

Класифікація форм імпульсів для контактного мікрозварювання

Бондаренко О. Ф., к.т.н., доц., ORCID [0000-0002-4276-1145](https://orcid.org/0000-0002-4276-1145)
e-mail bondarenkoaf@gmail.com

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua
Київ, Україна

Реферат—Представлено аналіз електрофізичних процесів, що відбуваються в зварювальному контакті під час контактному мікрозварювання. Проведено огляд відомих форм електричних імпульсів, що використовуються в контактному мікрозварюванні. Дана стисла характеристика імпульсів різних форм та проведено їх порівняння з точки зору забезпечення високої якості зварних з'єднань. На основі проведеного огляду форм імпульсів та з урахуванням особливостей електрофізичних процесів в зварювальному контакті виокремлено найбільш суттєві класифікаційні ознаки для зварювальних імпульсів. Створено класифікаційну схему різновидів зварювальних імпульсів, що використовуються в контактному мікрозварюванні, та запропоновано приклад її застосування.

Бібл. 30, рис. 8.

Ключові слова — контактне мікрозварювання; зварювальний імпульс; формування електричних імпульсів; класифікація.

I. ВСТУП

Контактне мікрозварювання є ефективним способом нероз'ємного з'єднання мініатюрних металевих деталей. На даний час воно широко використовується в електроніці, прецизійному приладобудуванні, при виготовленні медичних інструментів та ін. Залежно від матеріалів і товщини зварюваних деталей, конкретних технологічних умов та використовуваного обладнання контактне мікрозварювання може бути реалізоване різними за формою електричними імпульсами.

Форма зварювальних імпульсів є одним з найбільш визначних факторів, що впливають на отримувану якість зварних з'єднань. Правильний підбір форми зварювальних імпульсів для конкретних умов зварювання здатний забезпечити відсутність таких поширених дефектів, як виплески металу, прожоги або непровари.

Тому в умовах реального виробництва при модернізації ліній, що включають зварювальні операції, освоєнні нових зварних конструкцій або застосуванні нових зварюваних матеріалів доцільним є проведення попередніх експериментів з підбору оптимальної форми зварювальних імпульсів. Такі експерименти можуть проводитись як в науково-дослідних лабораторіях з контактного мікрозварювання спеціалізованих інститутів, так і у відповідних підрозділах виробництв із застосуванням зварювального обладнання, що дозволяє програмувати й відтворювати форму зварювальних імпульсів в широкому діапазоні.

Проте необхідно відзначити, що для реалізації таких експериментів на даному етапі бракує систематизованої інформації, яка б максимально повно представляла наявні знання щодо впливу форми електричних імпульсів на якість зварювання і, таким чином, змогла б допомогти технологам зі зварювання обґрунтовано здійснити підбір параметрів зварювальних імпульсів для конкретних умов зварювання.

Метою даної роботи є створення класифікації відомих форм електричних імпульсів, що застосовуються в контактному мікрозварюванні, за найбільш суттєвими ознаками, використання якої зробить більш зручним процес попереднього визначення режимів зварювання.

Досягнення означеної мети передбачає виконання наступних завдань:

- аналіз електрофізичних процесів в зварювальному контакті впродовж зварювання;
- огляд та аналіз відомих форм зварювальних імпульсів;
- виокремлення найбільш суттєвих ознак, які характеризують форму електричних імпульсів, що застосовуються в контактному мікрозварюванні.

II. АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ЗВАРЮВАЛЬНОМУ КОНТАКТІ

Контактне зварювання реалізується в результаті короткочасного нагріву зварюваних деталей електричним струмом і їх пластичної деформації зусиллям стиснення зварювальних електродів [1-7].



На рис. 1 умовно представлені стиснуті електродами зварювані деталі, що контактують.

Кількість теплоти, що виділяється в зоні зварювання між електродами за час зварювання в результаті проходження електричного струму, розраховується за законом Джоуля-Ленца [1, 3, 6, 8]:

$$Q_{33} = \int_0^{t_{33}} i_{33}^2(t) \cdot r_{33}(t) dt, \quad (1)$$

де Q_{33} – кількість теплоти, що виділяється в зоні зварювання між електродами за час зварювання t_{33} ; $i_{33}(t)$ – миттєве значення зварювального струму на інтервалі зварювання від 0 до t_{33} ; $r_{33}(t)$ – миттєве значення загального опору зони зварювання на інтервалі зварювання від 0 до t_{33} .

З формули (1) видно, що закони зміни в часі зварювального струму та активного опору зони зварювання є найбільш важливими чинниками, які впливають на процес зварювання.

Опір зони зварювання є величиною, яка складається з кількох компонент і може бути описана наступною формулою [8-13]:

$$r_{33}(t) = r_{E1D1}(t) + r_{D1}(t) + r_{DD}(t) + r_{D2}(t) + r_{E2D2}(t), \quad (2)$$

де r_{E1D1} та r_{E2D2} – контактні опори електрод-деталь; r_{DD} – контактний (перехідний) опір деталь-деталь; r_{D1} та r_{D2} – власні опори матеріалів деталей.

При цьому зміна опорів, що входять до (2), в свою чергу, відбувається за різними та доволі складними законами. Криві, які умовно представляють зміну складових опорів зони зварювання представлені на рис. 2.

При початковому стисненні зварюваних деталей електродами до подачі електричного струму контакт

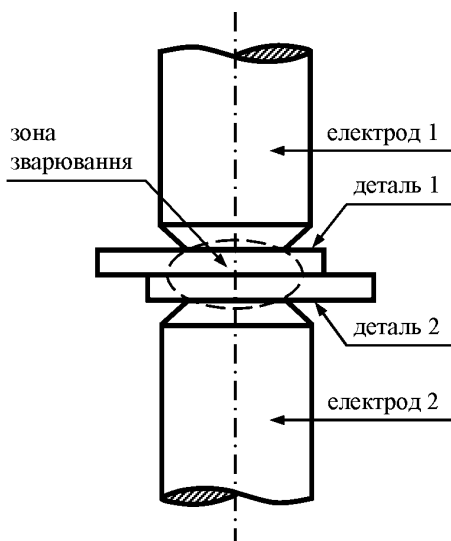


Рис. 17 Контактне зварювання деталей

утворюється тільки в окремих точках торкання мікронерівностей на поверхнях деталей [1, 3, 8, 14-16]. Початкові значення опорів r_{DD} , r_{ED} і r_{33} залежать від способу і якості попередньої обробки поверхонь деталей (механічної, хімічної, термічної), тривалості та умов їх зберігання після обробки до зварювання, сили стиснення електродів, твердості зварюваних матеріалів, якості контактної поверхні електродів (шорсткості, наявності оксидних плівок та забруднень) [1, 2, 11, 12, 14, 17].

На початку зварювання лінії струму стягуються до точок контактування деталей з електродами та між собою, що призводить до підвищення температури в цих місцях і зростання опорів r_{DD} та r_{ED} [1, 3, 7, 15]. Далі, в результаті пробію оксидних поверхневих плівок і змінання мікронерівностей поверхонь площі контактування збільшуються, а опори r_{DD} та r_{ED} зменшуються. Швидкість зниження опорів r_{DD} , r_{ED} і r_{33} на початковій стадії процесу зварювання залежить від температури плавлення та товщини оксидної плівки на поверхнях деталей та електродів, зусилля стиснення електродів та інтенсивності нагріву (швидкості досягнення зварювальним струмом амплітудного значення). З підвищенням температури плавлення та зусилля стиснення електродів швидкість зниження вказаних опорів зменшується, а зі збільшенням товщини оксидних плівок й інтенсивності нагріву – збільшується.

Після утворення в місці контакту деталей рідкого прошарку опір r_{DD} стає рівним нулю. Час утворення первинного контакту t_K , за який r_{DD} знижується до нуля, становить $\approx 0,5 - 5$ мс при загальній тривалості зварювання в кілька десятків мілісекунд [1, 3, 8].

Власні опори деталей r_{D1} і r_{D2} з підвищенням температури в контакті збільшуються у зв'язку зі зростанням питомого електричного опору матеріалів зварюваних деталей при протіканні струму.

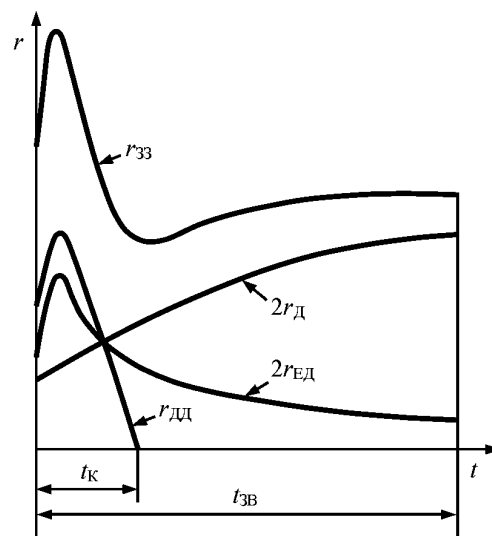


Рис. 18 Зміна опору зони зварювання та його складових

Після зникнення контактного опору деталь-деталь $r_{дд}$, характер подальшої зміни загального опору зони зварювання $r_{зз}$ визначається переважно зміною при нагріванні власних опорів зварюваних деталей $r_{д1}$ і $r_{д2}$. Значення $r_{Ед}$ після зникнення $r_{дд}$ зменшується несуттєво.

Чим меншою є товщина зварюваних деталей, тим більшими є значення опорів $r_{дд}$, $r_{Ед}$ і $r_{зз}$ [3]. Крім того, зі зменшенням товщини деталей різко зростає відношення контактних опорів $r_{дд}$, $r_{Ед}$, а значить і сумарного опору $r_{зз}$ до власного опору деталей $r_{д}$ [3]. Власний опір деталей $r_{д}$ є дуже малим і за даними [13, 18] не перевищує 5 % від $r_{зз}$. Це свідчить про те, що на процес утворення з'єднання значним чином впливають стабільність контактний опору між зварюваними деталями $r_{дд}$, а також перехідних контактних опорів електрод-деталь $r_{Ед}$ [1, 3, 19-21].

Контактне мікрозварювання, до якого відносять з'єднання мініатюрних деталей малої товщини і малого перетину (від кількох мікрметрів до 0,5 мм), займає особливе місце в області контактний зварювання [1, 7]. Для мікрозварювання характерним є скорочення процесу утворення з'єднання, тривалість якого може складати кілька мілісекунд або навіть десяті долі мілісекунди.

Найбільш критичною стадією процесу контактний мікрозварювання, з точки зору отримання високої якості зварних з'єднань, є початкова стадія, у зв'язку з первинною розбіжністю компонентів опору зони зварювання $r_{зз}$ і складними законами їх зміни [1, 15, 22-25]. Поширеним дефектом зварювання, що утворюється саме на цій стадії, є виплеск розплавленого металу в зоні контакту внаслідок його різкого перегріву. Основною причиною цього дефекту є неузгодженість форми зварювальних імпульсів з електрофізичними процесам, що відбуваються в зварювальному контакті на початковій стадії [15].

Оскільки електрофізичні процеси в контакті під час зварювання, як було показано вище, є дуже складними і важко піддаються математичному описанню, велике значення мають попередні експерименти з метою емпіричного підбору оптимальної для конкретних умов форми зварювальних імпульсів.

Далі буде зроблено огляд та аналіз відомих форм зварювальних імпульсів, що використовуються для реалізації контактний мікрозварювання.

III. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ВІДОМИХ ФОРМ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ІМПУЛЬСІВ

В найпростіших випадках, коли єдиним важливим показником якості зварювання вважається надійність з'єднань, формі зварювальних імпульсів не надається багато уваги. Імпульси формуються здебільшого за допомогою розрядно-конденсаторних структур, при

цьому їх форма в процесі зварювання є нерегульованою і визначається параметрами застосовуваних енергонакопичувачів [1, 15, 26-29]. До нерегульованих відносяться імпульси постійного струму, амплітуда яких не формується певним чином в часі, та імпульси змінного струму, утворені немодульованими коливаннями.

Якщо окрім надійності з'єднань мають значення інші показники якості зварювання, зокрема відсутність виплесків та інших дефектів зварної точки, застосовують зварювальні імпульси з регульованою формою [1, 15, 26-29]. Особливо це стосується саме контактний мікрозварювання, оскільки воно використовується по відношенню до тонких деталей відповідального призначення. Тож дефекти з'єднань у вигляді виплесків можуть значною мірою впливати на роботу пристроїв, в яких встановлюються ці деталі, і тому є неприпустимими.

Амплітуда регульованих імпульсів формується за певним законом, який задля плавного введення енергії в контакт передбачає поступове наростання на етапі фронту, нерідко — поступовий спад, а в окремих випадках — формування вершини [15, 26-29].

Зустрічаються відомості про регулювання зварювального струму, напруги на електродах, потужності струму та одночасне регулювання кількох електричних параметрів [1, 15, 30]. Найбільш освоєним на даний час є регулювання струму. Регулювання потужності та кількох параметрів одночасно розширює можливості для більш повного врахування електрофізичних процесів в контакті, проте воно є доволі складним і застосовується у випадках, коли необхідно досягти винятково високої якості з'єднань [1, 15].

Є дані про використання регульованих імпульсів з формуванням тільки фронту, з формуванням фронту і спаду та з формуванням всіх ділянок включно з вершиною [15]. При цьому застосовуються різні закони формування, які можуть відстежуватись шляхом зворотних зв'язків. Найбільш поширеним є зварювання імпульсами з лінійним та експонентним законом зміни фронту або фронту та спаду, що обумовлюється простотою їх технічної реалізації [1, 15]. Проте використовуються й квадратичний закон, закон зі ступенем три та інші, які здатні забезпечити вищу якість зварних з'єднань в конкретних умовах [1, 15]. Згладжування фронту забезпечує більш спокійне формування зварного з'єднання і запобігає виплескам металу [1, 15]. Згладжування спаду сприяє плавному охолодженню зони зварювання і забезпечує від утворення усадкових порожнин в зварному ядрі. Формування вершини використовується в окремих випадках. Зазвичай для здійснення нормального зварювання електричні параметри імпульсу на інтервалі вершини підтримують на постійному рівні.

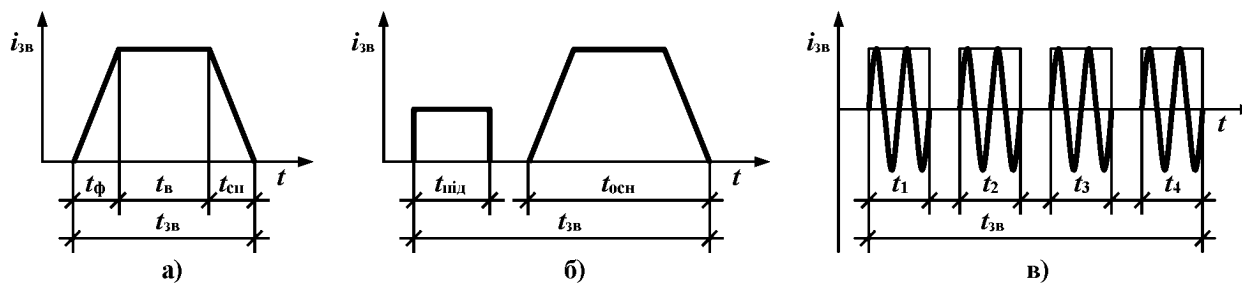


Рис. 19 Одиничний імпульс (а) та імпульсні послідовності (б, в)

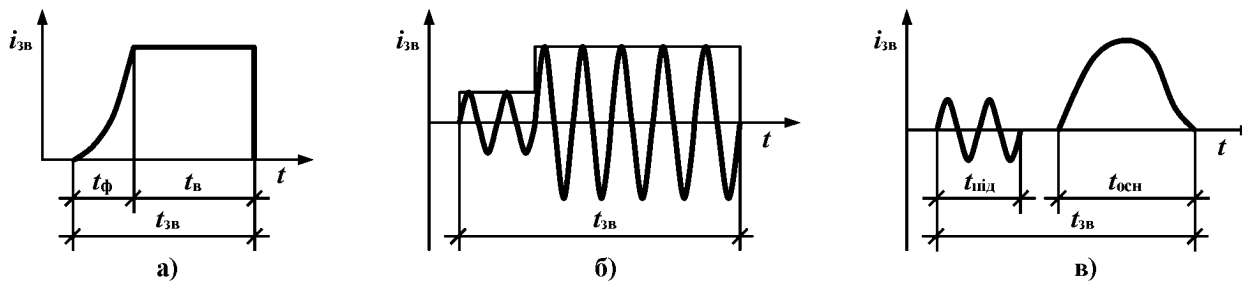


Рис. 20 Імпульс постійного струму (а), змінного струму (б) та комбінований імпульс (в)

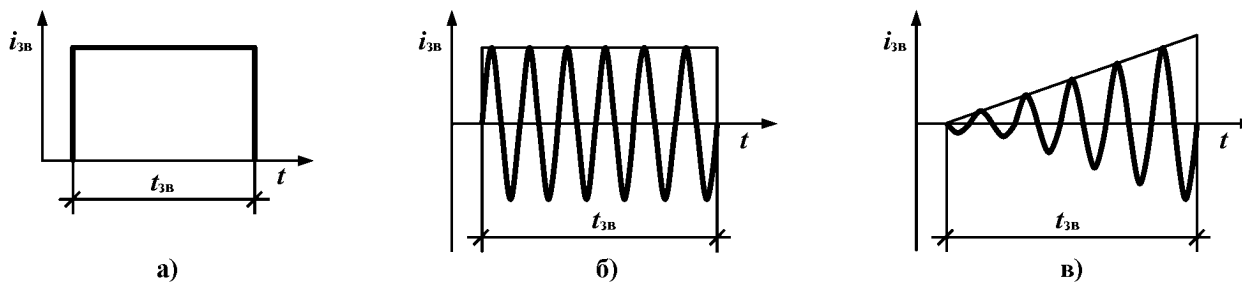


Рис. 21 Нерегульовані імпульси (а, б) та регульований імпульс (в)

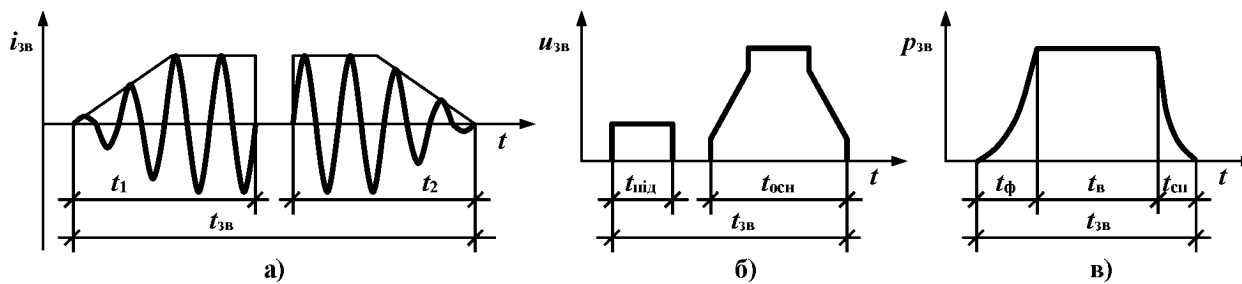


Рис. 22 Імпульс з регульованим струмом (а), напругою (б), потужністю (в)

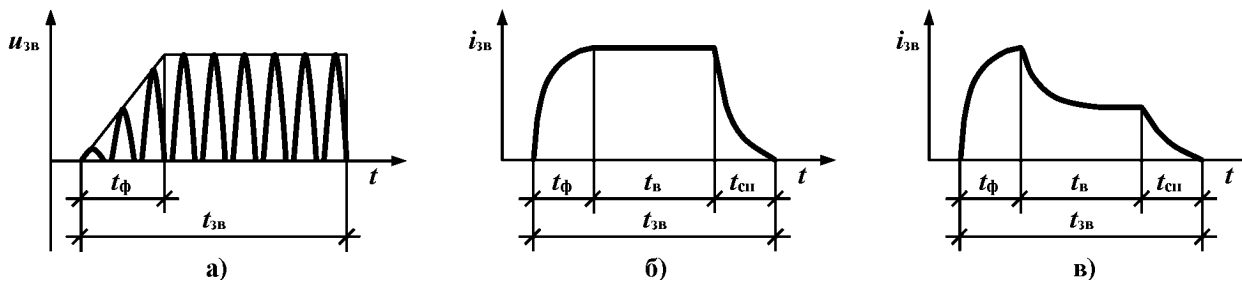


Рис. 23 Імпульс з формуванням фронту (а), фронту і спаду (б), всіх ділянок (в)

Загалом, регульовані імпульси здатні забезпечити вищу якість зварних з'єднань, але складність полягає в підборі необхідного закону регулювання для конкретних умов зварювання. Крім того реалізація таких імпульсів безперечно потребує використання більш складного електронного обладнання.

Слід зазначити, що ефекту, подібного до того, який дає формування різних ділянок одиночного зварювального імпульсу, можна досягти шляхом використання для створення однієї зварної точки імпульсних послідовностей, які, в свою чергу, можуть включати як регульовані, так і нерегульовані імпульси [1, 15, 26].

При використанні одиночного зварювального імпульсу усі процеси формування з'єднання відбуваються в єдиному циклі впродовж дії цього імпульсу. При використанні групи імпульсів електрофізичні процеси розподіляються за циклами. В імпульсній послідовності зазвичай виділяють підігрівальні, основні та проковувальні імпульси. Попередній підігрівальний імпульс знижує нестабільність тепловиділення в зварювальному контакті та зменшує ймовірність перегріву металу, який спричинює виплески [1, 8], його дія подібна до згладжування

фронту одиночного зварювального імпульсу. Використання проковувального імпульсу є подібним до згладжування спаду одиночного зварювального імпульсу. На етапі охолодження зварного ядра проковувальний імпульс запобігає утворенню в ньому усадкових порожнин [1].

Необхідно додати також, що як регульовані, так і нерегульовані зварювальні імпульси можуть бути змінного або постійного струму [1, 15, 26]. Відомо також про використання комбінованих імпульсів. Найширше застосування мають зварювальні імпульси змінного струму, що пояснюється більш високим рівнем розвитку перетворювачів змінного струму для зварювання на певному етапі. Проте використання імпульсів постійного струму з регульованою амплітудою здатне в більшій мірі врахувати електрофізичні процеси в контакті і, відповідно, забезпечити більш високу якість з'єднання [1, 15, 26]. Комбіновані імпульси являють собою імпульсну послідовність, яка містить як імпульси постійного струму, так і імпульси змінного струму. Зварювання комбінованими імпульсами не є широко використовуваним і відоме тільки як експериментальні спроби [1, 24].

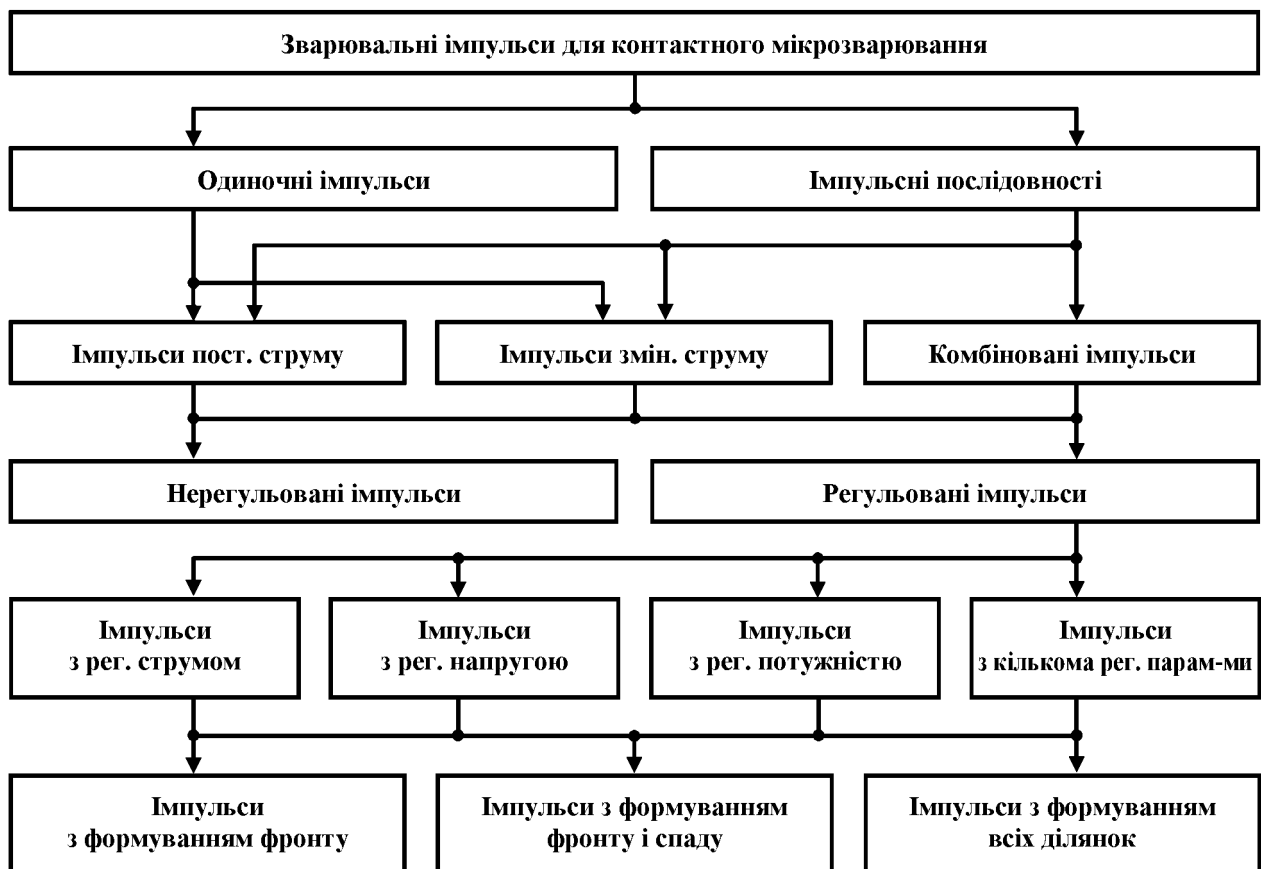


Рис. 24 Класифікаційна схема різновидів зварювальних імпульсів

Приклади імпульсів різних форм, що були описані вище, наведені на рис. 3-7, де скороченнями позначені наступні параметри: t_{se} – тривалість зварювання, t_{ϕ} – тривалість фронту імпульсу, t_e – тривалість вершини імпульсу, t_{cn} – тривалість спаду імпульсу, t_{ocn} – тривалість основного імпульсу, t_{nid} – тривалість підігрівального імпульсу.

IV. ВИОКРЕМЛЕННЯ КЛАСИФІКАЦІЙНИХ ОЗНАК ЗВАРЮВАЛЬНИХ ІМПУЛЬСІВ

Грунтуючись на проведеному огляді та аналізі відомих форм імпульсів для реалізації контактної мікрозварювання, а також з урахуванням описаних особливостей електрофізичних процесів в зварювальному контакті, можна виділити наступні ознаки, що характеризують форму зварювальних імпульсів, які представляються найбільш суттєвими:

- кількість імпульсів, що використовується для зварювання однієї точки;
- рід струму;
- наявність регулювання параметрів імпульсу;
- параметри імпульсу, що регулюються;
- ділянки імпульсу, що формуються.

За кількістю імпульсів, використовуваних для зварювання однієї точки, можна виділити *одиначні імпульси* та *імпульсні послідовності*.

За родом струму зварювальні імпульси можна розподілити на *імпульси змінного струму*, *імпульси постійного струму* та *комбіновані імпульси*.

За наявністю регулювання параметрів імпульсу можна виокремити *нерегульовані* та *регульовані імпульси*.

За параметрами імпульсу, що регулюються, можна виділити *імпульси з регульованим струмом*, *з регульованою напругою*, *з регульованою потужністю* та *імпульси з кількома регульованими параметрами*.

За ділянками імпульсу, що формуються, варто виділити *імпульси з формуванням фронту*, *з формуванням фронту і спаду* та *з формуванням всіх ділянок*.

На рис. 8 наведено наочну класифікаційну схему відомих різновидів імпульсів, що використовуються для контактної мікрозварювання, розподілених відповідно до виокремлених класифікаційних ознак.

Необхідно підкреслити, що в класифікації фігурують тільки імпульси, відомості про реальне використання яких було знайдене в джерелах. При цьому імпульси, теоретичне використання яких є можливим, не розглядалися.

Користуючись представленою класифікаційною схемою, можна зробити наступні рекомендації для реалізації контактної мікрозварювання високої якості.

З огляду на дуже малу тривалість процесу контактної мікрозварювання більш доцільним видається

використання одиночних зварювальних імпульсів з обов'язковим регулюванням їх параметрів.

Оскільки застосування постійного струму надає можливість для більш точного регулювання параметрів зварювальних імпульсів, саме йому доцільно віддати перевагу у випадку контактної мікрозварювання.

При регулюванні потужності можна врахувати особливості зміни опору зони зварювання, а одночасне регулювання кількох параметрів, (наприклад, потужності і напруги на електродах) надає ще більше можливостей для їх узгодження з електрофізичними процесами в контакті, тому саме ці два різновиди регульованих імпульсів можна рекомендувати для реалізації контактної мікрозварювання.

В загальному випадку для реалізації контактної мікрозварювання доцільним і достатнім є формування фронту і спаду зварювальних імпульсів.

ВИСНОВКИ

Огляд відомих форм імпульсів, що використовуються для контактної мікрозварювання, а також аналіз електрофізичних процесів в зварювальному контакті дозволив виокремити найбільш суттєві ознаки, що характеризують форму зварювальних імпульсів, та створити на їх основі класифікаційну схему, яка наочно представляє всі відомі на сьогоднішній день різновиди імпульсів.

Представлена класифікаційна схема може бути корисною при проведенні попереднього експериментального підбору оптимальної форми зварювальних імпульсів для конкретних умов зварювання як в науково-дослідних лабораторіях, так і на виробництві. Зокрема, на основі запропонованої класифікації може бути створена автоматизована комп'ютерна система з підбору параметрів та форми імпульсів за заданими характеристиками зварюваних деталей.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] V. E. Ataush; V. P. Leonov; E. G. Moskvina, Micro welding in instrument making, Riga: RTU, 1996.
- [2] M. D. Banov, Tekhnologiya i oborudovanie kontaktnoi svarki [Technology and equipment of resistance welding], 3rd ed. ped., Moscow: Izdatelskii tsentr "Akademiia", 2008.
- [3] K. A. Kochergin, Kontaktnaia svarka [Resistance welding], Leningrad: Mashinostroenie, 1987.
- [4] A. Klimov; I. Smirnov; A. Kudinov; G. Kudinova, Osnovy tekhnologii i postroeniia oborudovaniia dlia kontaktnoi svarki [Fundamentals of technology and construction of resistance welding equipment], Saint Petersburg: Lan, 2011.
- [5] B. E. Paton; V. K. Lebedev, Elektrooborudovanie dlia kontaktnoi svarki. Elementy teorii [Electrical equipment for resistance welding. Theory elements], Moscow: Mashinostroenie, 1969.
- [6] B. D. Orlov; A. A. Chakalev; Yu. V. Dmitriev; A. L. Marchenko; V. A. Sidiakin, Tekhnologiya i oborudovanie kontaktnoi svarki [Technology and equipment of resistance welding], 2nd ed. ped., Moscow: Mashinostroenie, 1986.
- [7] S. F. Gnyusov; A. S. Kiselev; M. S. Slobodyan; B. F. Sovetchenko; M. M. Nekhoda; A. V. Srukov; P. M. Yurin, "Formation of a joint in resistance spot microwelding," *Welding*



- International*, vol. 19, no. 9, pp. 737-741, September 2005. DOI: [10.1533/wint.2005.3510](https://doi.org/10.1533/wint.2005.3510)
- [8] V. E. Moravskii; D. S. Vorona, *Tekhnologіia i oborudovanie dlia tochechnoi i relefnoi kondensa-tornoi svarki* [Technology and equipment of spot and projection resistance welding], Kyiv: Naukova dumka, 1985.
- [9] M. Chin; K. A. Iyer; S. J. Hu, "Prediction of Electrical Contact Resistance for Anisotropic Con-ductive Adhesive Assemblies," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 27, no. 2, pp. 317-326, June 2004. DOI: [10.1109/TCAPT.2004.828565](https://doi.org/10.1109/TCAPT.2004.828565)
- [10] E. Karakas, "Method and Device to Obtain Information to Evaluate the Quality of a Resistance Welding Connection and/or to Control or Regulate a Resistance Welding Method". USA Patent US 2006157452, 20 July 2006.
- [11] U. Polis; V. Ataush, «Vliianie iskhodnykh soprotivlenii na elektricheskie parametry tochechnoi svarki [The influence of initial resistances on electrical parameters of spot welding],» in *Metināšana: Tehnologija, iekārtas, materiāli: Starptautiskā konference*, Riga, 1997.
- [12] M. S. Slobodian, «Srovnitelnyi analiz metodov rascheta znachenii nachalnykh soprotivlenii tsepi elektrodov pri kontaktnoi tochechnoi svarkе The comparative analysis of calculation methods of initial resistances of electrode-electrode circuit in spot resistance welding],» *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, vol. 315, no. 2, pp. 162-166, 2009. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/2829>
- [13] A. V. Filippov; Ya. A. Rudzit, «Analiz raschetnykh zavisimostei dlia opredeleniia iskhodnogo kontaktnogo soprotivleniia sochetaniia provoloka-plastina [The analysis of theoretical dependencies for defining the initial contact resistance of the pair "wire and plate"],» in *Metināšana: Tehnologija, iekārtas, materiāli: Starptautiskā konference*, Riga, 1997.
- [14] U. Polis, "Influence of Surface Parameter upon the Initial Contact Resistance of Metal Plates in Mi-crowelding," in *Metināšana un radnieciskas tehnologijas: starptautiskais seminārs*, Riga, 1996.
- [15] O. F. Bondarenko, "Formuvachi Impulsv strumu dlia ustanovok kontaktnogo mikrosvarivannia [The formers of current pulses for micro resistance welding equipment]," Donetsk, 2008.
- [16] E. Bumbieris и U. Polis, «O voznikovenii nachalnogo elektricheskogo kontakta pri tochechnoi mikrosvarke plastinok [About initial electrical contact appearance in micro resistance spot welding of plates],» in *Metināšana. Tehnologija, iekārtas, materiāli, radnieciskās tehnologijas: III starptautiskā konference*, Riga, 1999.
- [17] H. Zhang; J. Senkara, *Resistance Welding: Fundamentals and Applications*, Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2006. ISBN: [9780849323461](https://doi.org/10.1080/9780849323461)
- [18] A. V. Filippov; Ya. A. Rudzit; V. E. Ataush, «Raschet iskhodnogo kontaktnogo soprotivleniia soedineniia provoloka-plastina pri kontaktnoi mikrosvarke [The calculation of initial contact re-sistance of the pair "wire and plate" in micro resistance welding],» *Svarochnoe Proizvodstvo*, no. 5, pp. 17-20, 2000.
- [19] U. Yu. Polis; Ya. A. Rudzit; V. E. Ataush, «Raschet iskhodnogo kontaktnogo soprotivleniia pri tochechnoi kontaktnoi mikrosvarke [The calculation of initial contact resistance in micro resistance spot welding],» *Svarochnoe Proizvodstvo*, no. 1, pp. 24-28, 2000.
- [20] M. S. Slobodian, «Improvement of the quality of E110 zirconium alloy joints made by small scale resistance spot welding,» Barnaul, 2009. DOI: [10.13140/RG.2.2.27534.77128](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27534.77128)
- [21] S. F. Gnyusov; A. S. Kiselev; M. S. Slobodyan; B. F. Sovetchenko, «Stabilizatsiia kontaknykh soprotivlenii pri tochechnoi mikrosvarke [The stabilization of contact resistances in micro spot weld-ing],» *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, vol. 309, no. 1, pp. 130-133, 2006. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/1009>
- [22] V. Ataush; D. Kvasnevskii, «Issledovanie protessa tochechnoi kontaktnoi mikrosvarki krestoobraznykh soedinenii nikelovykh provolok s avtoregulirovaniem protessa po padeniiu napriazheniia mezhdru elektrodami i svarochnomu toku [The investigation of micro resistance spot welding of,» in *Metināšana. Tehnologija, iekārtas, materiāli, radnieciskās tehnologijas: III starptautiskā konference*, Riga, 1999.
- [23] V. E. Ataush; V. P. Leonov, «Razrabotka upravliaemykh istochnikov pitaniia dlia kontaktnoi mikrosvarki [The development of controlled power supplies for micro resistance welding],» in *Metināšana un radnieciskas tehnologijas: starptautiskais seminārs*, Riga, 1996.
- [24] V. E. Ataush, «Upravliaemye istochniki pitaniia dlia kontaktnoi mikrosvarki [Controlled power supplies for micro resistance welding],» *Svarochnoe Proizvodstvo*, no. 6, pp. 29-30, 1995.
- [25] Yu. V. Bondarenko; V. M. Sydorets; O. F. Bondarenko, «Avtomatizirovannaiia sistema zadaniia parametrov svarochnykh impulsov dlia ustanovok kontaktnoi mikrosvarki [Automated system of specifying the parameters of welding pulses for micro resistance welding equipment],» in *6th International Conference "Mathematical modelling and Information Technologies in Welding and Related processes"*, Kyiv, 2012.
- [26] Yu. E. Paerand; Yu. V. Bondarenko; O. F. Bondarenko, «Formirovateli impulsov toka dlia kontaktnoy svarki [The formers of current pulses for resistance welding],» *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, no. 3(75), pp. 25-30, 2008. URL: http://www.tkea.com.ua/tkea/2008/3_2008/st_06.htm
- [27] Y. Zhou, *Microjoining and nanojoining*, 1st ed. ed., Cambridge: Woodhead Publishing Ltd. CRC Press, 2008, p. 832. ISBN: [9781845691790](https://doi.org/10.1533/9781845691790)
- [28] "Fundamentals of Small Parts Resistance Welding," Amada Miyachi America, Inc, January 2013. [Online]. Available: http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?rURL=%2Fapex%2FEducationalResources_Fundamentals&file=01530000000Jybm.
- [29] V. K. Lebedev; A. A. Pismenny, «Power systems of resistance welding machines,» *The Paton Welding Journal*, т. 584, № 11, pp. 28-32, November 2001. URL: <http://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2001/tpwj200111all.pdf>
- [30] J. Brown; J. Lin, "Power supply designed for small-scale resistance spot welding," *Welding journal*, vol. 84, no. 7, pp. 32-36, 2005. URL: https://app.aws.org/wj/2005/07/WJ_2005_07.pdf

Надійшла до редакції 05 липня 2017 р.



УДК 621.314: 621.311.6

Классификация форм импульсов для контактной микросварки

Бондаренко А. Ф., к.т.н., доц., ORCID [0000-0002-4276-1145](https://orcid.org/0000-0002-4276-1145)e-mail bondarenkoaf@gmail.com

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» kpi.ua

Киев, Украина

Реферат—Представлен анализ электрофизических процессов, происходящих в сварочном контакте в ходе контактной сварки. Проведен обзор известных форм электрических импульсов, используемых в контактной микросварке. Дана краткая характеристика импульсов различных форм и проведено их сравнение с точки зрения обеспечения высокого качества сварных соединений. На основе проведенного обзора форм импульсов и с учетом особенностей электрофизических процессов в сварочном контакте выделены наиболее существенные классификационные признаки для сварочных импульсов. Создана классификационная схема разновидностей сварочных импульсов, используемых в контактной микросварке, и предложен пример ее применения.

Библ. 30, рис. 8.

Ключевые слова — контактная микросварка; сварочный импульс; формирование электрических импульсов; классификация.

UDC 621.314: 621.311.6

Classification of pulse shapes for micro resistance welding

O. F. Bondarenko, k.t.n., doc., ORCID [0000-0002-4276-1145](https://orcid.org/0000-0002-4276-1145)e-mail bondarenkoaf@gmail.comNational Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract—The paper is devoted to the problem of systematization of the information concerning the applying different shapes of electrical pulses for micro resistance welding implementation. The relevance of the problem is explained by direct dependency of welded joints quality on welding pulse shape appropriateness. The aim of the paper is to create the classification of known pulse shapes applied in micro resistance welding using the most substantial criteria. To achieve the stated aim, first, the analysis of electrophysical processes taking place in welding contact during resistance welding was carried out. Under the analysis, the complicated character of welding area resistance change during the welding process was shown and explained, and the most important factors affecting the obtained quality of welded joints were specified. As a result of the carried out analysis, the importance of matching the welding pulse shape with the electrophysical processes in welding contact was proved. Further, the overview of known shapes of electrical pulses applied in micro resistance welding was done. In the overview, different shape pulses, including single pulses and pulse groups, unregulated and regulated pulses, alternating current and direct current pulses, were shortly characterized and compared in terms of providing high quality welded joints. The reasons of applying certain pulse forms were explained in the overview as well. Next, based on the overview of pulse shapes and considering the particularities of electrophysical processes in welding contact, the most substantial classification criteria for welding pulses were highlighted. Using these criteria, the descriptive classification diagram of welding pulses variety known in micro resistance welding was created and the example of its applying was suggested. The developed classification diagram is recommended to use for preliminary defining the optimal welding modes under the specific conditions.



Ref. 30, fig. 8.

Key words — micro resistance welding; welding pulse; electrical pulse shaping; classification.