

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова

**А. П. МАЛЮШЕВСЬКА, П. П. МАЛЮШЕВСЬКИЙ**

## **ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОДНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗРЯДНО-ІМПУЛЬСНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ**

**Методичні вказівки  
для самостійної роботи студентів  
з дисципліни "Електровибухові засоби  
перетворення енергії"**

*Рекомендовано Методичною радою НУК*

Електронне видання  
комбінованого використання на DVD-ROM



МИКОЛАЇВ • НУК • 2019

УДК 537.528(076)

М 18

*Автор* А. П. Малюшевська, канд. техн. наук, доцент НУК;  
П. П. Малюшевський, канд. техн. наук, доцент

*Рецензент* Г. В. Павлов, д-р техн. наук, професор

**Малюшевська А. П.**

М 18      Проектування електродної системи для реалізації розрядно-імпульсної технології : методичні вказівки для самостійної роботи студентів з дисципліни "Електровибухові засоби перетворення енергії" / А. П. Малюшевська, П. П. Малюшевський. – Миколаїв : НУК, 2019. – 46 с.

Розглянуто питання створення елементів електровибухових засобів перетворення енергії – електродних систем лінійного типу та електродних систем у складі електророзрядного генератора пружних коливань.

Призначено для студентів електротехнічних та інших спеціальностей, які вивчають курси "Електровибухові засоби перетворення енергії", "Розрядно-імпульсні технології", "Техніка високих напруг" тощо.

УДК 537.528(076)

Навчальне видання

**МАЛЮШЕВСЬКА** Антоніна Павлівна  
**МАЛЮШЕВСЬКИЙ** Павло Петрович

## **ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОДНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗРЯДНО-ІМПУЛЬСНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ**

**Методичні вказівки  
для самостійної роботи студентів  
з дисципліни "Електровибухові засоби  
перетворення енергії"**

Комп'ютерне верстання та складання *В. В. Москаленко*  
Коректор *М. О. Паненко*

© Малюшевська А. П., Малюшевський П. П., 2019  
© Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова, 2019

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 2,8. Об'єм даних 1215 кб.  
Тираж 15 прим. Вид. № 33. Зам. № 71.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова  
просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025  
E-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6402 від 19.09.2018 р.

## **ВСТУП**

Метою курсового проектування є закріплення теоретичних знань з основних принципів побудови і функціонування важливої частини електророзрядного обладнання – електродної системи, використання набутих практичних навиків розрахунку головних характеристик електровибухових засобів перетворення енергії, а також вивчення засобів забезпечення її ефективної та безперебійної роботи спроектованої електродної системи.

Матеріали даних методичних вказівок також може бути використано при дипломному проектуванні.

# **1. БЛОК-СХЕМА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ РОЗРЯДНО-ІМПУЛЬСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Головним робочим інструментом електровибухових засобів перетворення енергії є імпульсний електричний розряд.

Імпульсний електричний розряд – це процес з великою концентрацією енергії. За своєю суттю він є вибухом – дуже швидким виділенням великої кількості енергії в малому об’ємі каналу розряду, що був прокладений стрімером, який у свою чергу виникає під дією високого електричного потенціалу між розташованими навпроти один одного електродами.

Технологічне обладнання для виконання розрядно-імпульсних технологій незалежно від конкретного призначення і типу оброблюваних об’єктів має ідентичну блок-схему (рис. 1) та складається з наступних частин: розрядного технологічного блока 1, який обов’язково містить електродні системи; генератора імпульсних струмів 2 – джерела електричного живлення, яке з’єднане з розрядним технологічним блоком розрядним контуром 3; блока управління генератором імпульсних струмів і технологічним циклом 4, блока основних пристроїв 5, блока допоміжних пристроїв 6 та блока допоміжних систем 7.

Розрядний технологічний блок призначений для ефективного перетворення електричної енергії в інші види енергії, передачі перетвореної енергії на об’єкти обробки для здійснення технологічних процесів.

Генератор імпульсних струмів (ГІС) забезпечує первинне перетворення електричної енергії до виду, що є зручним для формування потужного електричного розряду в рідині.

Блок управління ГІС і технологічним циклом виконує усі вклучення користувачів електроенергії в наданій послідовності технологічних операцій.

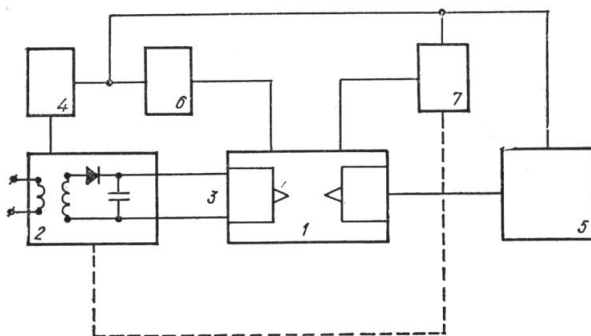


Рис. 1. Блок-схема електророзрядної установки

Основні пристрої необхідні для переміщення виконуючих органів у цілому чи окремих їх елементів, а також робочого середовища в них.

Допоміжні пристрої забезпечують завантаження та розвантаження об'єктів обробки в розрядний технологічний блок, видалення відходів обробки, їх розділення у разі необхідності.

Допоміжні системи призначені для транспортування і регенерації робочої рідини за межі розрядного технологічного блока, регенерації відходів переробки.

Найважливішим вузлом устаткування для реалізації будь-якої розрядно-імпульсної технології є електродна система, в якій генерується потужний електричний розряд – первинний засіб перетворення енергії.

## **2. ОСНОВНІ ФАКТОРИ, ЩО ДІЮТЬ НА ОБ'ЄКТИ ОБРОБКИ В ПОЛІ ЕЛЕКТРИЧНОГО РОЗРЯДУ**

До моменту початку електричного вибуху енергія накопичується в конденсаторі, швидко її виділення і перетворення викликає появлення сил різної природи, які прикладені до середовища і до окремих тіл, що розташовані в зоні розряду.

Головними факторами, що виконують роботу над речовиною в розрядно-імпульсних технологіях, є такі:

- електричне поле в розрядному проміжку та в найближчій зоні;
- магнітне поле струму розряду;
- світлове випромінювання каналу розряду в широкому спектрі (від інфрачервоного до ультрафіолетового);
- ударна хвиля в робочій рідині, що генерується розрядним каналом, який швидко розширюється;
- гідропотоки, які виникають через зростання і подальше захоплення післярозрядної порожнини;
- складний за формою імпульс тиску, який генерується післярозрядною порожниною, що захопується;
- інтенсивна імпульсна електророзрядна кавітація;
- інтенсивне акустичне випромінювання в широкій полосі частот (від інфразвуку до ультразвуку);
- радикали і радикальні групи, що виникають у водному розчині під дією електровибухових факторів на всіх стадіях розряду.

Енергія, яка знаходилася в потенційній формі в накопичувачі генератора імпульсних струмів, перетворюється і розподіляється, як показано на рис. 2.

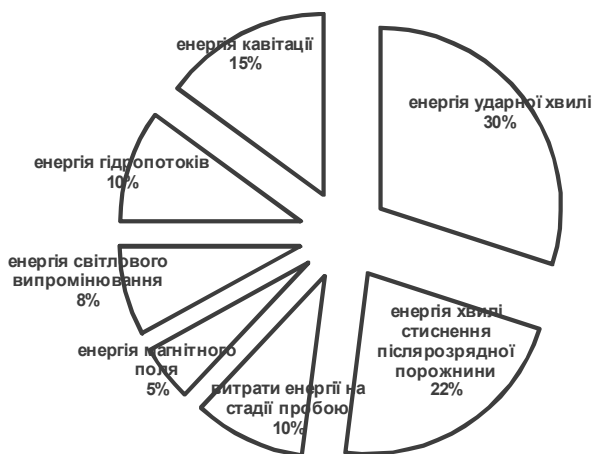


Рис. 2. Приблизний розподіл енергії, що перетворюється під час електровибуху

### 3. СКЛАД І КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕМЕНТІВ РОЗРЯДНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО БЛОКА

В широко вживаному електророзрядному устаткуванні всі стадії електричного розряду найчастіше відбуваються у рідині. Робочою рідиною електророзрядних установок, як правило, є водопровідна вода, тому що вона доступна і відносно дешева, інколи використовують воду, що попередньо підготована, наприклад, водні електроліти. Деякі розрядно-імпульсні технології не передбачають можливість використання води – в такому разі застосовують вуглеводневі чи силіконові рідини, гліцерин, розплави солей. Бажані значення електричного опору рідини в розрядному проміжку електродної системи для реалізації розрядно-імпульсних технологій розташовані в діапазоні від 10 до 50 Ом·м, при більшому електричному опорі виникає проблема визначення довгих розрядних проміжків, а при меншому – проблема збільшення передпробійних втрат енергії.

Ряд характеристик вільного (такого, що не ініціюється штучно) розряду, особливо його електричний ККД, суттєво залежать від фізико-хімічних властивостей середовища, головним чином від електричного опору. Наприклад, зміна електричного опору від 100 до 1 Ом·м впливає на зменшення електричного ККД від значення, близького до одиниці до однієї соті.

Електродні системи як виконуючі органи електророзрядних установок відносяться до техніки високої напруги і працюють в жорстких умовах великих динамічних навантажень, сильних електричних і магнітних полів, ультрафіолетового випромінювання та руйнівного впливу робочого середовища. В кінцевому рахунку надійність електровибухової установки визначається в першу чергу надійністю та міцністю елек-

тродної системи. Узагальнений досвід проектування та експлуатації дозволяє рекомендувати типові конструкції електродних систем.

Класифікація електродних систем розроблена насамперед за конструктивними ознаками, наприклад, стрижневі протирозташовані лінійної геометрії, стрижневі паралельної геометрії, коаксійної геометрії, спеціального призначення тощо (рис. 3).

За кількістю енергії, що перетворюється, системи поділяють на системи малих (до 0,1 кДж), середніх (до 25 кДж) і великих (до 100 кДж і вище) енергій в одному імпульсі. До конструкцій електродних систем висувають дві основні вимоги: забезпечення високого коефіцієнта перетворення електричної енергії, що накопичена в генераторі, в інші види енергії, а також економічно доцільну стійкість електродів (число розрядів без ремонту або заміни). В особливий клас електродних систем слід виділити електродні системи з ініціацією розрядного проміжка, використання яких в умовах масштабного відтворення електричних розрядів обумовлене вимогами технологічного процесу або особливостями об'єкта обробки.

Високий коефіцієнт перетворення енергії досягається шляхом правильного вибору геометрії електродної системи й особливо її розрядної зони, величини індуктивності розрядного контуру й електропровідності робочого середовища, розміщенням відносно об'єкта обробки і використанням активних та пасивних елементів для отримання спрямованого потоку перетвореної енергії на об'єкт обробки.

На рис. 4 зображена принципова схема електродної системи лінійної геометрії зі стрижневими протирозташованими електродами і розрядним проміжком типу "вістря-площина".



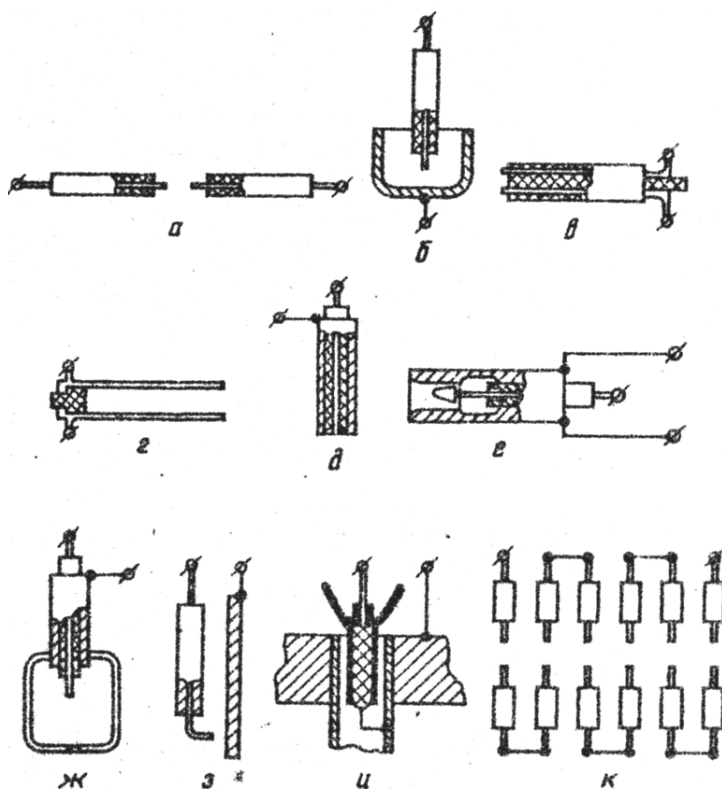


Рис. 3. Види електродних систем:

*а* – стрижнева протирозташована лінійної геометрії з розрядним проміжком "стрижень-стрижень"; *б* – стрижнева протирозташована лінійної геометрії з розрядним проміжком "стрижень-площина"; *в* – стрижнева паралельної геометрії торцева; *г* – стрижнева паралельної геометрії з подовженою розрядною зоною; *д* – коаксійної геометрії торцева; *е* – коаксійної геометрії з подовженою розрядною зоною; *ж* – коаксійна з лінійним розрядним проміжком; *з* – стрижнева з кутовим розташуванням; *и* – "вибухаючий" патрон; *к* – багатоелектродна

У цьому найпростішому варіанті стрижень-струмовід  $1$ , який підключено до обкладинки конденсатора під позитивним потенціалом, має покриття ізоляцією  $2$  по всій довжині, за виключенням вістря в розрядному проміжку, а стрижень-струмовід електрода протилежної полярності має розвинену поверхню. Кінець стрижня  $1$  поміщають у змінний діелектричний наконечник  $3$ . На рисунку показано також діаметр стрижня-струмовода ( $d$ ), довжину розрядного проміжку ( $l_p$ ), довжину оголеної частини стрижня-струмовода ( $h$ ). Електродні системи оснащені рядом елементів, що забезпечують надійну роботу: закріплення та ввід в розрядні камери, підключення кабелів розрядного контуру тощо. Для забезпечення захисту ізоляції в описуваних електродних системах з ініціацією стрижень-струмовід з боку розрядного проміжку закривають конусним наконечником.

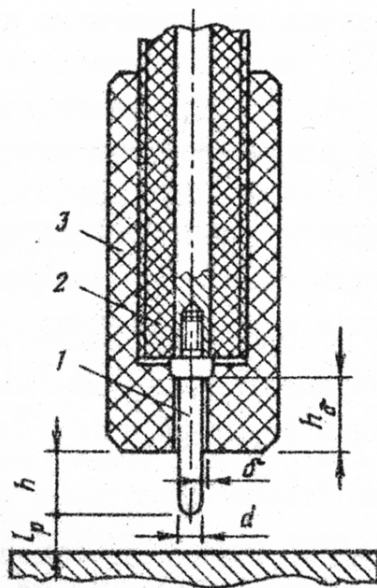


Рис. 4. Схема електродної системи лінійної геометрії з електродами "стрижень-площина"

Одне з найбільш простих конструктивних рішень, що дозволяє значно збільшити довговічність діелектрика ізоляції — це розділення водяним шаром кінця стрижня-струмовода і кінця ізолятора.

У такому електроді роблять радіально-щілинний просвіт  $3 \dots 5$  мм завширшки ( $\delta$ ) на глибину ( $h_\delta$ )  $15 \dots 30$  мм від торця

ізолятора. Такий просвіт розділяє зону безпосереднього контакту стрижня-струмовода та ізолятора.

Таким чином, незалежно від робочої напруги і товщини ізолятора (в діапазоні робочих напружень від 25 до 60 кВ) проходження ковзаючих розрядів по поверхні торця ізолятора виключається, що позитивно впливає на довговічність виробу.

Лінійні електродні системи типу стрижень-площина широко використовуються в установках для листової штамповки, очищення виливків, подрібнення матеріалів, емульгування.

Для обраних напруги та ємності конденсатора існує межа величини оголеної поверхні стрижня-струмовода, при перевищенні якої ефективність електродної системи різко знижується. В діапазоні енергій в одному імпульсі від 0,1 до 10 кДж вона знаходиться в межах 2,5...5 см<sup>2</sup>.

Зазвичай в електродних системах до електрода-анода приєднується змінний наконечник ізолятора з рухомим ядром стрижня-струмовода, що значно збільшує довговічність електродної системи в цілому. По мірі руйнування ізоляції замінюється швидкоз'ємний наконечник, а по мірі ерозійного зносу стрижня-струмовода рухливе ядро його подається в зону розряду, довжина робочого проміжку при цьому залишається незмінною.

З самого початку проектування конкретної розрядно-імпульсної технології необхідно передусім ретельно оцінювати ті об'єкти, що належить обробляти розрядом: їх фізико-механічні, а також електрофізичні характеристики, геометрію зони обробки (як початкову, так і кінцеву), вимоги до продукту переробки, принципові можливості електророзряду в рідині впливати на об'єкт обробки та ін.

#### **4. КОРОТКІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИЙ ГЕНЕРАТОР ПРУЖНИХ КОЛИВАНЬ**

Інколи об'єкти обробки не можуть бути розташовані безпосередньо в робочій рідині електророзрядних камер: наприклад, порошки, що пресують, рідкий метал чи рідини, процес обробки яких виключає наявність води. В таких випадках слід використовувати електророзрядний генератор пружних коливань (ЕРГПК), який дозволяє діяти імпульсами на речовину при розділенні двох середовищ: середовища, в якому виконується електровибух, і середовища, в якому розміщені об'єкти обробки. Для такого розділення на межі двох середовищ встановлюється перепона, наприклад, мембрана, яка передає у вигляді інтенсивних пружних коливань усі механічні збурення, що їх генерує електровибух. Вимоги до перепони різноманітні і визначаються фізичними параметрами середовища та режимами обробки, розмірами об'єктів обробки, енергосиловими параметрами електророзрядної установки і т. ін. Конструктивна схема ЕРГПК представлена на рис. 5: тут електродні системи 1 розміщені в розрядній камері 2 з рухомим робочим елементом 3 і підключені до генератора імпульсних струмів 4.

На практиці знайшли застосування ЕРГПК з різноманітними формами розрядних камер, але найчастіше використовують циліндричні. Джерело збурення (електричний вибух) може знаходитися в будь-якій області камери пристрою, розряд на мембрану приводить до більш інтенсивного впливу на об'єкт обробки. Встановлено істотний вплив геометрії електродної системи, що розміщена в камері ЕРГПК, на параметри імпульсу пружних коливань. Найбільш дієвою з позиції передавання енергії робочому елементу водонаповненого

ЕРГПК з урахуванням конструктивних особливостей є величина міжелектродної відстані до 30 мм. Подальше збільшення розрядного проміжку може викликати пробій з кінця стрижня на бокові стінки камери як через рідину, так і по поверхні ізолюючої частини електрода.

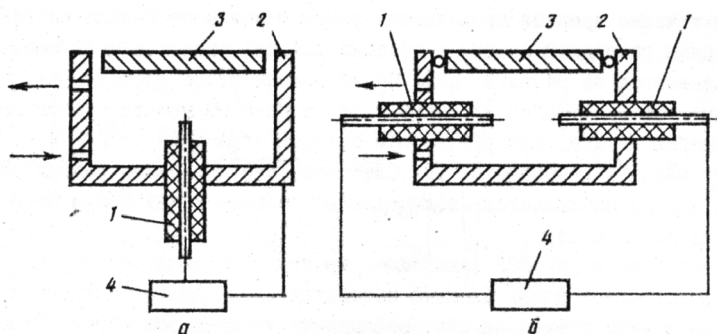


Рис. 5. Схеми електророзрядного генератора пружних коливань:  
*a* – розряд на рухомий робочий елемент; *б* – розряд в центральній зоні камери

Характерною особливістю ЕРГПК є те, що технічне втілення таких пристроїв значно випереджає рівень наукової розробки проблеми взаємодії збурень, що утворюються генератором коливань, і об'єкта обробки. На сучасному етапі розвитку імпульсних методів обробки ставиться задача оптимізації процесів та забезпечення максимального технологічного ефекту при зниженні до мінімуму енергетичних витрат. Умови проектування розрядно-імпульсних технологій з використанням ЕРГПК залежать від знання параметрів і форми повного його імпульсу.

Найважливішою відмінною рисою роботи будь-якого ЕРГПК є електричний вибух у замкненому просторі. На

відміну від розряду у вільному об'ємі рідини розряд в ЕРГПК характеризується тим, що довжини розрядних проміжків і післярозрядних порожнин стають порівнянними з розмірами розрядної камери. Протягом часу проходження ударної хвилі від каналу розряду до межі розрядної камери і назад вплив стінок камери ще не позначається на розвитку каналу електричного розряду. Після закінчення цього часу на канал електричного розряду починає впливати відбита від стінок (меж) камери ударна хвиля, що відбивається від каналу електричного розряду та повертається до меж камери. Таким чином, в обсязі камери електророзрядного генератора пружних коливань спостерігається складне хвильове поле між каналом електричного розряду і стінками.

Урахування впливу на канал електричного розряду хвиль тиску, які є багаторазово повторюваними – це складна математична задача. Безперервне підвищення тиску в області існування каналу електричного розряду неминуче призводить до зниження швидкості його розширення і зменшення роботи розширення.

Досліджені теоретично на теперішній час схеми розрахунку передбачають випадок електричного вибуху в центрі розрядної камери. Якщо ж розряд зміщується до однієї зі стінок, наприклад до мембрани, то можуть утворюватися змичні ударні хвилі, інтенсивність яких вище, ніж у первинної, та проте тягне істотну зміну закономірностей руху робочого елемента електророзрядного генератора пружних коливань.

Аналіз електричного вибуху в обмеженому обсязі дозволив зробити висновок про можливість використання в ЕРГПК такого фактора, як квазістатичний тиск, на додаток до ударних хвиль і гідропотоків. Цей тиск з'являється і зростає при розширенні парогазової післярозрядної порожнини від гідростатичного до максимального, деякий час тримається постійним, а потім повільно зменшується до гідростатичного.

Експериментально доведено, що в обмеженому обсязі амплітуда тиску первинної хвилі стискання зростає, радіус післярозрядної порожнини зменшується, і вона відчуває менш глибокі пульсації в порівнянні з рухом у вільному об'ємі рідини. Амплітуда другого імпульсу стискання зменшується, в той час як вплив меж обсягу зводиться до впливу на межу каналу розряду відбитих від стінок камери ударних хвиль.

На практиці знайшли застосування ЕРГПК з різноманітними формами розрядних камер, однак найчастіше застосовуються циліндричні. Джерело збурення (електричний вибух) може бути поміщене в будь-яку область ЕРГПК, розряд безпосередньо на мембрану або толчок призводить до більш жорсткого впливу на об'єкт обробки. При кожному розряді в камері електророзрядного генератора пружних коливань генерується складний за формою імпульс пружних коливань, стилізований вигляд якого наведено на рис. 6.

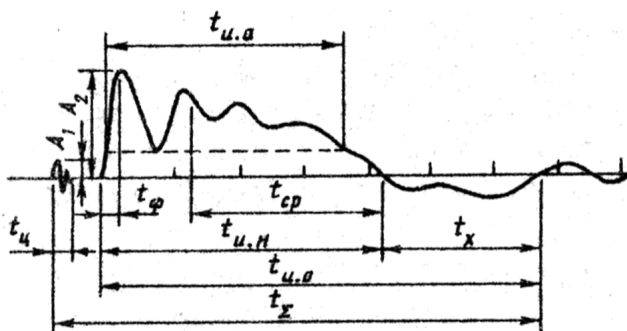


Рис. 6. Стилізований імпульс ЕРГПК

Основні характеристики для різних режимів розряду ЕРГПК наведені в таблиці 1, де  $W_0$  – енергія, що запасється в блоці ємнісних накопичувачів (в усіх випадках використовувалася жорстка мембрана). Всі інші важливі параметри імпульсу пружних коливань при здійсненні розряду на робо-

чий елемент ЕРГПК для напруги  $U = 25$  кВ,  $W_0 = 0,1$  кДж, наприклад, наведені нижче:

- тривалість імпульсу ЕРГПК загальна  $t_{\text{и.о}} = 70$  мс;
- тривалість імпульсу ЕРГПК активна  $t_{\text{и.а}} = 30$  мс;
- тривалість переднього фронту  $t_{\text{ф}} = 1$  мс;
- тривалість зрізу імпульсу  $t_{\text{ср}} = 20$  мс;
- тривалість навантажувальної частини  $t_{\text{и.н}} = 35$  мс;
- тривалість хвоста імпульсу загального переміщення  $t_{\text{х}} = 30$  мс;
- тривалість цуга-попередника  $t_{\text{ц}} = 0,05$  мс;
- амплітуда пружних коливань цуга-попередника  $A_1 = 0,025$  мм;
- прискорення пружних коливань цуга-попередника  $a_1 = 5 \cdot 10^5$  м/с<sup>2</sup>;
- частота пружних коливань цуга-попередника  $f_1 = 30$  кГц.

**Таблиця 1. Основні характеристики імпульсів пружних коливань**

| Характеристика                                                             | Робоча напруга, кВ |      |      |      |     |      |      |     |     |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------------|------|------|------|-----|------|------|-----|-----|
|                                                                            | 25                 |      |      | 36   |     |      | 50   |     |     |
| Енергія, що запасается в блоці накопичувачів $W_0$ , кДж                   | 0,1                | 0,5  | 2,0  | 0,1  | 0,5 | 2,0  | 0,1  | 0,5 | 2,0 |
| Амплітуда пружних коливань (основного імпульсу) $A_2$ , мм                 | 0,2                | 0,75 | 0,83 | 0,28 | 1,0 | 1,23 | 0,37 | 1,4 | 2,5 |
| Прискорення пружних коливань (основного імпульсу) $a_2$ , м/с <sup>2</sup> | 22                 | 64   | 88   | 25   | 80  | 135  | 30   | 110 | 310 |
| Частота пружних коливань (основного імпульсу) $f_2$ , Гц                   | 26                 | 28   | 31   | 18   | 23  | 25   | 34   | 20  | 14  |



Експериментальними дослідженнями встановлено, що процес руху пружного елемента багатостадійний, причому максимум амплітуди пружних коливань робочого елемента ЕРГПК не збігається з максимумами тиску в розрядній камері. Основне навантаження робочого елемента ЕРГПК при впливі на нього розряду здійснюється ударною хвилею і хвилями стиснення від післярозрядної порожнини, що пульсує.

Встановлено суттєвий вплив геометрії електродної системи, що встановлена в камеру ЕРГПК, на параметри імпульсу пружних коливань, особливо величини міжелектродного проміжку. Найбільш ефективною з точки зору передавання енергії робочого елемента ЕРГПК з урахуванням конструктивних особливостей є величина міжелектродного проміжку 30 мм. Подальше збільшення розрядного проміжку може викликати пробій з кінця стержня на бічні стінки камери як через рідину, так і по поверхні ізолюючої частини електрода.

Параметри ЕРГПК в значній мірі залежать від властивостей робочої рідини в ньому. Порівняльні дослідження технічної, дистильованої води та поліметилсилоксанової рідини показали, що в разі застосування останньої як робочого середовища ЕРГПК спостерігається зниження прискорення мембрани в порівнянні із застосуванням технічної води в 1,25...2,25 рази, а в порівнянні з випадком застосування дистильованої води – в 2,3...3,5 рази (рис. 7). Однак в той же час відзначається значне підвищення стабільності роботи ЕРГПК з поліметилсилоксановою рідиною, важливим фактом на користь її застосування є також збільшення терміну служби наконечника ізолятора електрода приблизно в 10 разів.

Крім того, параметри імпульсу пружних коливань істотно залежать від характеристик розрядного контуру. Значний інтерес становить експериментальна залежність амплітуди імпульсу тиску в робочій камері від зарядної напруги (рис. 8).

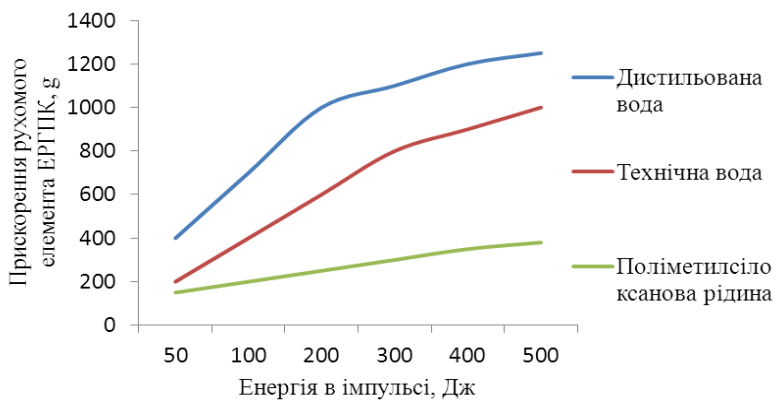


Рис. 7. Порівняння амплітуди руху мембрани ЕРГПК для різних робочих рідин

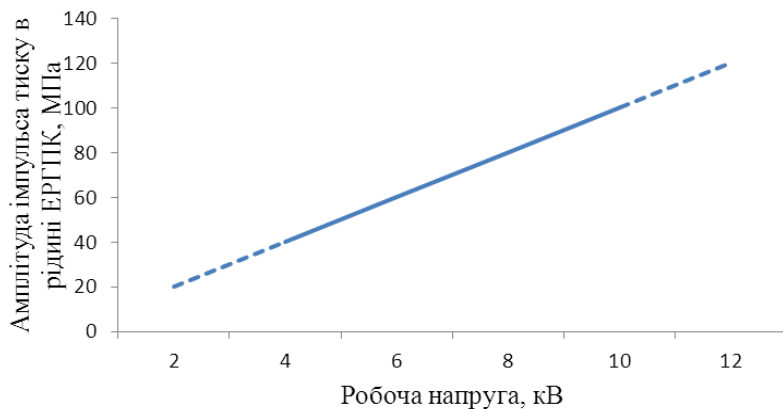


Рис. 8. Залежність амплітуди імпульсу тиску від робочої напруги (розряд ініційований відрізком дроту)

Найкращим чином зарекомендувало себе використання ЕРГПК в технологіях порошкової металургії. Досліджено, наприклад, процес віброімпульсного пресування системи порошків Fe-Ni з використанням ЕРГПК, який був вбудований в прес з максимальним робочим зусиллям 1250 кН і оснащений для пресування порошків. Імпульсному пресуванню піддавали механічну суміш порошків заліза (середній розмір частинок 50...150 мкм) і нікелю (середній розмір частинок 1...70 мкм). Відсотковий вміст заліза змінювався від 40 до 60 %. Параметри роботи ЕРГПК були наступні: робоча напруга  $U = 40$  кВ; енергія в імпульсі  $W_0 = 1,6$  кДж; робочий проміжок 30 мм; частота посилення імпульсів коливалась від 5 до 10 Гц; число імпульсів змінювали від 50 до 250. Крім віброімпульсного впливу, що завдавав ЕРГПК, до об'єкта пресування прикладали також статичне зусилля притискання прес-форми з порошком до плити до  $450 \text{ кг/см}^2$ .

В отриманих зразках досліджували мікроструктуру, мікротвердість, було проведено рентгеноструктурний аналіз, виміряна електропровідність зразків до і після пресування. Проведений металографічний аналіз показав, що в результаті віброімпульсного ущільнення зі зростанням імпульсного тиску і швидкості стиснення збільшуються пластичні течії в усьому обсязі порошкового матеріалу й особливо в поверхневих шарах частинок. Це дозволяє отримати наклепані поверхневі шари зі значним спотворенням кристалічної решітки, що в свою чергу, призводить до значного розігріву частинок, більш інтенсивного дроблення оксидних плівок і рівномірного розподілу їх в обсязі матеріалу, що обробляється. Суккупність цих факторів підтвердила гіпотезу про можливість протікання дифузійних процесів при віброімпульсному пресуванні.

Для всіх зразків був отриманий більш рівномірний розподіл щільності і поруватості в зразках порівняно зі статич-

ним пресуванням. Велика рівномірність розподілу пор у заготовках завжди супроводжується більшою рівномірністю розподілу напружень у процесі зіступу, що сприяє кращому ущільненню виробів при подальшому спіканні. Вимірювання електропровідності зразків, що були оброблені імпульсним методом, також виявило кращі результати в порівнянні зі статично ущільненими зразками. Рентгенографічне дослідження елементів кристалічної структури показало, що при віброімпульсному пресуванні в кінцевому підсумку відбувається значна пластична деформація частинок порошку зі зміною блоків мозаїки, зростанням напруги другого роду і збільшенням щільності дислокацій. Підвищена дефектність кристалічної структури зразків позитивно впливає на процес спікання, активізуючи процес зіступу.

Механізм ущільнення порошкових матеріалів при використанні ЕРГПК полягає в наступному. Високоінтенсивне пружне збурення від імпульса-попередника, яке потрапляє в заготовку, переводить її в псевдозріджений стан в усьому обсязі, незважаючи на наявність статичного обтиску. Наступний за попередником здвоєний імпульс застає об'єкт пресування в цьому сприятливому стані і шляхом поперемінного навантаження-розвантаження рівномірно його ущільнює. Дослідження процесів віброімпульсного ущільнення порошків показало принципову можливість його використання для пресування порошків високої щільності, отримання високої відносної щільності матеріалів, зниження температури наступного спікання зразків, спрощення технологічного процесу ущільнення матеріалів.

Такі обнадійливі результати дозволили перейти до дослідження процесів віброімпульсного пресування непластичних матеріалів, наприклад карбіду кремнію, нітриду бору, оксиду ітрію, а також порошків нікелю, титану, твердих сплавів.

Встановлені характеристики і параметри ефективного вібро-імпульсного пресування порошкових матеріалів дозволяють створювати технології, що істотно підвищують габарити виробів з них при забезпеченні високих значень щільності і якості. Розрядно-імпульсні технології пресування порошкових непластичних матеріалів забезпечують отримання деталей великих габаритів з досить високою щільністю і ступенем рівномірності щільності за всім перерізом.

## **5. ЗМІНА ВЛАСТИВОСТЕЙ РОБОЧОЇ РІДИНИ ПІД ВПЛИВОМ ЕЛЕКТРИЧНИХ РОЗРЯДІВ**

Як робочі рідини в електродних системах різного типу зазвичай використовуються вода або слабкі водні електроліти. Для деяких РІТ доводиться застосовувати також інші рідини, наприклад, вуглеводневі, силіконові або розплави солей. Найбільш придатне рідке середовище для електророзрядних камер – це технічна вода, яка, проте, може змінювати свої властивості при електрообробці.

Вода – це сполука зі складними фізико-хімічними властивостями, які справляють вагомий вплив на поведінку води при з'єднанні з іншими речовинами і, по суті, визначають характер цієї поведінки взагалі. Молекула води, що складається, відповідно до класичних уявлень, з двох атомів водню й одного атома кисню або, точніше кажучи, з двох одновалентних іонів водню й одного двовалентного іона кисню, найчастіше розглядається у вигляді так званого диполя, тобто тіла з двома полюсами, що несуть заряди протилежного знака.

Експериментальні дані і теоретичні розрахунки дозволили зробити висновок, що структура рідкої води являє собою динамічну сітку сильних і слабких водневих зв'язків, така сітка схильна до спонтанної перебудови в результаті теплового руху молекул. Таким чином, вода є складною асоційованою рідиною, яка при зовнішніх впливах змінює свої властивості (навіть фундаментальні).

Відомо, що бажані значення питомого опору рідини в розрядному проміжку електродної системи для реалізації РІТ лежать в діапазоні від 10 до 50 Ом·м, при більшій величині опору виникає проблема створення довгих розрядних проміжків, а при меншій – проблема збільшення передпробійних втрат

енергії аж до 100 % від енергії, що запасасться в блоці накопичувачів.

Ряд характеристик вільного (такого, що не ініціюється відрізком дроту або провідною пастою) розряду, особливо його електричний ККД, суттєво залежать від фізико-хімічних властивостей середовища, головним чином від питомого опору  $\rho$ . Так, зміна питомого опору води від 100 Ом·м до одного Ом·м тягне за собою зменшення електричного ККД від значення, близького до одиниці до однієї соті.

Були виконані експериментальні дослідження зміни опору води розрядних камер в залежності від енергетичних характеристик розряду в широкому діапазоні зміни початкового питомого опору. По мірі збільшення сумарної енергії, що введена в обсяг розрядної камери, зменшується питомий опір для великих (2500, 250 Ом·м) початкових значень і для будьяких фіксованих значень температури. Швидкість зміни питомого опору води в залежності від питомої енергії значно вище, ніж швидкість його зміни при підвищенні температури. Питомий опір оброблюваної води швидко входить в насичення, і подальше підвищення питомої енергії майже не призводить до зміни  $\rho$  (рис. 9). Бачимо, що питомий опір води з великих початкових значень зменшується в декілька разів і стабілізується в діапазоні 95...105 Ом·м, що для вільного розряду є несприятливим діапазоном, тому що різко зростають передпробійні втрати.

Результати хімічного аналізу води розрядної камери після серії імпульсів електричних розрядів з сумарною енергією 100, 300, 500 кДж/м<sup>3</sup> представлені в таблиці 2 (матеріал камери та електродів – Сталь 45).

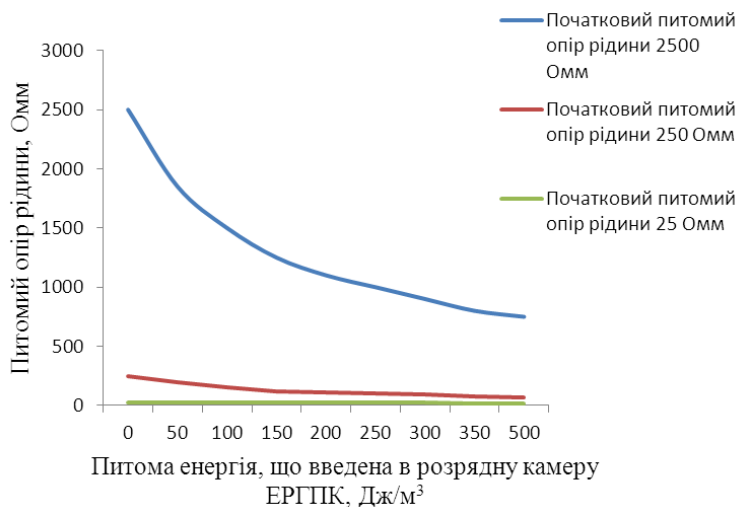


Рис. 9 . Зміна питомого опору робочої рідини в залежності від питомої енергії

**Таблиця 2. Хімічний склад обробленої електричними розрядами води**

| Сумарна енергія, що введена в розрядну камеру, кДж/дм³ | Вміст металів, назва металу, мг/дм³ |      |     |      |      |    |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------|------|-----|------|------|----|
|                                                        | Fe                                  | Ni   | Zn  | Cr   | Mn   | Cu |
| 0 (початковий стан)                                    | 0                                   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0  |
| 100                                                    | 22,5                                | 3,0  | 0   | 0,35 | 0    | 0  |
| 300                                                    | 33,0                                | 7,5  | 0,2 | 1,2  | 0,04 | 0  |
| 500                                                    | 50,0                                | 17,5 | 5,0 | 1,8  | 0,9  | 0  |

Довгострокові зміни питомого опору води в розрядних камерах електророзрядних установок пов'язані з виникненням іонів  $H^+$ ,  $OH^-$ ,  $O^-$ ,  $H_3O^+$ , що з'являються після дисоціації води в процесі електророзрядної обробки. Вони виконують роль носіїв зарядів і створюють подвійний електричний шар



на частинках твердої фази, яка диспергується в рідині, сприяють коагуляції дисперсної системи, умови пробою якої різночасно відрізняються від умов пробою чистої води.

Під впливом енергії розряду відбувається розкладання компонентів системи, а також взаємодія продуктів розкладання між собою, що суттєво змінює хімічний склад середовища та умови формування електричного розряду.

Теплові процеси, які виникають на електродах при імпульсних електричних розрядах, є причиною їх ерозії. Якщо електроерозія протікає під дією поверхневого джерела тепла, то можливий процес поверхневого випаровування, подібний процесу сублімації. Якщо процес ерозії буде протікати селективно, то в продуктах ерозії концентрація компонента стопу з більш високим значенням парціального тиску буде вище, ніж у вихідного матеріалу. Величина електричної ерозії залежить від теплофізичних констант речовини, в першу чергу від питомої теплоти випаровування, величини теплової потужності і енергії розряду, величини імпульсних тисків, що генеруються в розрядному проміжку, коефіцієнта поверхневого натягу і в'язкостних властивостей металу в ямці. В загальному сумарному ефекті ерозії враховують також крихке руйнування поверхневих шарів внаслідок термічних напружень, що виникають при нерівномірному нагріванні ділянок електродів під дією плоских і об'ємних джерел тепла.

Метал, що диспергується, вступає у взаємодію із середовищем, в якому, власне, відбувається ерозія. В результаті в продуктах ерозії з'являються оксиди і сполуки елементів, що входять до складу електродів і робочого середовища. Найбільш імовірний шлях утворення оксидів – взаємодія кисню робочого середовища з поверхнею дрібнодисперсних і перегрітих частинок, які викидаються з ерозійного кратера.

Під дією енергії, що виділяється в каналі електричного розряду, відбувається розкладання води з утворенням атомарних, збуджених та іонізованих водню і кисню. Активований в розряді кисень ініціює розвиток в середовищі окиснювально-відновної реакції. В результаті вода стає істотно активною, а кисень і водень, що не прореагували, рекомбінують з утворенням газоподібних водню і кисню і виділяються в навколишнє середовище.

Фазовий склад нерозчинних залишків, що були отримані після електророзрядного впливу на водопровідну воду внаслідок ерозії елементів камери і сталевих електродів, свідчить про наявність гідратних форм оксидів заліза типу  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  і  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , а також оксидних форм  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  і  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{AFeO}$  в різних співвідношеннях в залежності від питомої енергії, яка введена в даний обсяг рідини. Гідратні форми заліза містять також до 20% карбонатів кальцію і магнію. Дані з концентрації нерозчинних речовин і розчиненого заліза у водопровідній воді після електророзрядної обробки наведені в таблиці 3.

**Таблиця 3. Концентрація нерозчинних речовин і розчиненого заліза після електророзрядної обробки водопровідної води**

| Питома енергія, що введена в розрядну камеру, кДж/дм <sup>3</sup> | Нерозчинні речовини, мг/дм <sup>3</sup> | Розчинене залізо (3 <sup>+</sup> ), мг/дм <sup>3</sup> |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 0                                                                 | 0                                       | 0,745                                                  |
| 80                                                                | 20,4                                    | 0,85                                                   |
| 160                                                               | 22,8                                    | 0,51                                                   |
| 320                                                               | 30,5                                    | 0,41                                                   |
| 480                                                               | 32,0                                    | 0,47                                                   |
| 640                                                               | 49,4                                    | 0,29                                                   |

Ерозія поверхні електророзрядної камери й електрода призводить до того, що вміст нерозчинних у воді продуктів під впливом електророзряду зі збільшенням питомої енергії нелінійно зростає, а кількість розчиненого у воді тривалентного заліза зменшується. Однак і це не є основним фактором, що впливає на збільшення електропровідності води при збільшенні питомої енергії обробки. Головну роль в цьому процесі відіграють іони  $H^+$ ,  $OH^-$ ,  $O^-$ ,  $H_3O^+$ , що з'являються при дисоціації води за рахунок розрядних явищ і взаємодії з ультрадисперсними частинками твердої фази. У відповідальних випадках і в умовах промислових обсягів обробки об'єктів необхідно оснащувати установки системами регенерації робочих рідин і системами газовидалення з замкнених електророзрядних камер. Ще одним рішенням проблеми зниження передпробійних втрат і гарантованої реалізації електровибуху є ініціювання розряду, наприклад, вибухом відрізка дротика. Крім того, електророзрядні камери, в яких використовується вода як робоче середовище, можуть служити реакторами для отримання водних розчинів зв'язаного азоту.

## **6. ПРИКЛАД ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОДНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗРЯДНО-ІМПУЛЬСНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ РОЗПЛАВУ В КОВШІ**

Завдання на проектування: енергія в імпульсі ( $W = 1$  кДж), робоча напруга ( $U_0 = 50$  кВ), кількість електродних систем – одна.

Обов'язковими етапами проектування є:

- 1) вибір типу електродної системи в залежності від розрядно-імпульсної технології, що реалізується;
- 2) вибір геометричних розмірів електродної системи; виконання ескізного креслення електродної системи;
- 3) розрахунок індуктивності електродної системи;
- 4) розрахунок оптимальної довжини розрядного проміжку;
- 5) розрахунок напруження перекриття ізолятора стрижня-струмовода;
- 6) вибір матеріалу ізолятора, вибір матеріалу стрижня-струмовода;
- 7) розрахунок зусиль, що діють на електрод при розряді;
- 8) розрахунок товщини скін-шару;
- 9) розрахунок нагріву електрода;
- 10) розрахунок ерозійного зносу стрижня-струмовода і встановлення часу регулювання довжини розрядного проміжку.

Кожний етап розрахунку треба супроводжувати аналізом доцільності і правильності прийнятого рішення.

### *1) Вибір типу електродної системи*

Якщо розрядно-імпульсна технологія, для якої проектується згідно з завданням електродна система, передбачає розділення

матеріалу, що обробляється (розплаву метала), і робочого середовища (води технічної), то доцільно використовувати ЕРГПК, наприклад, циліндричної форми. Електророзрядна технологія, що реалізується безпосередньо у воді або іншому рідкому середовищі, не потребує використання ЕРГПК і необхідно проектувати електродну систему лінійної геометрії, наприклад таку, як зображено на рис. 3.

*2) Вибір геометричних розмірів електродної системи; виконання ескізного креслення електродної системи*

Призначимо геометричні розміри електродної системи:

- загальна довжина стрижня-струмовода  $l = 460$  мм;
- діаметр стрижня-струмовода  $d_c = 2r = 10$  мм;
- внутрішній діаметр ізолятора  $d_{\text{вн}} = 10$  мм;
- зовнішній діаметр ізолятора  $d_{\text{н}} = 68$  мм;
- діаметр неізольованої частини струмопровідного стрижня  $d = 6$  мм;
- ширина зазору між ізоляцією і струмопровідним стрижнем  $\delta = 2$  мм;
- глибина просвіту між ізоляцією і стрижнем-струмоводом  $h_\delta = 50$  мм;
- довжина неізольованої частини струмопровідного стрижня  $h = 30$  мм.

Попередньо обираємо як матеріал стрижня-струмовода сталь електротехнічну нелеговану сортову (ГОСТ 11036-75), як матеріал ізолятора – поліетилен низького тиску [2].

Геометрія електродної системи у складі ЕРГПК є інваріантною, але у будь-якому випадку можна розділити таку електродну систему на три частини (ділянки), довжина електрода-струмовода на кожній ділянці, інші його геометричні розміри встановлюються довільно в залежності від обраних розмірів ЕРГПК. Ескізне креслення електродної системи наведено на рис. 10.

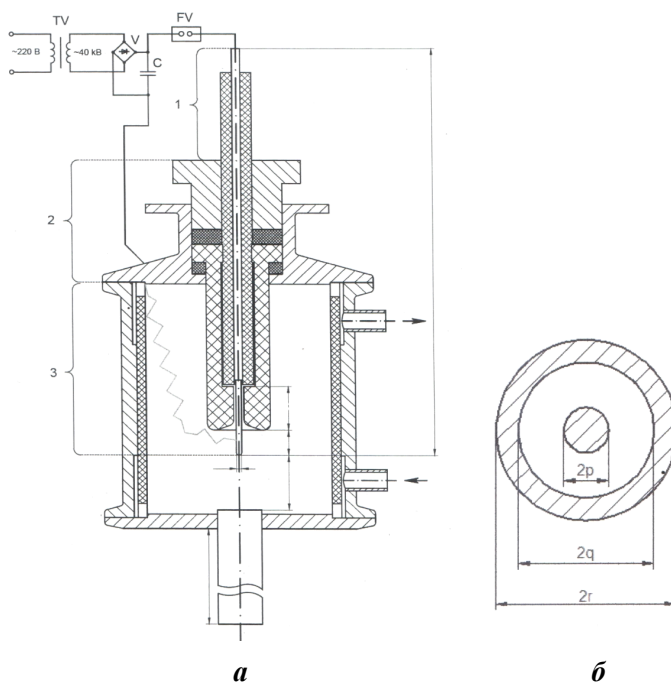


Рис. 10 . Ескізне креслення електродної системи ЕРГПК для обробки розплаву в ковші:

***а*** – подовжній переріз електродної системи;

***б*** – поперечний переріз електродної системи

Обираємо відповідні геометричні розміри ЕРГПК:

- довжина струмоводу на ділянці 1 – 126 мм;
- довжина струмоводу на ділянці 2 – 140 мм;
- довжина струмоводу на ділянці 3 – 194 мм;
- зовнішній діаметр електродної системи на ділянці 2  $2r_2 = 130$  мм;
- зовнішній діаметр електродної системи на ділянці 3  $2r_3 = 252$  мм;

- внутрішній діаметр електродної системи на ділянці 2  $2q_2 = 34$  мм;
- внутрішній діаметр електродної системи на ділянці 3  $2q_3 = 228$  мм.

### 3) Розрахунок власної індуктивності [3]

У зв'язку з тим, що обрана електродна система передбачає використання ЕРГПК, то при розрахунках власної індуктивності ( $L_\Sigma$ ) необхідно розраховувати її індуктивність на різних ділянках:

$$L_\Sigma = L_1 + L_2 + L_3.$$

На ділянці 1 (див. рис. 10) індуктивність може бути знайдена зі співвідношення, отриманого експериментально – один погонний метр стрижня, що проводить струм, має індуктивність приблизно один мкГн.

На ділянках 2, 3 індуктивність буде розраховуватись таким чином:

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[ \ln\left(\frac{q}{p}\right) + \frac{\mu}{\mu_0} \left[ \frac{r^4}{(r^2 - q^2)^2} \ln\left(\frac{r}{q}\right) - \frac{r^2}{2(r^2 - q^2)} \right] \right],$$

де  $\mu_0$  – магнітна стала;  $\mu$  – відносна магнітна проникність матеріалу ізоляції (для немагнітних матеріалів  $\mu/\mu_0 = 1$ );  $l$  – довжина відповідної частини;  $r, q, p$  – радіуси електродної системи з урахуванням камери ЕРГПК на відповідних частинах.

При обраних геометричних розмірах електродної системи індуктивність на ділянці 1 дорівнює 0,126 мкГн, на ділянці 2 – 0,062 мкГн, на ділянці 3 – 0,132 мкГн. Власна індуктивність електродної системи в цілому буде дорівнювати 0,32 мкГн.

4) *Розрахунок оптимальної довжини розрядного проміжка* [4, 5]

З точністю, достатньою для практичних цілей, на основі даних експериментів, оптимальна довжина розрядного проміжку ( $l_p$ ), при якій буде виконуватись стабільний вільний пробій рідини, розраховується таким чином:

$$l_p = 0,4 \frac{U_0}{\sqrt{A}} \sqrt[4]{L_\Sigma C},$$

де  $A$  – іскрова стала для робочої рідини (в даному випадку води технічної) дорівнює  $1 \cdot 10^5 (\text{В}^2 \cdot \text{с}^2) / \text{м}^2$ ;  $C$  – ємність блока накопичувачів енергії, Ф.

Ємність, у свою чергу, можна знайти, якщо є дані про енергію в імпульсі та робочу напругу. Для заданих початкових параметрів ємність дорівнює 0,8 мкФ, тоді довжина розрядного проміжку дорівнює 0,045 м.

5) *Розрахунок напруги перекривання ізоляції стрижня-струмовода* [6, 7]

Електрична міцність при короткочасних діях напруги характеризує здатність ізоляції протистояти їм і визначається пробивною напругою при нормованих впливах. Електрична міцність при імпульсних напругах використовується при розрахунках розмірів ізоляції (допустимі напруженості) за заданою внутрішньою комутаційною перенапругою. Перекриття – це повний пробій по межі розділу двох діелектричних середовищ. Це явище виникає в різко неоднорідному електричному полі, яке з'являється при підключенні напруги до електродної системи.

Напругу перекриття ізоляції ( $U_{nep}$ ) в рідині розраховують за емпіричною формулою:

$$U_{nep} = U_n + E_\tau l_p,$$



де  $U_n$  – напруга появи поверхневих розрядів;  $E_r$  – тангенціальна складова напруженості поля при перекриванні;  $l_p$  – довжина ділянки, що перекривається (розрядного проміжка).

Напруга появи поверхневих розрядів на циліндричному діелектрику розраховується за формулою:

$$U_n = 740 \sqrt{\frac{r_n}{\epsilon_r} \ln \frac{r_n}{r_{вн}}},$$

де  $r_n$  і  $r_{вн}$  – зовнішній та внутрішній радіуси циліндричного ізолятора;  $\epsilon_r$  – відносна діелектрична проникність матеріалу ізолятора.

Напруга появи поверхневих розрядів у даних умовах складає 71 кВ.

Максимальна напруженість електричного поля

$$E_{\max} = \frac{U_0}{l_p}.$$

Максимальна напруженість електричного поля для нашого випадку дорівнює 111 кВ/мм. Тангенціальна складова напруженості електричного поля для електродної системи типу "стрижень-площина" складає приблизно 30%, тобто 33 кВ/мм, а розрахункова напруга перекривання таким чином дорівнює 105 кВ.

*6) Вибір матеріалу стрижня-струмовода, вибір матеріалу ізолятора [2]*

Найбільшої шкоди цілісності електродної системи завдає ерозія активних поверхней розрядної зони та механічне руйнування ізоляції. При електричному розряді між двома електродами струм протікає крізь робоче середовище по каналу від-

носно невеликого перерізу, тому площини поверхонь електродів, що беруть участь у розряді, виходять малими, а густина струму – дуже великою. Механізм руйнування зводиться до топлення металу та наступного його здування з поверхні. Результати експериментальних досліджень дозволили встановити наступні головні закономірності ерозії електродів [4, 5]:

- ерозія електродів при високовольтних імпульсних розрядах залежить від типу матеріалу електродів. Метали за зменшенням ерозійної стійкості розташовані таким чином: *W, Mo, Ni, Fe, Co, Cu, Ag, Al, Zn, Pb, Cd, Sn, Bi*;

- ерозія при високовольтних імпульсних розрядах у рідині прямо пропорційна кількості енергії, що виділяється в каналі розряду;

- час роботи – в період припрацювання електродів вигорідність їх руйнування в зоні розряду вище;

- ерозія анода вища за ерозію катода.

Зараз найкращими ерозійностійкими матеріалами визнано композиції мідь-карбід вольфрам-нікель (МЛ870НЗ) і мідь-вольфрам-нікель (МВ70НЗ), але використання таких матеріалів є економічно необґрунтованим. Для виготовлення струмоведучого електроду обираємо сталь електротехнічну нелеговану – більш дешевий і відносно ерозійностійкий матеріал.

Тверда ізоляція електроду при багатократній дії імпульсної напруги й ударних навантажень піддана помітному старінню, що призводить до зниження її електричної міцності. Активаційний механізм порушення цілісності і руйнування твердих діелектриків може спостерігатися при нагріванні, електричному пробої, опромінюванні, механічному навантаженні – всі перелічені явища та дії мають місце під час електровибуху. Встановлено, що стійкість деталей ізоляторів залежить від наступних факторів [4, 7]:

- матеріалу: найкращими з випробуваних технологічно та економічно доцільних є склопластик, поліетилен, вакуумна гума;
- природи рідини: поверхневий розряд розвивається на межі розподілу твердої ізоляції і робочої рідини;
- конструктивних особливостей деталі: геометрії розташування по відношенню до струмоводів, наявність армуючих елементів і т. ін.

Враховуючи перелічені фактори, обираємо як матеріал для виготовлення ізоляції стрижня-струмовода поліетилен низького тиску.

#### *7) Розрахунок зусиль, діючих на електрод при розряді*

Особливістю і одним з основних факторів електровибуху, діючих на об'єкти обробки, є ударна хвиля, сильні гідропотоки та відбиті від стінок розрядної камери хвилі стиску-розтягування. Ці фактори діють не тільки на оброблюваний об'єкт, але і на електродну систему, що знаходиться у розрядній камері (камері ЕРГПК).

Найбільш уразливим до ударних дій елементом електродної системи є ізолятор, тому необхідно розрахувати зусилля, в першу чергу на згин, що діють на нього. Зусилля ( $F_{max}$ ) розраховують так:

$$F_{max} = P_{am} S ,$$

де  $P_{am}$  – максимальний тиск у каналі розряду;  $S$  – площа поперечного перерізу ізолятора.

Максимальний тиск у каналі розряду розраховується згідно [8] по формулі:

$$P_{am} = 0,26 \sqrt{\frac{\rho_0 U_0^2}{L_{\Sigma} l_p}} ,$$

де  $\rho_0$  – густина робочої рідини.

Умовно приймаємо поперечний переріз ізолятора суцільним (стрижень-струмовод армує ізолятор), тоді площину поперечного перерізу ізолятора можна розрахувати як

$$S = \frac{\pi d_n^2}{4}.$$

Зусилля, що діє на електродну систему, складає  $5,47 \cdot 10^6$  Н.

#### *8) Розрахунок величини скін-шару*

Скін-ефектом називають явище зменшення амплітуди електромагнітних хвиль під час їх проникнення всередину провідного середовища. В результаті виникнення цього ефекту, наприклад, перемінний струм високої частоти при протіканні по провіднику розподіляється нерівномірно за перерізом, а переважно в поверхневому шарі.

Для зменшення впливу скін-ефекту використовують провідники різноманітного перерізу: пласкі (у вигляді стрічки), трубчасті (порожні всередині), наносять на поверхню провідника шар металу з нижчим питомим опором. Срібло має найбільшу серед усіх металів електропровідність і тонкий його шар, у якому завдяки скін-ефекту тече більша частина струму, помітно впливає на активний опір провідника. Окрім того, шар сульфідів, що з'являється на поверхні срібла, не проводить струм і не задіяний у скін-ефекті, на відміну від шару окису-закису на поверхні міді, який має помітну електропровідність, та ще й до того ж із властивістю напівпровідника, що дає додаткові втрати на високих частотах. Використовується і покриття золотом, у якого шар окислів відсутній взагалі. Навпаки, покриття нікелем, оловом чи олов'яно-свинцевою лютотою здатне значно (у декілька разів) збільшити опір провідників на великих частотах. Для розрахунку скін-шару можна користуватися наступною емпіричною формулою:

$$\Delta = 503,42 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_m f}},$$

де  $\rho$  – питомий опір матеріалу провідника,  $\mu_m$  – відносна магнітна проникність матеріалу провідника;  $f$  – власна частота струму:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_\Sigma C}}.$$

У нашому випадку величина скін-шару буде біля  $5 \cdot 10^{-4}$  м.

#### 9) Розрахунок нагріву струмоводу

Перегрів струмоводів та ізоляторів електродних систем значно погіршує електричну міцність ізоляції та є одним з факторів, що зменшують їх ефективність. Процес нагріву електродної системи відрізняється своєрідністю, що зумовлена наступними характерними особливостями електричного розряду в цілому: великою амплітудою струму в імпульсі, малою тривалістю окремого розряду, складним характером зміни струму в часі, значною зміною температури нагріву за короткий проміжок часу, дискретністю теплового навантаження.

Визначити, на скільки нагріється стрижень-струмовід в результаті проходження по ньому одного імпульсу току можна з допомогою співвідношення

$$\Theta = I^2 R R_0 \left( 1 - e^{-\frac{t_u}{T}} \right),$$

де  $I$  – діюче значення імпульсу току;  $R$  – електричний опір стрижня-струмовода;  $R_0$  – тепловий опір стрижня-струмовода;  $t_u$  – час дії імпульсу;  $T$  – стала часу нагріву.

Діюче значення струму в стрижні-струмоводі визначається таким чином:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{4\pi f W}{U_0}.$$

Електричний опір стрижня-струмовода

$$R = \frac{\rho l}{S},$$

де  $\rho$  – питомий електричний опір матеріалу стрижня-струмовода;  $l$  – довжина стрижня-струмовода;  $S$  – площа поперечного перерізу стрижня-струмовода.

Тепловий опір

$$R_0 = \frac{l}{S\gamma'},$$

де  $\gamma'$  – питома теплопровідність матеріалу стрижня-струмовода.

Стала часу нагріву

$$T = c_0 R_0 \rho_m l S,$$

де  $c_0$  – питома теплоємність матеріалу стрижня-струмовода;  $\rho_m$  – густина матеріалу стрижня-струмовода.

Час дії імпульсу струму

$$t_u = \pi \sqrt{L_\Sigma C}.$$

За один розряд електрод нагрівається на  $0,04^\circ\text{C}$ .

Приймаємо, що розрядно-імпульсна технологія обробки розплаву з допомогою ЕРГПК передбачає наступний режим:

- включення – 10 хвилин;
- перерва – 10 хвилин;
- частота посилок імпульсів – 2 Гц.

За час включення протягом одного циклу буде виконано  $N$  (в цьому випадку 1200) імпульсів, таким чином передаючий струм стрижень нагріється додатково до температури навколишнього середовища на величину  $\Theta_N = \Theta N$ , тобто за 1200 розрядів електрод нагріється на 48 °С.

### *10) Розрахунок ерозійного зносу струмовода*

Стійкість електродів головним чином залежить від ерозії активних поверхонь розрядної зони і тривкості ізоляторів, що знаходяться поблизу розряду.

Густина розрядного струму в діапазоні електротехнічних параметрів сучасних розрядно-імпульсних технологій досягає значень  $13 \cdot 10^6$  А/см<sup>2</sup>. Така велика густина струму в місці контакту каналу електричного розряду зі стрижнем призводить до дуже швидкого зростання температури металу. Наприклад, температура топлення заліза досягається за 1 мкс, а температура його випаровування – за 5 мкс. Таким чином, руйнування анода має теплове походження та супроводжується виникненням плазових цівок, що складаються в тому числі з пари, частинок і крапель металу.

При конструюванні електродної системи необхідно знати час, за який виступаюча неізольована частина стрижня електрода за рахунок ерозії зменшиться до небезпечного розміру. Момент такого зменшення можна визначити, якщо розрахувати масу металу, що унесена з електроду за один розряд визначеної потужності:

$$m = \frac{k_d j_{\Pi} U_{\mathcal{E}}}{\frac{3C (T_{\Pi\Pi} - T_0) q_{\Pi\Pi}}{K_B} + q_{\text{ис}}},$$

де  $j_{\Pi}$  – інтеграл модуля розрядного струму в стрижні-струмоводі;  $U_{\mathcal{E}}$  – еквівалентний енергетичний потенціал;  $k_d$  – ко-

ефіцієнт, що враховує вплив діаметра стрижня на швидкість ерозії (для стрижнів, що мають діаметр від 5 до 10 мм, його значення 0,701);  $C$  – питома теплоємність матеріалу стрижня;  $T_{ПЛ}$  – температура топлення металу стрижня-струмовода;  $T_0$  – початкова температура навколишнього середовища;  $q_{ПЛ}$  – питома теплота топлення металу стрижня;  $q_{НС}$  – питома теплота випаровування металу стрижня;  $K_B$  – коефіцієнт викиду металу за 1 розряд (для електротехнічних сплавів дорівнює 0,055).

Розрахуємо інтеграл модуля розрядного струму:

$$j_n = 2,5CU_0 e^{-6,9\sqrt[3]{\Pi_p}},$$

де  $\Pi_p$  – критерій подібності;  $\Pi_p = \frac{Al_p^2}{U_0^2 \pi \sqrt{LC}}$ .

Для визначення кількості імпульсів, після якої потрібне регулювання розрядного проміжку, перейдемо до об'ємної оцінки ерозійного зносу, визначимо об'єм металу, що відповідає його масі, яка винесена за 1 імпульс:

$$V = \frac{m}{\rho_m}.$$

Регулювання розрядного проміжку звичайно виконують після того, як довжина електрода зменшиться на 6 мм. Тоді об'єм винесеного в процесі ерозійного руйнування металу, після досягнення якого потрібне налаштування, можна знайти з виразу:

$$V_{НС} = \frac{\pi d^3}{24} + 0,003\pi r_0^2.$$



Якщо ми знаємо об'єм кінцевої частини стрижня-струмовода, після руйнування якої виникне потреба регулювання розрядного проміжку, і об'єм металу, який винесено за один імпульс, можемо розрахувати кількість імпульсів до збільшення розрядного проміжку на 6 мм:  $n = V_{HC} / V$ . У нашому випадку приблизне число розрядів до наставання необхідності регулювання розрядного проміжку –  $1,76 \cdot 10^{11}$ .

Час роботи, після якого треба виконати регулювання, можна обчислити, якщо знаємо частоту посилянь імпульсів (2 Гц):  $t = n / f$ , у нашому випадку це складе біля  $9 \cdot 10^{10}$  с. Зрозуміло, що для технологічних цілей зручніше отриману величину показати в годинах.

Підводячи підсумок проектування електродної системи, необхідно проаналізувати результати, отримані на кожному етапі, в комплексі і зробити загальний висновок про вірність прийнятих конструкторсько-технологічних рішень.

## 7. ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. В яких випадках під час електровибухової обробки об'єктів необхідно використовувати електророзрядний генератор пружних коливань?

2. Яка принципова відмінність розрахунку індуктивності електродної системи при використанні електророзрядного генератора пружних коливань циліндричної форми від розрахунку індуктивності лінійної електродної системи?

3. Як співвідносяться внутрішній діаметр ізолятора електрода і зовнішній діаметр стрижня-струмовода?

4. Згадайте критичну довжину розрядного проміжку для лінійної протистоячої електродної системи, що працює в технічній воді.

5. Якою є нижня межа величини напруги перекривання у порівнянні з робочою напругою? Які конструктивні заходи необхідно уживати для запобігання ковзаючим розрядам по поверхні ізоляції електрода?

6. Який елемент електродної системи є найуразливішим для механічних навантажень, що виникають під час електровибуху?

7. Які заходи треба вжити, щоб раціонально використати скін-ефект, що виникає у стрижні-струмоводі?

8. З якою характеристикою матеріалу ізолятора треба порівнювати розраховану температуру нагрівання стрижня-струмовода?

9. Яке збільшення величини розрядного проміжку внаслідок ерозійного зносу вважається за критичне і потребує підлаштування довжини проміжку?

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. **Малюшевский, П. П.** Электровзрывные силовые импульсные системы [Текст] : монография / П. П. Малюшевский, Г. Г. Горovenko, А. И. Ивлиев, В. Н. Пастухов. – К. : Наук. думка, 1987. – 220 с.
2. Справочник по электротехническим материалам : в 3 т. [Текст] / под редакцией Ю. В. Корицкого и др. – М. : Энергоатомиздат, 1987.
3. **Калантаров, П. Л.** Расчет индуктивностей [Текст] : справочная книга / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
4. **Гулый, Г. А.** Научные основы разрядно-импульсных технологий [Текст] : монография / Г. А. Гулый. – К. : Наук. думка, 1990. – 208 с.
5. **Гулый, Г. А.** Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта [Текст] : монография / Г. А. Гулый, П. П. Малюшевский, Е. В. Кривицкий. – М. : Машиностроение, 1977. – 320 с.
6. **Дмитриевский, В. С.** Расчет и конструирование электрической изоляции [Текст] : учебное пособие для ВУЗов / В. С. Дмитриевский. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 392 с.
7. **Кучинский, Г. С.** Изоляция установок высокого напряжения [Текст] : монография / Г. С. Кучинский, В. Е. Кизеветтер, Ю. С. Пинталь. – М. : Атомиздат, 1987. – 472 с.
8. **Гулый, Г. А.** Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах [Текст] : монография / Г. А. Гулый, П. П. Малюшевский. – К. : Наук. думка, 1977. – 176 с.
9. **Богоявленский, К. Н.** Высокоскоростные способы прессования деталей из порошковых материалов [Текст] : монография / К. Н. Богоявленский, П. А. Кузнецов, К. К. Мертенс. – Л. : Машиностроение, 1984. – 168 с.

10. **Ушаков, В. Я.** Импульсный разряд в жидкости [Текст] : монография / В. Я. Ушаков. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ин-та, 1975. – 256 с.

11. **Найдис, И. Б.** Напряженность у неизолированной поверхности электрода, помещенного в проводящую жидкость // Электронная обработка материалов. – 1975. – № 4. – С. 81–82. – М. : Энергия, 1970.

12. **Малюшевский, П. П.** Изменение электропроводности дистиллированной воды под действием электрического взрыва [Текст] / П. П. Малюшевский, И. Н. Годованная, В. Б. Вишневский // Электронная обработка материалов. – 1981. – № 5. – С. 62–64.

13. **Малюшевский, П. П.** О влиянии высокоэнергетических разрядов в воде на удельное сопротивление рабочей среды разрядных камер [Текст] / П. П. Малюшевский, З. К. Кривицкая, В. Ф. Резцов // Журнал технической физики. – 1980. – № 11(50). – С. 2304–2306.

14. **Агаев, Р. Г.** О нагреве тела, подвергающегося воздействию мощного, концентрированного теплового источника [Текст] / Р. Г. Агаев, И. И. Бейлис // Физика и химия обраб. материалов. – 1967. – № 3. – С. 41–45.

15. **Намитоков, К. К.** Электроэрозионные явления. – М. : Энергия, 1978. – 456 с.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ .....                                                                                                              | 3  |
| 1. Блок-схема технологічного обладнання розрядно-імпульсних технологій .....                                             | 4  |
| 2. Основні фактори, що діють на об'єкти обробки в полі електричного розряду .....                                        | 6  |
| 3. Склад і класифікація елементів розрядно-технологічного блока .....                                                    | 8  |
| 4. Короткі відомості про електророзрядний генератор пружних коливань .....                                               | 13 |
| 5. Зміна властивостей робочої рідини під впливом електричних розрядів .....                                              | 23 |
| 6. Приклад проектування електродної системи для реалізації розрядно-імпульсної технології обробки розплаву в ковші ..... | 29 |
| 7. Питання для самоконтролю .....                                                                                        | 43 |
| Рекомендована література .....                                                                                           | 44 |