электрофизической размерной обработки металлов / В. И. Носуленко, В. М. Боков, Б. В. Львов, Ю. В. Лебедев, Л. И. Бондаренко, Л. Р. Тисневский (СССР). – № 2576685/25-08; Заявлено 08.02.78; Не подлежит опубл. в откр. печати.
77. А.с. 722254 СССР, М. Кл. С 21 Д 1/74. Способ поверхностного упрочнения металлов и сплавов / В. И. Носуленко, Ю. Ф. Качанов, Б. Б. Крышкин (СССР). – № 2477893/22-02; Заявлено 22.04.77; Не подлежит опубл. в откр. печати.
78. А.с. 733217 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/00. Способ электрофизической размерной обработки металлов / В. И. Носуленко, В. А. Чердак, Ю. В. Лебедев (СССР). – № 2477626/25-08; Заявлено 20.04.77; Не подлежит опубл. в откр. печати.
79. А.с. 762311 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/02. Станок для электрической размерной обработки деталей сложной формы / В. И. Носуленко, В. С. Запороженко, А. В. Татаров (СССР). – № 2646707/25-08; Заявлено 20.07.78; Не подлежит опубл. в откр. печати.
80. А.с. 782961 СССР, М. Кл. В 22 F 9/14. Способ получения металлических порошков / В. М. Боков, В. И. Носуленко (СССР). – № 2660191/22-02; Заявлено 06.09.78; Опубл. 30.11.80, Бюл. №44.
81. А.с. 782962 СССР, М. Кл. В 22 F 9/14. Способ получения металлических порошков / В. И. Носуленко, В. М. Боков (СССР). – № 2660192/22-02; Заявлено 06.09.78; Опубл. 30.11.80., Бюл. №44.
82. А.с. 790407 СССР, М. Кл. В 01 D 33/02. Фильтр непрерывного действия / В. М. Боков, В. И. Носуленко (СССР). – № 2824597/23-26; Заявлено 20.08.79; Не подлежит опубл. в откр. печати.
83. А.с. 805550 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/02. Устройство для

- электроэрозионной и электрохимической обработки / В. И. Носуленко, В. С. Запорожченко, В. Д. Черняк, И. Я. Гришин (СССР). – № 2731718/25-08; Заявлено 05.03.79; Не подлежит опублик. в откр. печати.
84. А.с. 806333 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/02. Устройство для электрофизической размерной обработки металлов / В. И. Носуленко, В. М. Боков, Г. Н. Мещеряков (СССР). – № 2727931/25-08; Заявлено 23.02.79; Опублик. 23.02.81, Бюл. №7.
85. А.с. 823050 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/00; В 23 Р 1/02. Способ электрофизической обработки и станок для его осуществления / В. И. Носуленко, В. С. Запорожченко, А. И. Зацепило, С. В. Цема (СССР). – №2746155/25-08; Заявлено 04.04.79; Опублик. 23.04.81, Бюл. №15.
86. А.с. 875844 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/00. Способ электроэрозионной обработки / В. И. Носуленко, В. С. Запорожченко, Ю. П. Редько (СССР). – № 2660156/25-08; Заявлено 06.09.78; Не подлежит опублик. в откр. печати.
87. А.с. 902397 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/00. Способ электрофизической обработки электрической дугой / В. И. Носуленко, В. С. Запорожченко, В. М. Боков (СССР). – № 2946927/25-08; Заявлено 25.06.80; Не подлежит опублик. в откр. печати.
88. А.с. 919238 СССР, М. Кл. В 23 К 9/28. Способ подводной электродуговой резки / В. И. Носуленко, В. М. Боков, Ю. Ф. Качанов, Ю.Н. Зайцев (СССР). – № 2611574/25-27; Заявлено 04.05.78; Не подлежит опублик. в откр. печати.
89. А.с. 921740 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/00. Способ обработки электрической дугой / В. И. Носуленко, В. С. Запорожченко, В. Н. Олененко (СССР). – № 2948346/25-08; Заявлено 27.06.80; Опублик. 23.04.82, Бюл. №15.
90. А.с. 921748 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/12. Электрод-инструмент для электрической обработки / В. И. Носуленко, Ю. В. Лебедев, Б.

- В. Львов (СССР). – № 2979534/25-08; Заявлено 12.09.80; Опубл. 23.04.82, Бюл. №15.
91. А.с. 973266 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/00. Способ прошивки сквозных отверстий электрической дугой / В. И. Носуленко, В. С. Запорожченко, М. А. Ясинецкий (СССР). – № 2907942/25-08; Заявлено 11.04.80; Опубл. 15.11.82, Бюл. №42.
92. А.с. 1031072 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/02. Станок для электроэрозионной обработки отверстий стационарным дуговым разрядом / В. И. Носуленко, Б. В. Львов, Ю. В. Лебедев, В. М. Боков, В. А. Извеков, Л. И. Бондаренко, Л. Р. Тисновский (СССР). – № 2711435/25-08; Заявлено 11.01.79; Не подлежит опубл. в откр. печати.
93. А.с. 1050180 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/02. Устройство для электрофизической обработки металлов / В. М. Боков, В. И. Носуленко, Н. Г. Колодяжная (СССР). – № 3340985/25-08; Заявлено 30.09.81; Не подлежит опубл. в откр. печати.
94. А.с. 1050842 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/02. Устройствок для электрофизической размерной обработки / В. И. Носуленко, Ю. В. Лебедев, Б. В. Львов, В. М. Боков (СССР). – № 2886465/25-08; Заявлено 27.02.80; Опубл. 30.10.83, Бюл. №40.
95. А.с. 1055020 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/00. Способ электрофизической, электрохимической обработки / В. И. Носуленко, В. М. Боков, В. Д. Черняк, Г. Н. Мещеряков, И. Я. Гришин, В. М. Кульчев (СССР). – № 2758476/25-08; Заявлено 26.04.79; Не подлежит опубл. в откр. печати.
96. А.с. 1007892 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/12. Электрод-инструмент для электрической обработки сквозных отверстий / В. И. Носуленко, В. С. Запорожченко, В. Н. Олененко (СССР). – № 2981140/25-08; Заявлено 15.09.80; Опубл. 30.03.80, Бюл. №12.
97. А.с. 1047037 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/00. Способ электроэрозионной обработки электрической дугой / В. С. Запорожченко, В. И. Носуленко (СССР). – № 3369190/25-08;

Заявлено 26.12.81; Не подлежит опубл. в откр. печати.

98. А.с. 1096064 СССР, М. Кл. В 23 Р 1/02. Устройство для электрофизической обработки сквозных отверстий / В. И. Носуленко, В.С. Запорожченко, М. А. Ясинецкий (СССР). – № 3381866/25-08; Заявлено 15.01.82; Опубл. 07.06.84, Бюл. №21.
99. А.с. 1122345 СССР, М. Кл. В 01 F 3/00; В 01 F 13/00; В 22 F 9/14. Устройство для изготовления металлических суспензий / В. И. Носуленко, В.С. Запорожченко (СССР). – № 3448112/23-26; Заявлено 04.06.82; Опубл. 07.11.84, Бюл. №41.
100. А.с. 1135578 СССР, М. Кл. В 23 Н 1/04. Устройство для электрофизической размерной обработки отверстий / В. И. Носуленко, Ю.В. Лебедев, Б. В. Львов (СССР). – № 3294967/25-08; Заявлено 04.06.81; Опубл. 23.01.85, Бюл. №3.
101. А.с. 1155387 СССР, М. Кл. В 23 Н 7/22. Устройство для размерной электрической обработки / В. И. Носуленко, Б. В. Львов, В.С. Запорожченко (СССР). – № 3393866/25-08; Заявлено 25.02.82; Опубл. 15.05.85, Бюл. №18.
102. А.с. 1161302 СССР, М. Кл. В 23 Н 9/14. Электрод-инструмент для электрофизической прошивки сквозных отверстий / В. И. Носуленко, В.С. Запорожченко (СССР). – № 3387748/25-08; Заявлено 05.02.82; Опубл. 15.06.85, Бюл. №22.
103. А.с. 1176630 СССР, М. Кл. С 23 С 8/26. Способ азотирования стальных изделий / В. И. Носуленко, В. А. Евстратов, Б. Б. Крышкин, П.Н.Великий (СССР). – № 3475280/22-02; Заявлено 26.07.82; Не подлежит опубл. в откр. печати.
104. А.с. 1180195 СССР, М. Кл. В 23 Н 1/00. Устройство для размерной электрической обработки сквозных отверстий / В. И. Носуленко, В.С. Запорожченко, Б. В. Львов (СССР). – № 3628661/25-08; Заявлено 27.07.83; Опубл. 23.09.85, Бюл. №35.
105. А.с. 1225134 СССР, М. Кл. В 23 Н 1/00. Способ электрофизической обработки полостей / В. И. Носуленко, В. М. Боков (СССР). – № 3387724/25-08; Заявлено 05.02.82; Не

подлежит опубл. в откр. печати.

106. А.с. 1261759 СССР, М. Кл. В 23 Н 7/26. Устройство для размерной электрической обработки / В. И. Носуленко, В.С. Запорожченко, В. М. Боков, Ю. В. Лебедев, А. П. Качанов (СССР). – № 3797970/25-08; Заявлено 25.08.86; Опубл. 07.10.86, Бюл. №37.
107. А.с. 1289638 СССР, М. Кл. В 23 Н 7/36. Механизм фиксации поворотной крышки герметизированной камеры / В. И. Носуленко, Ю.В. Лебедев, Б. В. Львов, В. М. Боков (СССР). – № 3814160/25-08; Заявлено 27.09.84; Опубл. 15.02.87, Бюл. №6.
108. А.с. 1316165 СССР, М. Кл. В 23 Н 1/04. Электрод-инструмент для обработки электрической дугой / В. И. Носуленко, В.С. Запорожченко, В. М. Боков, П. Н. Великий, М. А. Ясинецкий (СССР). – № 3757153/31-08; Заявлено 22.06.84; Не подлежит опубл. в откр. печати.
109. А.с. 1346361 СССР, М. Кл. В 23 Н 3/04. Электрод-инструмент для электрической обработки / В. И. Носуленко, Б. В. Львов, Ю. В. Лебедев, И. И. Карпенко, А. А. Алексин (СССР). – № 3998547/31-08; Заявлено 22.10.85; Опубл. 23.10.87, Бюл. №39.
110. А.с. 1404225 СССР, М. Кл. В 23 Н 9/00. Способ поверхностного легирования электрическим разрядом / В. И. Носуленко, В.С. Запорожченко, Б. Б. Крышкин, Я. Г. Коновалов, Б. Н. Литвин, В. Ф. Руденко, Ю. В. Жеребцов (СССР). – № 3962897/30-08; Заявлено 13.08.85; Опубл. 23.06.88, Бюл. №23.
111. А.с. 1415581 СССР, М. Кл. В 23 Н 7/26. Устройство для электрической обработки глубоких каналов / В. И. Носуленко, Ю. В. Лебедев, Б. В. Львов, И. И. Карпенко, Ю. И. Азанов, А. И. Шевченко (СССР). – № 4149943/25-08; Заявлено 20.11.86; Не подлежит опубл. в откр. печати.
112. А.с. 1484500 СССР, М. Кл. В 23 Н 1/04. Электрод-инструмент для изготовления деталей типа стержней / В. М. Боков, В. И. Носуленко, В.М. Жердый (СССР). – № 4191166/25-08; Заявлено

06.02.87; Опубл. 07.06.89, Бюл. №21.

113. А.с. 1499977 СССР, М. Кл. С 23 С 8/26. Способ азотирования стальных изделий / В. И. Носуленко, В. А. Евстратов. Б. Б. Крышкин, П. Н. Великий (СССР). – № 4352934/31-02; Заявлено 29.12.87; Не подлежит опубл. в откр. печати.
114. А.с. 1577934 СССР, М. Кл. В 23 Н 7/12. Устройство для электрообработки вращающимся диском-электродом / В. И. Носуленко, Б. В. Львов, Ю. В. Лебедев, И. И. Карпенко (СССР). – № 4370578/31-08; Заявлено 26.01.88; Опубл. 15.07.90, Бюл. №26.
115. А.с. 1585101 СССР, М. Кл. В 23 Н 9/00. Способ поверхностного легирования электрическим разрядом / В. И. Носуленко, Б.Б. Крышкин, С. И. Бутенко (СССР). – № 4391083/30-08; Заявлено 04.01.88; Опубл. 15.08.90, Бюл. №30.
116. А.с. 1758951 СССР, М. Кл. В 23 Н 7/36. Устройство для электрообработки / В. И. Носуленко, В. М. Боков (СССР). – № 4744730/08; Заявлено 03.10.89; Не подлежит опубл. в откр. печати.
117. Пат. 621279 Швейцария, МКИ В 23 Р 1/06. Verfahren zur elektroerosiven Bearbeitung von Metallen / V. I. Nosulenko, G. N. Mescheryakov (СССР). – № 8591/77; Заявл. 12.07.77; Опубл. 30.01.81.
118. Пат. 1579197 Великобритания, МКИ В 23 Р 1/16. Method of elektro-erosion machining of metals / V. I. Nosulenko, G. N. Mescheryakov (СССР). – № 29277/77; Заявл. 12.07.77; Опубл. 14.01.81.
119. Пат. 2733430 ФРГ, МКИ В 23 Р 1/06. Verfahren zur elektroerosiven Metallbearbeitung / V. I. Nosulenko, G. N. Meseryakov (СССР). – № 2733430.1-34; Заявл. 25.07.77; Опубл. 27.01.83.
120. Пат. 7728110 Франция, МКИ В 23 Q 1/04. Procédé d'usinage de métaux par elektroerosion / V. I. Nosulenko, G. N. Mescheryakov

- (СССР). – № 2403159; Заявл. 16.09.77; Оpubл. 01.08.80.
121. Пат. 55-48928 Япония, МКИ В 23 Р 1/06. Method of elektroerosion machining of metals / V. I. Nosulenko, G. N. Mescheryakov (СССР). – № 7908-3С, 6378-4Е; Заявл. 25.07.77; Оpubл. 23.02.79.
122. Пат. 3016 Украина, МКИ В 22 F 9/14. Спосіб одержання металевих порошків / В. І. Носуленко, В. М. Боков (Украина). – № 2660192/SU; Заявл. 29.04.94; Оpubл. 26.12.94, Бюл. №5-1.
123. Пат. 3017 Украина, МКИ В 22 F 9/14. Спосіб одержання металевих порошків / В. М. Боков, В. І. Носуленко (Украина). – № 2660191/SU; Заявл. 29.04.94; Оpubл. 26.12.94, Бюл. №5-1.
124. Meshcheriakov G. N., Nosulenko V. I., Meshcheriakov N. G., Bokov V. M. Phisical and Technological Control of Dimensional Machining Process and Metall Transfer // Annals of the CIRP (Япония). – 37/1/1988. – с. 209-212.
125. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970.
126. Электрохимическая и электромеханическая обработка металлов / А. Л. Вишницкий и др. – Л.: Машиностроение, 1971.
127. Пат. 2776 СССР. Способ и устройство для электрической резки металлов / О.Грумпельт; Заявл. 16.03.25.
128. А.с. 70010 СССР. Способ обработки металлов, сплавов и иных токопроводящих материалов / Б. Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко (СССР); Заявл. 03.04.43.
129. А.с. 80718 СССР. Способ обработки металлов и сплавов / Писаревский М. И. (СССР). – 1948.
130. Рябов И. В. Исследование обработки тугоплавких металлов короткими дуговыми разрядами в жидкой среде: Дис. канд. техн. наук. – Запорожье, 1970.
131. Электроимпульсная обработка металлов / Лившиц А. Л. и др. – М.: Машиностроение, 1967.
132. Золотых Б. Н. Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде:

- Автореф. дис... д-ра техн. наук / МИЭМ – М., 1968.
133. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Электричество и магнетизм. – М.: Мир, 1977.
 134. Рябов И. В. Обработка крупногабаритных лопаток короткой дугой // Труды конф. “Комбинированные электроэрозионно-электрохимические методы размерной обработки металлов”. – Уфа: УАИ. – 1983. – 188 с.
 135. Носуленко В.И. Электрическая дуга в поперечном потоке среды-диэлектрика как источник тепла для новых технологий // Электронная обработка материалов, Кишинев. 2005, 2. – с.26-32.
 136. Финкельнбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. – М.: Иностранная литература, 1961.
 137. Арцимович Л. А. Элементарная физика плазмы. – М.: Атомиздат, 1969.
 138. Брон О.Б., Сушков Л.К. Потоки плазмы в электрической дуге выключающих аппаратов. – Ленинград: Энергия, 1975.
 139. Вакуумные дуги: Пер. с англ. / Под ред. Дж.Лафферти. – М.: Мир, 1982.
 140. Самервилл Дж. Электрическая дуга (перевод с английского), - м. – Л.: Госэнергоиздат, 1962.
 141. Технология электрофизических методов размерной обработки материалов. – М.: НИИМАШ, 1968.
 142. Сомервилл Дж. М. Электрическая дуга (пер. с англ.). – М.: Госэнергоиздат, 1962.
 143. Электроразрядная обработка металлов / Левинсон Е. М. и др. – Л.: Машиностроение, 1975.
 144. Эккер Г. Современное развитие теории приэлектродных областей электрической дуги // Теплофизика высоких температур. – 1973. – т.2. – вып.4.
 145. Мазель А. Г. Технологические свойства электросварочной дуги. – М.: Машиностроение, 1969.
 146. Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги. – М.:

Наука, 1968.

147. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975.
148. Солонин Н. С. Математическая статистика в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1972.
149. Сергеев Н. В., Шепель Г. А. Плотность тока электродных пятен дуги с металлическими электродами // Журнал инженерной физики. – 1969. – т.17. – №6.
150. Кесаев И. Г. Катодные процессы ртутной дуги и вопросы её устойчивости // Труды ВЭИ, вып. 67. – М-Л.: Госэнергоиздат. – 1961.
151. Варич Н. И., Колесниченко К. Е. Влияние большой скорости охлаждения на структуру и свойства алюминиевых сплавов // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. – 1960. – №4.
152. Буров Л. И., Якунин А. А. Влияние скорости охлаждения на образование сильнопересыщенного твёрдого раствора в сплавах Al-Mn и Al-Cr // Журнал физической химии. – 1965. – №6.
153. Буров Л. И., Якунин А. А. Влияние скорости охлаждения на состав твёрдого раствора в двойных сплавах на основе алюминия // Журнал физической химии. – 1968. – №4.
154. Эсибян Э. М. Плазменно-дуговая аппаратура. – К.: Техника, 1971.
155. Электроэрозионная и электрохимическая обработка. Часть I. / Под ред. А.Л.Лившица, А. М. Рома. – М.: НИИМАШ, 1980. – 224 с.
156. Быховский Д. Г. Плазменная резка. – Л.: Машиностроение, 1972.

З М І С Т

ВСТУП	3
1. РОЗМІРНА ОБРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЮ ДУГОЮ ЯК СПОСІБ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ	6
1.1. Сутність розмірної обробки металів електричною дугою	6
1.2. Розмірна обробка електричною дугою як наступний етап розвитку ЕЕО	9
1.3. Про класифікаційні ознаки та класифікацію способів ЕРО	19
1.4. Висновки	27
2. ЕЛЕКТРИЧНА ДУГА ЯК ДЖЕРЕЛО ЕНЕРГІЇ ДЛЯ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ	29
2.1. Загальні відомості	33
2.2. Електрична дуга як саморегулююча система	34
2.3. Електрична дуга в силовому полі	42
3. ЕЛЕКТРИЧНА ДУГА В ПОПЕРЕЧНОМУ ПОТОЦІ РІДИНИ ЯК ДЖЕРЕЛО ТЕПЛА ДЛЯ РОЗМІРНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ	67
3.1. Висновки	79
4. ФІЗИЧНИЙ МЕХАНІЗМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕРОЗІЇ В УМОВАХ РОД	80
4.1. Про якість джерел тепла на електродах і полярність електричної ерозії	81
4.2. Динаміка процесу електричної ерозії	93
4.3. Процеси евакуації продуктів ерозії	100
4.4. Феноменологічна модель фізичного механізму електричної ерозії в умовах РОД	103
4.5. Висновки	106
5. ТЕХНОЛОГІЯ РОД	107
5.1. Технологічні схеми формоутворення	107
5.2. Продуктивність процесу	120
5.3. Якість обробленої поверхні	130

5.4. Електроди-інструменти	139
5.5. Точність обробки	145
5.6. Розробка технологічних процесів	146
5.7. Висновки	151
6. ОБЛАДНАННЯ РОД	153
6.1. Концепція проектування верстатів РОД	153
6.2. Особливості проектування верстатів РОД	161
6.3. Станції робочої рідини	173
6.4. Системи автоматичної подачі ЕІ	177
6.5. Джерела живлення технологічним струмом	179
6.6. Верстати РОД	181
6.7. Висновки	209
7. ТИПОВІ ПРОЦЕСИ РОД	211
7.1. РОД порожнин штампів для гарячого об'ємного штампування	211
7.2. РОД спряжених пар робочих деталей розділових штампів	217
7.3. РОД глибоких отворів	223
7.4. Багатоелектродне прошивання отворів та порожнин способом РОД	228
7.5. Очищення способом РОД твердосплавних вставок пресформ для синтезу алмазів	230
7.6. Висновки	231
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	233
ЛІТЕРАТУРА	234

Навчальне видання

Автори:

**Носуленко Віктор Іванович,
Шмельов Віталій Миколайович**

РОЗМІРНА ОБРОБКА МЕТАЛІВ ЕЛЕКТРИЧНОЮ ДУГОЮ

Навчальний посібник

Комп'ютерний набір, комп'ютерна графіка,
верстка та технічне оформлення: Шмельов В.М.

Тиражування: Каліч О.Г.

Підп. до друку 01.08.2017. Формат 60×84/16. Папір офсетний.
Друк різнограф. Ум. друк. арк. 16.

Надруковано: ПП «Ексклюзив-Систем»
Свідоцтво держ. реєстру ДК № 4470 від 17.01.2013.
Зам. №0206 Тираж 300 прим.

*25006, м. Кіровоград, вул. Шевченка, 25
Тел./факс 243553*

