

ДИНАМІКА КОНТАКТУ МІЖ ДЕТАЛЯМИ, ЩО ЗВАРЮЮТЬСЯ, ПРИ КОНДЕНСАТОРНОМУ ПРИВАРЮВАННІ ШПИЛЬОК

Д.М. Калеко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, Україна, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: dk1718@gmail.com
 Обов'язковою умовою отримання міцного з'єднання при конденсаторному приварюванні шпильок є надійне збудження дугового розряду конденсаторів, для чого слугує тонкий виступ на кінці шпильки, що приварюється. Джерело його нагрівання, особливо початкова стадія, є предметом дискусії. Це стосується, головним чином, розуміння ролі контактної електричної опору між деталями та його трансформації. Результати експериментів, проведених на двох апаратах, що відрізняються електричними характеристиками розрядного контура, дозволили визначити роль енергетичних параметрів початкової стадії розряду конденсаторів і вплив хімічного складу матеріалу деталей, що зварюються, на зміну фізичного стану зони приварювання (контакту між деталями). Умови зварювання можуть спричинити два різні стани: утворення металевого зв'язку виступу на шпильці та листа або мікродугового проміжку. При малій індуктивності розрядного контура та пов'язаної з цим підвищеної швидкості наростання розрядного струму в усіх випадках контакт деталей переходить у мікродуговий проміжок. Таким чином, у залежності від характеристик розрядного контура подальше нагрівання виступу аж до локального його руйнування зі збудженням зварювальної дуги може відбуватися шляхом джоулевого нагрівання або нагрівання двома одночасно діючими джерелами – тепловиділенням у виступі від струму, що по ньому проходить, і теплопередачу від торця виступу, який нагрівається дугою. У другому режимі поверхня деталі, до якої приварюється шпилька, очищується від можливих забруднень і декоративних електропровідних покриттів, створюючи умови для отримання високоякісного зварного з'єднання. Бібліогр. 15, табл. 2, рис. 10.

Ключові слова: приварювання шпильок, розряд конденсаторів, збудження електричної дуги, мікродуговий розряд, контактний опір

Вступ. Дугоконтактне приварювання шпильок (ДПШ) у сучасній зварювальній літературі відноситься до окремого способу зварювання [1] (arc stud welding (SW), Lichtbogenbolzenschweißen) і визначається як «процес дугового зварювання, в якому використовується дуга між металевим стрижнем або аналогічною деталлю та іншою заготовкою з додатком тиску після того, як поверхні, що сполучаються, достатньо нагріті». Його відміна від інших поширених способів дугового зварювання в тому, що електродами зварювальної дуги в цьому випадку слугують самі деталі, що зварюються. Як правило, вони відрізняються площею поверхонь, що з'єднуються, хоча немає принципового утруднення в стиковому дугоконтактному зварюванні стрижнів рівного діаметра¹.

Процес ДПШ відрізняється від інших різновидів дугоконтактного зварювання (ударного конденсаторного та стикового зварювання дугою, що обертається магнітним полем) способом збудження дуги.

У залежності від джерела зварювального струму знайшли застосування два принципово відмінних методи: дугове приварювання шпильок (приварювання шпильок розтягнутою дугою) і конденсаторне приварювання шпильок (прива-

рювання шпильок зі збуджуючим виступом). У першому варіанті деталі, що зварюються, нагріваються енергією імпульсу постійного струму, а в другому – імпульсним розрядом конденсаторної батареї. Останнім часом з'явився й третій напрямок: в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України було запропоновано [2] та набуло апаратного розвитку (Pegasar 500 accu, фірма HBS Bolzenschweissen GmbH) зварювання розрядним струмом суперконденсаторів, з'єднаних з батареєю акумуляторів. Але за технологічними ознаками цей напрямок може вважатися особливою формою дугового приварювання шпильок.

Кожен із названих різновидів ДПШ має свою сферу застосування і, відповідно, характерні технологічні особливості [3].

Основною відмінністю цих варіантів ДПШ, крім джерела енергії, є методи збудження дуги. При зварюванні розрядом конденсаторів дуга збуджується, в основному, руйнуванням тонкого виступу на торці шпильки, що приварюється (рис. 1), а при ДПШ постійним струмом – використовується низькострумова допоміжна дуга, яка запалюється при розведенні деталей. Такий самий спосіб генерації дуги застосовується в деяких спеціальних умовах конденсаторної ДПШ [4]. В останньому

¹Відмінністю ДПШ від стикового зварювання оплавленням є присутність повноцінного, хоч і короткочасного, дугового розряду

Д.М. Калеко – <https://orcid.org/0000-0001-5153-764X>

© Д.М. Калеко, 2026



Рис. 1. Сталева шпилька з мідним покриттям для конденсаторного дугоконтактного приварювання

варіанті, окрім позитиву, пов'язаного з можливістю керування при мілісекундному процесі зварювання, збудження дуги розведенням деталей замість підпалу виступом, що руйнується, дозволяє спростити форму шпильки та зменшити звуковий тиск при вибухоподібному випаровуванні частини виступу. Але цей метод ще не отримав достатнього розвитку.

Конденсаторна ДППШ має дві основні модифікації: зварювання «з контактом» і зварювання «із зазором». Як кажуть самі назви, у першому з них розрядний струм вмикається після того, як деталі, що зварюються, приводяться у стан електричного контакту. А в другому – спочатку створюється зазор між деталями, потім на них подається напруга заряду конденсаторів і, нарешті, деталі зближуються до контакту між ними. У статті розглядається перший з цих способів.

Увесь процес ДППШ «з контактом» можна розділити на три послідовні стадії, виходячи з об'єкта вкладення енергії: нагрівання виступу на торці шпильки до його руйнування та збудження дуги; горіння дуги та нагрівання поверхонь, що зварюються; осадка деталей і кристалізація металу в стик, що супроводжується остаточним розрядом конденсаторів. Оскільки енергія, необхідна для підготовки поверхонь, що повинні зваритися, виділяється в електричній дузі, збудження останньої є найважливішою умовою отримання якісного з'єднання. Тому перший етап процесу – нагрівання до руйнування виступу на торці шпильки – є визначальним для подальших етапів зварювання.

Нагрівання виступу на торці шпильки, що приварюється, прохідним струмом починається зі зміни стану перехідного контакту між кінчиком підпальною виступу шпильки та поверхнею деталі, до якої вона приварюється. Оскільки перехідний контактний опір має більшу величину, ніж електричний опір виступу, він може слугувати додатковим джерелом нагрівання виступу разом з його джоулевим нагріванням струмом, що проходить. Таке уявлення процесу збудження дуги має місце в роботах магдебурзької школи дослідників на чолі з Удо Францем [5]. Результати наших експериментів, наведені в цій статті, показали обмеженість такого підходу та необхідність вивчення динамічно-

го стану перехідного опору в контакті деталей, що зварюються, для подальшого визначення нагріву виступу та збудження дуги.

Метою роботи було визначення залежності динаміки початкового контакту від енергетичних і механічних параметрів процесу конденсаторного приварювання шпильок і його фазового стану в результаті нагрівання розрядним струмом.

Методика роботи. Електричний опір зони приварювання шпильки, основна складова якого на початку процесу – це опір у контакті деталей, що зварюються, розраховувався за результатами осцилографічного вимірювання величин струму та напруги. Зона приварювання, на якій вимірювалося падіння напруги, складалася з ділянки цангового затиску шпильки, частини шпильки завдовжки 3 мм, що виступає з нього, і ділянки пластини 50×3 мм завдовжки 20 мм від осі шпильки, до якої приварювалася шпилька.

Експерименти проводили на двох установках для конденсаторного приварювання шпильок: KES-110 та CD-1600 фірми HBS Bolzenschweiss-Systeme GmbH & Co KG (Німеччина), що відрізняються не тільки енергетичними характеристиками (апарат CD-1600 має батарею з постійною ємністю 66 мФ, у той час як KES-110 дозволяє змінювати ємність робочої батареї конденсаторів трьома ступенями 44, 66 і 110 мФ), але й параметрами розрядного контура. При зварюванні за методом «з попереднім контактом» опір розрядного контура та його індуктивність, включаючи елементи апарату та зовнішнього ланцюга, розраховані за осцилограмами розрядного струму [6] (табл. 1).

Експериментальну перевірку впливу індуктивності розрядного контура при збереженні інших параметрів на стан інтерфейсу зварюваних зразків було додатково проведено на апараті CD-1600. З цією метою зварювальний кабель був 6 разів обгорнутий навколо сталеві конструкції. Розрахована індуктивність зросла з 3,2 до 6,1 мкГн.

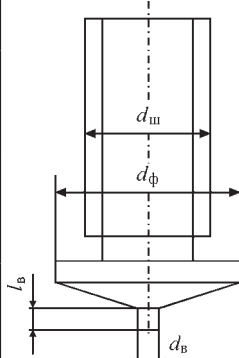
Для аналізу динамічного опору контактної зони були обрані шпильки М3, М6 і М8, що відрізняються за розмірами виступу (табл. 2) зі сталі S235 (Ст3) і латуні CuZn37 (Л63).

Від геометричних розмірів виступу на шпильці, серед іншого, залежать надійність збудження дуги, тривалість її горіння та, відповідно, тепловнесення. Тому розміри виступу суворо визначені між-

Таблиця 1. Параметри розрядного кола конденсаторів апаратів, що використані в дослідженнях

Параметр	KES-1100			CD-1600
	44 мФ	66 мФ	110 мФ	66 мФ
Електричний опір, мОм	14,8	12,8	12,7	13,4
Індуктивність, мкГн	6,5	6,6	6,9	3,2

Таблиця 2. Геометричні розміри експериментальних зразків

	Діаметр шпильки $d_{ш}$	Діаметр фланця $d_{ф}$, мм	Діаметр виступу $d_{в}$, мм	Довжина виступу $l_{в}$, мм
	M3	4,5	0,60	0,55
	M6	7,5	0,75	0,80
	M8	9		0,85

народним стандартом і стандартами різних країн [7]. При цьому допуск на діаметр виступу складає $\pm 0,08$ мм, а на його довжину $\pm 0,05$ мм. Стандарт не робить різниці між матеріалами шпильок, а багаторічний досвід дозволяє зберігати таку зручність для виробників кріплення.

Шпильки із низьковуглецевої сталі для запобігання корозії покриваються міддю. Відповідно до ISO 4042-2015 (ДСТУ 4042:2004) це покриття має товщину 5...15 мкм залежно від поля допуску різьблення.

З метою визначення можливої ролі покриття на динамічну зміну початкового контакту крім чистих пластин використовувалися також пластини з оцинкованою поверхнею та пластини, на яких штучно створювалася іржава, волога або масляна поверхня, або наносилася крапля води або олії. Сталеві шпильки, як сказано вище, у всіх дослідах мали мідне покриття. Для з'ясування його ролі покриття з торця виступу знімалося наждачним папером. Ці експерименти проводилися на CD-1600.

Для аналізу зміни фізичного стану області зварювання найпростішим і водночас наочним є метод резистометрії [8]. Електричний опір зони приварювання визначається обробкою осцилограм розрядного струму та падіння напруги в цій зоні. Розрядний струм і напруга реєструвалися осцилографами Yokagava моделі DL 1520 із частотою 2 МГц (апарат CD-1600) та Textronix TDS2000B із частотою 0,5 МГц (апарат KES-110). Для визначення величини розрядного струму використовувався безіндуктивний шунт з опором 1,5 МОм. Різниця в частотах дискретизації вимірювань визначалася можливостями осцилографів різного типу записувати вимірювані величини із тривалістю всього зварювального процесу.

На рис. 2 показано типовий графік зміни розрядного струму та електричного опору при ДПШ, на якому форма кривої електричного опору добре ілюструє перелічені вище стадії процесу і, отже, є найінформативнішою для аналізу теплофізичних ха-

рактеристик цих стадій. Графік зміни електричного опору та залежність останнього від настановних параметрів режиму дозволяє оцінити динаміку процесу зварювання. Графік $R = f(t)$ показує електричний опір зони приварювання та містить перехідний опір струмопідведення від цанги зварювального інструменту до шпильки та частини тіла шпильки, що виступає з цанги. До цього переліку входить також динамічний перехідний опір у контакті з пластиною (деталлю-партнером). У порівнянні з електричним опором виступу та перехідним опором електричний опір інших ділянок області зварювання дуже малий.

Результати експериментів та їх аналіз. Технологія виробництва шпильок холодною висадкою призводить до невизначеності рельєфу торця запалюючого виступу через анізотропність локальної твердості матеріалу. Це створює невизначеність початкового перехідного опору між деталями, які мають бути зварені. Початковий опір зони приварювання, зафіксований у момент вмикання струму (рис. 2), має величину, що помітно перевищує опір холодного контакту [9].

Зварювання на установках CD-1600 та KES-110 показало зовсім різний початок процесу. При зниженні індуктивності розрядного контура (установ-

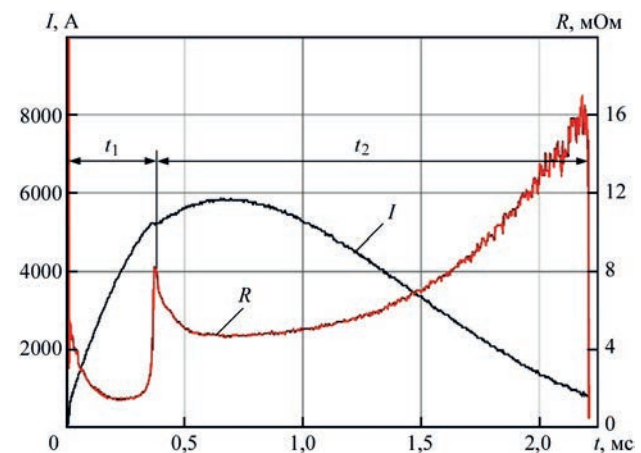


Рис. 2. Струм та електричний опір зони приварювання сталеві шпильки діаметром M8 ($C = 66$ мФ, $U = 150$ В, $P = 70$ Н): t_1 – стадія нагрівання та руйнування виступу, що збуджує дугу; t_2 – дугова стадія процесу ДПШ

ка CD-1600) та відповідному збільшенні швидкості зростання зварювального струму на кривих у початковий момент зазначається гостре зростання опору (рис. 3). До цієї особливості зміни контактної опору призводить миттєве нагрівання та фазові перетворення (плавлення, випаровування) вершин контактуючих мікрошорсткостей на пластині та виступі шпильки. У результаті швидкого нагрівання малого об'єму контактуючих мікронерівностей на межі між виступом шпильки та пластинною з'являються несучільності (пори), зменшується площа контакту та зростає електричний опір.

Після цього, як і при збільшеній індуктивності розрядного контура (KES-110), в контактні між деталями з'являється шар розплавленого металу, що заповнює поверхню зіткнення. Вирівнювання поверхні контакту при незначному обсязі розплавленого металу призводить до зниження опору. Прискорення нагрівання металу в перехідній зоні між шпилькою та листом при зварюванні на апараті CD-1600 призводить до підвищення температури плавлення [10] та перегріву металу. Тому, як показано на рис. 3, у сталевій парі електричний опір виявляється вище в подібні інтервали часу за більш високої швидкості нагрівання.

Електричний опір виступу на шпильках у холодному стані становить у шпильок діаметром М3, М6 та М8 зі сталі 3 (St 235) 0,29; 0,27 та 0,29 мОм, фланця – 0,013; 0,005 та 0,003 мОм, а вільного вильоту шпильки з цанги – 0,11; 0,03 та 0,015 мОм відповідно. З цього випливає, що електричний опір деталей, що зварюються, не відбивається на наведених вище графіках до тих пір, поки він при нагріванні не досягне помітної величини, а зміна опору зони приварювання обумовлена виключно ефектами в інтерфейсі «торець виступу на шпильці – лист».

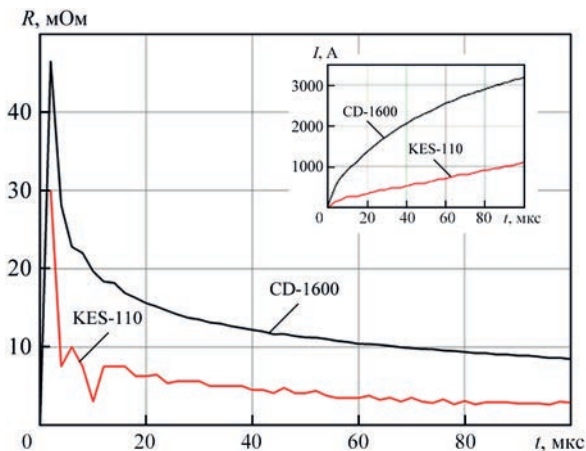


Рис. 3. Електричний опір зони приварювання сталевій шпильки М6, 66 мФ, 150 В. На врізці – розрядний струм у тому ж інтервалі часу

При приварюванні сталевих шпильок у первинний контакт з листом вступає мідне покриття, яке плавиться, захоплюється поверхневим натягом у западини на поверхневій шорсткості торця виступу та збільшує площу контакту. При цьому обсяг мідного покриття вдвічі зростає при переході в рідкий стан. Роль мідного покриття добре видно на рис. 4, де показано зміну перехідного покриття при ДПШ М8. На перших мікросекундах мідне покриття нагрівається швидше за сталеву основу та демонструє підвищення опору, а потім, після вирівнювання поверхні, роль покриття зводиться нанівець, бо різниця в опорах зразків з покриттям та без нього знаходиться в рамках похибки вимірювання.

Середня висота шорсткості Ra у холоднокатаного металу з матовою поверхнею, з якими проводилися експерименти, відповідно до ДСТУ 2834-94 становила $\leq 1,6$ мкм. Для плавлення шару міді завтовшки $5 \cdot 10^{-3}$ мм і площею $0,28$ мм² (М3) або $0,44$ мм² (М6 і М8) потрібна максимальна енергія приблизно 20,2 мДж, яка реально виділяється протягом близько 20 мкс при зварюванні на апараті KES-110 і за 5 мкс при зварюванні на апараті CD-1600 в умовах, визначених на рис. 3. Цей час близький до зареєстрованого нами часу зниження перехідного опору сталевих шпильок до мінімуму при заповненні простору між початковими верхівками контактуючих шорсткостей та утворенні контактної поверхні, близької до плоскої форми.

Зниження перехідного електричного опору помічено раніше [11]. При цьому передбачалося, що таке зниження пов'язане зі зміною площі контакту внаслідок підвищення пластичності матеріалу при нагріванні та його осадження під впливом пружини зварювального інструменту. Проте, оскільки інерція рухомої частини зварювального інстру-

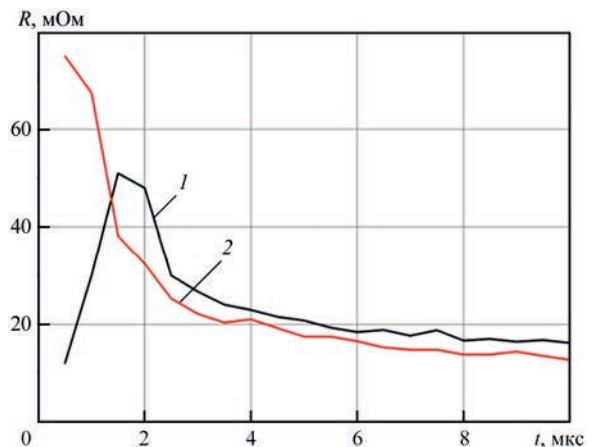


Рис. 4. Опір зони приварювання шпильки М8 з мідним покриттям (1) на торці підпалюючого виступу та без нього (2). Зварювання на апараті CD-1600, $C = 66$ мФ, $U = 150$ В, $P = 70$ Н

менту масою близько 300 г є досить великою та можливе її переміщення зі шпилькою за $t = 10$ мкс ($s = (70 \text{ Н}/0,3 \text{ кг}) \cdot t^2/2 \approx 0,1$ мкм) значно менше, ніж висота шорсткості ~ 5 мкм, треба від цього припущення відмовитися. Про це також свідчить відсутність впливу зусилля стиснення контактуючих деталей на величину контактної опору, що встановилася, при проходженні розрядного струму (рис. 5) з урахуванням точності вимірювань.

Зниження контактної опору може бути також викликане термічним збільшенням об'єму мікрошорсткостей. При нерухомій шпильці це означає зростання площі контакту. Однак, приймаючи температуру втрати пружності 600 °C і коефіцієнт термічного розширення сталі $\alpha = 1,66 \cdot 10^{-6}$ [12], збільшення об'єму і, отже, при незмінній товщині ділянки площі контакту, що нагрівається, не перевищує 3 %.

З урахуванням вищесказаного, можна прийняти гіпотезу про головну роль при нагріванні контактуючих шорсткостей зникнення поверхневих абсорбованих плівок і плавлення матеріалу в контакті деталей при одночасному збільшенні його об'єму та заповненні, таким чином, проміжків між виступами шорсткостей. Це призводить до мінімізації перехідного опору між пластиною та шпилькою, а оскільки товщина цього шару розплаву є невеликою, знижується сумарний електричний опір зони приварювання. Підтвердженням запропонованої гіпотези також є зменшення тривалості зниження електричного опору цієї зони у разі підвищення напруги заряду конденсаторів, тобто зварювального струму, та швидкості нагрівання (рис. 6). Розрахунок показує, що енергія, виділена при розряді за зазначений час зниження електричного

опору зони приварювання, яка обчислена обробкою осцилограм струму та напруги, є достатньою для створення перехідної області між виступом на шпильці та пластиною шару рідкого металу завтовшки більше 5 мкм, що покриває всю контактну поверхню.

На користь сказаного про головний вплив розплавлення поверхневих мікроставувань на стан контакту між запалюючим виступом і пластиною говорять і коливання величини опору, викликані локальними змінами площі контакту при переміщеннях рідких об'ємів поверхневого шару металу. Амплітуда цих коливань згасає зі збільшенням часу нагрівання та вкладеної енергії, тобто обсягу розплаву. Оскільки вирівнювання перехідного контакту між запалюючим виступом і листом відбувається в квазістатичному стані деталей, вплив початкового зусилля притискання, як було зазначено раніше, непомітний (рис. 5).

Подібний сценарій еволюції контакту між шорсткими поверхнями був запропонований С.І. Кучком-Яценком [13], який висловив твердження, що розплавлений метал мікронерівностей заповнює простір між ними, утворюючи ділянки зварювання.

Оскільки дискретність вимірювань струму – 53 А, а напруги – 0,4 В, точність розрахунку електричного опору дорівнює $\pm 3,75$ мОм. Тому зниження опору на графіках до нуля означає фактичний опір контактної зони менше ніж 3 мОм.

Діаметр виступу на торці шпильки в межах точності вимірювань не впливає на показники зміни перехідного опору (рис. 7), незважаючи на те, що площа контактування при заміні шпильки М3 шпильками М6 і М8 збільшується в 1,5 рази. Це пояснюється тепловідведенням у лист, що зростає

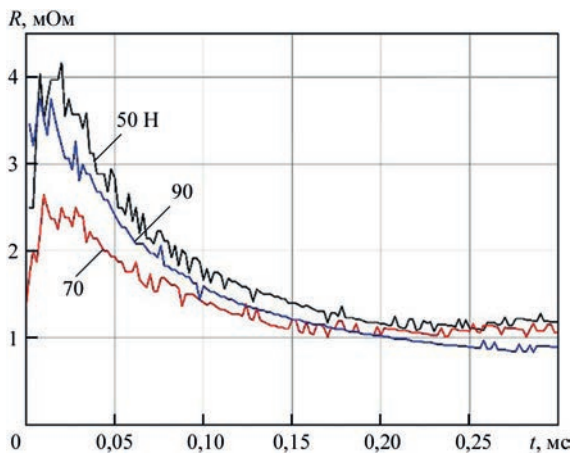


Рис. 5. Вплив початкового зусилля притискання деталей, що з'єднуються, на зміну перехідного опору при зварюванні сталевій шпильки М6 ($C = 44$ мФ, $U = 150$ В)

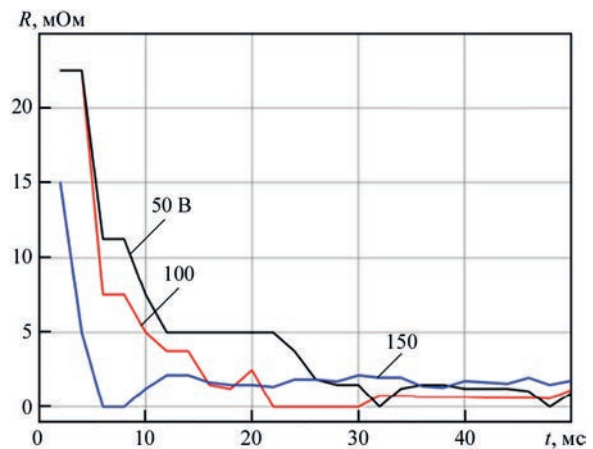


Рис. 6. Зміна перехідного опору в контакті сталевій шпильки М3 та смуги в залежності від напруги зарядження конденсаторів ($C = 44$ мФ, $P = 70$ Н)²

² Злами кривих на графіках є наслідком дискретності вимірювання та відповідають величинам, що вимірюються в момент їх фіксації.

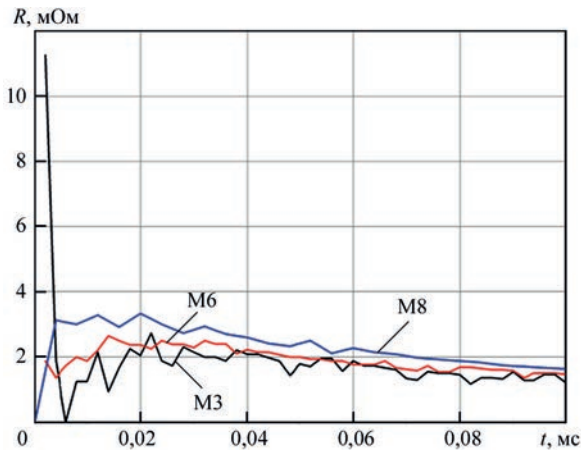


Рис. 7. Електричний опір зони приварювання при ДПШ сталевих шпильок (66 мФ, 150 В, 70 Н)

разом з площею контакту і, відповідно, вирівнюється електропровідність шару рідкого металу в контакті з пластиною шпильок різного діаметра.

Розрахунок відповідно до закону Фур'є енергії, що відводиться від перехідного опору, $q = \lambda(\Delta t_0 \cdot F \cdot t)/l$, де λ – коефіцієнт теплопровідності, Δt_0 – різниця температур, F – площа, l – довжина, t – тривалість тепловідводу відповідно, показує, що при зростанні площі контактування в результаті розтікання рідкої сталі поверхнею пластини розплав охолоджується нижче лінії солідуса, тобто кристалізується. За цей час тіло виступу, рельєф на торці якого плавиться, нагрівається струмом, що проходить, не більше за 3 °С, що також викликає відповідне тепловідведення від розплавленого шару.

Приймаючи на початку процесу різницю температур розплавленого шару в контакті деталей, що сполучаються, рівною 1500 °С, а коефіцієнт теплопровідності рідкої сталі 30 Дж/м·К, отримаємо, що для кристалізації рідкого шару сталі на торці виступу шпильки М3 потрібно 9 мкс, а на торці шпильки М6 і М8 – 8 мкс. Таким чином, метал у контакті шпильки з листом твердне відразу ж після розплавлення, замінюючи контактний електричний опір перехідним, який враховує різницю щільності струму в пластині й тонкому виступі на шпильці. Це подібно до відомого «примержання» електрода при дуговому зварюванні.

Теплове вирівнювання в останньому випадку дозволяє при аналізі нагрівання запалюючого виступу на шпильці прийняти з невеликою похибкою початкову температуру кімнатною, а єдиним джерелом нагрівання виступу – джоулеве нагрівання.

На відміну від сталевих опір зони приварювання латунних зразків до вмикання струму зазначається відсутністю вимірюваної величини електричного опору внаслідок деформації пластичної латуні під дією початкового зусилля притискання

(рис. 8). Після вмикання струму перехідний опір сталевих зразків різко знижується, а латунних, навпаки, зростає. При цьому збільшення опору останніх помітно залежить від стискаючого зусилля, прикладеного до зразків.

Збільшення перехідного електричного опору при нагріванні латунних зразків викликане випаровуванням цинку із розплавленого металу та утворенням, внаслідок цього, пор у контакті латунних деталей. У міру нагрівання та збіднення контактної зони від пари опір знижується, але все ж таки залишається більшим, ніж у сталевих зразків.

Розрахункові величини енергії, отримані за даними осцилографування струму та напруги в зоні приварювання, показують, що фазове перетворення шару латуні завтовшки 5 мкм збігається з областю максимуму електричного опору на графіках, представлених на рис. 8. А величина розрядного струму більша при зварюванні сталевих зразків при рівних настановних параметрах режиму. Слід зазначити в той же час, що амплітудні величини струму при зварюванні тих самих зразків менше різняться між собою (від 3600 до 4000 А). При цьому показники у сталі вищі, що також свідчить про збільшення середнього електричного опору при зварюванні латунних зразків внаслідок порушення суцільності через википання цинку при плавленні металу.

При зниженні індуктивності розрядного контуру (при зварюванні на апараті CD-1600) швидкість наростання струму така, що в контакті шпильки та листа на самому початку процесу мікровиступи на контактних поверхнях не тільки плавляться, але й випаровуються з утворенням розрядного проміжку дуже малої довжини, що фіксується підвищенням напруги на електродах близько до 10 В (рис. 9). Енергетичний розрахунок показує, що товщина металу, що випарувався, в експериментах, показана

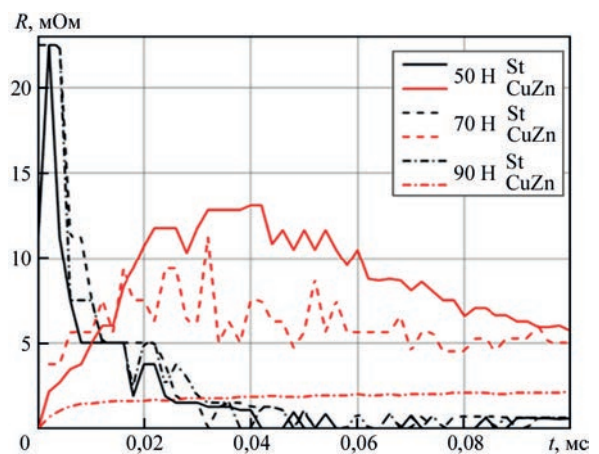


Рис. 8. Порівняння опору зони приварювання сталевих (St) та латунних (CuZn) шпильок М3 (44 мФ, 50 В)

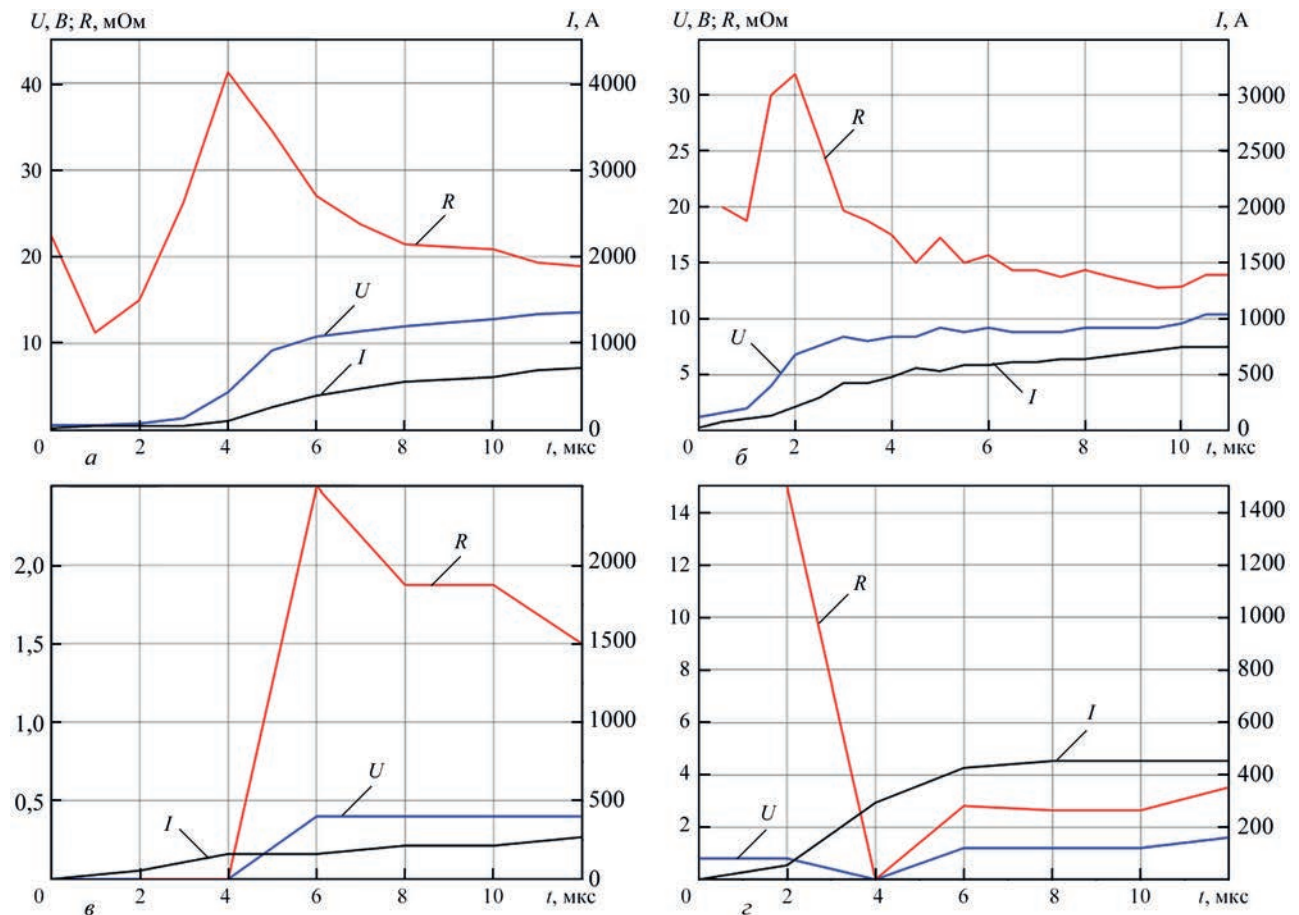


Рис. 9. Струм, напруга та електричний опір зони приварювання шпильок М6 та пластин зі сталі St 235 (а, в) та латуні CuZn37 (б, г) на установці CD-1600 (а, б) та KES-110 ($C = 66$ мФ, $U = 100$ В)

них на рис. 9, не перевищує 3 мкм. Внаслідок інерції механізму осадки замикання електродів немає, і розряд продовжується в парах металу, що випарувався. Диспергування матеріалу призводить до імпульсного підвищення опору розрядного проміжку, який зменшується в міру розширення провідної області. Товщина цієї області мала, і розряд переходить у повну дугову стадію пізніше, після втрати металевої провідності на деякій ділянці виступу на шпильці, яка випаровується в результаті нагрівання двома джерелами – розрядом на проміжку, що замінив початковий контакт між деталями, і нагріванням на електричному опорі запалюючого виступу.

Порівняння графіків на рис. 9 показує, що утворення розрядного проміжку між шпилькою та чистою пластиною в результаті випаровування контактуючих шорсткостей відбувається тільки при зварюванні на апаратах з малою індуктивністю розрядного контура. В іншому випадку спостерігається стабілізація перехідного опору внаслідок розплавлення та кристалізації початкової поверхневої структури.

При зварюванні на апараті CD-1600 збудження мікродугового розряду між шпилькою та ли-

стом спостерігається при зварюванні всіх матеріалів, з яких масово виготовляються шпильки, а саме: низьковуглецевої сталі St 235, нержавкої сталі 1.4301, латуні CuZn 37 та алюмінієвого сплаву AlMg3 (рис. 10). Збудження цього розряду зазначається різким зростанням напруги понад 10 В. У всіх випадках, крім зварювання легкого сплаву AlMg3, у цей момент з'являється пік опору, викликаний високим тиском парів матеріалу первинного рельєфу контактної поверхні листа та шпильки.

Осцилографічне спостереження зміни падіння напруги в зоні зварювання при різному стані поверхні пластини показало, що при забрудненнях будь-якого сорту (іржа, жир, волога, масло або вода) або цинковому покритті при зварюванні на апараті з малою індуктивністю процес починається зі збудження мікродугового розряду, а забруднення випаровуються в перші мікросекунди й далі процес не відрізняється від зварювання по чистій поверхні. При покритті металом з низькою температурою кипіння (цинк) істотно підвищується початковий опір розрядного проміжку через підвищений тиск парів покриття. Далі, після витoku цих парів, опір дуги стає таким самим, як і при зварюванні металу без покриття по чистій поверхні.

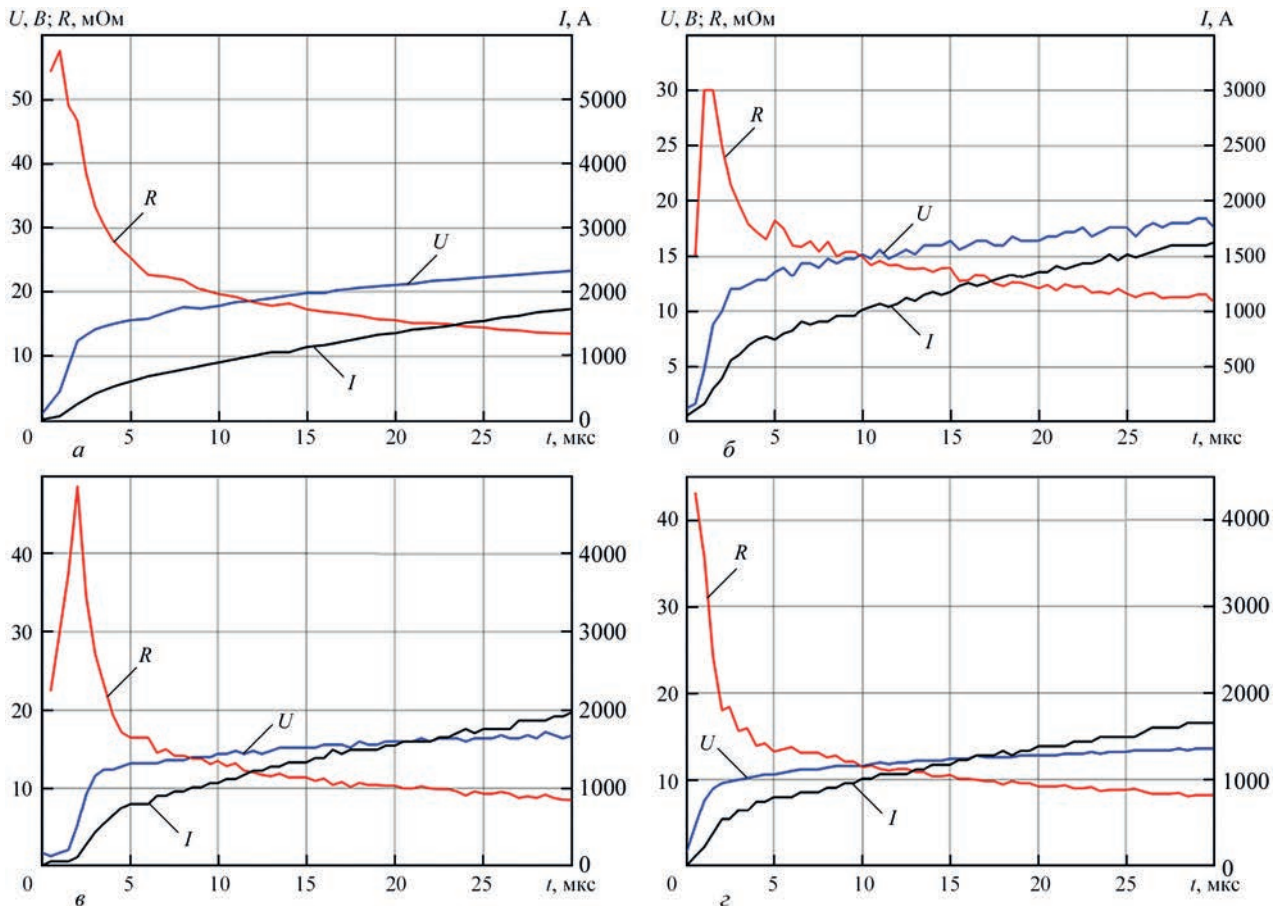


Рис. 10. Характеристики розряду конденсаторів ($C = 66$ мФ) при зварюванні шпильок М6 із різних металів на апараті CD-1600: *a* – сталь 235, $U = 145$ В, $P = 60$ Н; *б* – сталь 1.4301, $U = 150$ В, $P = 80$ Н; *в* – латунь CuZn 37, $U = 160$ В, $P = 80$ Н; *з* – алюмінієвий сплав AlMg3 $U = 160$ В, $P = 60$ Н

Цинкове покриття призвело до збудження газового розряду також в експериментах зі штучним підвищенням індуктивності розрядного контура. Внаслідок відносно низької температури випаровування цинку ($906,2$ °С) між поверхнями деталей, що зварюються, з'являється зазор, що має відповідно до стандарту [14] середню ширину 70 мкм, в якому починається газовий розряд.

Раніше Карстин Штахе [15] шляхом швидкісної кінозйомки визначила, що дугова стадія розряду починається через кілька сотень мікросекунд після вмикання розрядного струму. Це відповідає сказаному вище, оскільки вона працювала на апараті з високою індуктивністю розрядного контура (шпилька St 235, M8, 66 мФ, 174 В, електричний опір і індуктивність контуру 12 мОм і 10 мкГн відповідно).

При зниженій індуктивності розрядного контуру і, що визначається цим, підвищенні швидкості зростання величини зварювального струму (див. вірзку на рис. 3) у контакті шпильки з листом, як показано вище, виникає мікродуговий розряд. Опорні поверхні цієї мікродуги на електроді значно менше від перерізу шпильки, що приварюється, і необхідна міцність з'єднання не може бути

забезпечена без розвитку повноцінного дугового розряду, що діє протягом часу, достатнього для отримання розплавленого металу на всій поверхні з'єднання деталей. Тому зменшення індуктивності розрядного контура не усуває доцільність виготовлення на торці шпильки тонкого виступу, що «вибухає» внаслідок струму з високою щільністю.

Проведені дослідження показали, що можливі два варіанти стану перехідного опору між деталями, що зварюються, у залежності від електричних характеристик зварювальних апаратів, хімічного складу металу, що зварюється, та покриття поверхні деталі, до якої приварюється шпилька, а саме: зникнення перехідного опору зі створенням або цільної системи зі звуженим переходом між шпилькою та листом, або виникнення між ними мікродугового проміжку. Це далі викликає різний шлях термічного руйнування запалюючого виступу на шпильці, витрату накопиченої в конденсаторах енергії до запалювання повноцінної зварювальної дуги та зміну стану поверхонь, що з'єднуються. Таким чином, проведені дослідження дають можливість вибору з наведених варіантів за допомогою зміни електричних параметрів зварювального апарата в залежності від конкретних технологічних умов.

Висновки

Зародком процесу нагрівання ініціюючого виступу є перехідний опір, який зникає через кілька десятків мікросекунд після вмикання розрядного струму.

Стан контакту між шпилькою та листом, до якого вона повинна бути приварена, і перехідний опір між ними суттєво залежать від величини розрядного струму та швидкості його зростання. Залежно від індуктивності розрядного ланцюга в контакті може створюватися шар розплавленого металу, що охолоджується тепловідведенням в деталі, які зварюються, або мікродуговий проміжок при випаровуванні рельєфу контактуючих поверхонь. Покриття листа металом з низькою температурою кипіння (цинк) призводить до утворення мікродугового проміжку незалежно від індуктивності розрядного контура.

Якщо в контакті зварюваних деталей створюється шар розплавленого металу, вплив його складу проявляється або в згладжуванні контактної поверхні, як при зварюванні шпильок із низьковуглецевої сталі з мідним покриттям, або в появі несучільностей внаслідок випаровування низькотемпературної складової сплаву, наприклад, цинку при приварюванні латунних шпильок або магнію при приварюванні алюмінієво-магнієвих шпильок. Електричний опір знижується після виходу пари низькотемпературної фракції із зони зварювання внаслідок її підвищеного тиску.

При зварюванні з малою індуктивністю розрядного контура поверхневі забруднення або декоративні покриття випаровуються в перші мікросекунди розряду та не впливають на процес зварювання. Покриття з металу з низькою температурою кипіння викликають збільшення опору дуги й тим самим призводять до зниження зварювального струму та уповільнення «інкубаційного» періоду збудження зварювальної дуги.

Для визначення доцільності включення регульованої індуктивності в розрядний ланцюг апаратів для конденсаторного приварювання шпильок, беручи до уваги встановлену раніше [6] позитивну роль індуктивності у підвищенні ККД приварювання шпильок і зниження пористості зварних з'єднань, слід оцінити втрати енергії опору між деталями, що зварюються.

Список літератури

1. (2004) *Welding Handbook, Ninth Edition*. Volume 2. Welding Processes. Part 1. American Welding Society.
2. Патон Б.Є., Жихарев А.М., Калеко Д.М., Слезін О.О. (2013) *Апарат для приварювання шпильок*. Патент України №100828, оп.25.01.2013.

3. Trillmich, R., Welz, W. (1997) *Bolzenschweißen, Grundlagen und Anwendung, Fachbuchreihe Schweißtechnik*. B.133, DVS Verlag, Düsseldorf.
4. Kaleko, D.M., Lebedev, V.K., Chvertko, N.A. (1999) *Processes of welding using the arc discharge of the capacitors. Welding and surfacing reviews*. Harwood academic publishers.
5. Weiss, D., Franz, U., Mahrle, A., Schmidt, J. (1999) *Prozessführung und Qualität beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung*. Schweißen und Schneiden '99: Vorträge der gleichnamigen Großen Schweißtechnischen Tagung in Weimar 15–17 September 1999. DVS-Berichte, Band 204, DVS Verlag, Düsseldorf.
6. Kaleko, D., Klier, R. (2025) Einfluss der Induktivität des Entladungskreises von Kondensatoren beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung. *Schweißen und Schneiden*, 7-8, 52–59. DOI: <https://doi.org/10.53192/SUS20250852>
7. ДСТУ ISO 13918:2014 (ISO 13918:2008, IDT). *Зварювання. Шпильки і керамічні втулки для дугового приварювання шпильок*.
8. Холявко В.В., Владимирський І.А., Жабинська О.О. (2016) *Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів*. Київ, Центр учбової літератури.
9. Калеко Д.М. (2019) К вопросу о контактном электрическом сопротивлении разновеликих поверхностей. *Автоматическая сварка*, 1, 11–17. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.01.01>
10. Яковлев Е.Б., Свирина В.В., Сергеева О.Н. (2010) Особенности плавления металлов при действии ультракоротких лазерных импульсов. *Известия вузов, Приборостроение*, 53(4), 57–62.
11. Lauenroth, T. (2002) *Prozessanalyse zum Kondensatorenentladung-Bolzenschweißen mit Spitzenzündung*. Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs. Technischen Universität Clausthal.
12. (1993) ASM Handbook v1. *Properties and selection irons steels and high-performance alloys*.
13. Кучук-Яценко С.И. (1992) Контактная стыковая сварка оплавлением. Киев, Наукова думка.
14. EN ISO 1461:2024 *Hot dip galvanized coatings on fabricated iron and steel articles – Specifications and test methods*.
15. Stache, K. (1998) *Prozessanalyse und Maßnahmen zur Qualitätssicherung beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung*. Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs. Technischen Universität Clausthal.

References

1. (2004) *Welding Handbook, Ninth Ed.* Vol. 2. Welding Processes. Pt 1. AWS.
2. Paton, B.E., Zhikharev, A.M., Kaleko, D.M., Slezin, O.O. (2013) *Apparatus for welding studs*. Patent of Ukraine 100828, op. 01/25/2013 [in Ukrainian].
3. Trillmich, R., Welz, W. (1997) *Bolzenschweißen, Grundlagen und Anwendung, Fachbuchreihe Schweißtechnik*. B.133, DVS Verlag, Düsseldorf.
4. Kaleko, D.M., Lebedev, V.K., Chvertko, N.A. (1999) *Processes of welding using the arc discharge of the capacitors. Welding and surfacing reviews*. Harwood academic publishers.
5. Weiss, D., Franz, U., Mahrle, A., Schmidt, J. (1999) *Prozessführung und Qualität beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung*. Schweißen und Schneiden '99: Vorträge der gleichnamigen Großen Schweißtechnischen Tagung in Weimar 15–17 September 1999. DVS-Berichte, Band 204, DVS Verlag, Düsseldorf.
6. Kaleko, D., Klier, R. (2025) Einfluss der Induktivität des Entladungskreises von Kondensatoren beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung. *Schweißen und Schneiden*, 7-8, 52–59. DOI: <https://doi.org/10.53192/SUS20250852>
7. DSTU ISO 13918:2014 (ISO 13918:2008, IDT). *Welding. Studs and ceramic bushings for arc welding of studs* [in Ukrainian].
8. Kholyavko, V.V., Vladimirsky, I.A., Zhabinska, O.O. (2016) *Physical properties and methods research materials*. Kyiv, Tsentr uchbovoi literatury [in Ukrainian].

9. Kaleko, D.M (2019) On the problem of contact electric resistance of different-sized surfaces. *The Paton Welding J.*, **1**, 2–6. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.01.01>
10. Yakovlev, E.B., Svirina, V.V., Sergeeva, O.N. (2010) Features of metal melting during action of ultrashort laser pulses. *Isv. Vusov. Priborostroenie*, **53(4)**, 57–62 [in Russian].
11. Lauenroth, T. (2002) *Prozessanalyse zum Kondensatorenentladungs-Bolzenschweißen mit Spitzezündung*. Dissertation zur Erlangung des Grades eines Dr.-Ing. Technischen Universität Clausthal.
12. (1993) ASM Handbook v1. *Properties and selection iron steels and high-performance alloys*.
13. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (1992) *Flash-butt contact welding*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
14. EN ISO 1461:2024 *Hot dip galvanized coatings on fabricated iron and steel articles. Specifications and test methods*.
15. Stache, K. (1998) *Prozessanalyse und Maßnahmen zur Qualitätssicherung beim Bolzenschweißen mit Spitzezündung*. Dissertation zur Erlangung des Grades eines Dr.-Ing. Technischen Universität Clausthal.

DYNAMICS OF CONTACT BETWEEN PARTS BEING WELDED DURING CAPACITOR WELDING OF STUDS

D.M. Kaleko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: dk1718@gmail.com

A prerequisite for obtaining a strong connection in capacitor welding of studs is reliable excitation of the arc discharge of the capacitors, for which a thin protrusion at the end of the stud being welded serves. The source of its heating, especially the initial stage, is the subject of discussion. This mainly concerns understanding of the role of the contact electrical resistance between the parts and its transformation. The results of experiments conducted in two units that differ in the electrical characteristics of the discharge circuit made it possible to determine the role of energy parameters at the capacitor discharge initial stage and the influence of the chemical composition of the material of the parts being welded on changing the physical state of the welding zone (contact between the parts). Welding conditions can cause two different states: formation of a metallic bond of the protrusion on the stud and the sheet or a microarc gap. With a small inductance of the discharge circuit, and the associated higher rate of increase in the discharge current, the contact of the parts passes into a microarc gap in all the cases. Thus, depending on the characteristics of the discharge circuit, further heating of the protrusion up to its local destruction with excitation of the welding arc can be achieved due to Joule heating, or heating by two simultaneously acting sources - heat release in the protrusion from the current passing through it, and heat transfer from the end of the protrusion, which is heated by the arc. In the second mode, the surface of the part to which the stud is welded is cleaned of possible contaminants and decorative conductive coatings, creating conditions for producing a high-quality welded joint. 15 Ref., 2 Tabl., 10 Fig.

Keywords: stud welding, capacitor discharge, electric arc excitation, microarc discharge, contact resistance

Отримано 09.06.2025
Отримано у переглянутому вигляді 27.11.2025
Прийнято 15.01.2025

НОВА КНИГА

УДК 621.791.75:537.636:620.187.3

Максимов С.Ю., Винничук С.Д., Прилипко О.О. «Розробка технологічних основ та устаткування при застосуванні зовнішнього електромагнітного впливу при зварюванні під водою» — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2025. — 127 с.

У монографії розглянуто технологічні особливості реалізації процесу зварювання із застосуванням зовнішнього електромагнітного впливу (ЗЕВ) при зварюванні під водою. Наведено математичні моделі для обчислення електродинамічних сил і вихрових струмів у рідкометалевій ванні. Розроблені моделі можуть бути застосовані для зварювання під водою та на повітрі. З урахуванням теоретичних положень зроблено вибір технологічних режимів. Запропоновано оригінальні конструкції індукторів з різними конфігураціями електромагнітних полів. Зварювання з ЗЕВ призводить до зменшення розмірів пор, які утворюються в металі швів, що покращує їх фізико-механічні характеристики. Структура матеріалу наплавлення вирізняється рівновісними зернами невисокої дисперсності. При застосуванні ЗЕВ середні значення мікротвердості в зонах наплавлення та термічного впливу зменшуються, що свідчить про покращення пластичності. Проведені дослідження підтверджують, що при зварюванні з ЗЕВ у металі зони термічного впливу не спостерігаються гартівні структури й тріщини. ЗЕВ при підводному зварюванні допомагає гомогенізувати структуру, зменшити різницю фізико-механічних властивостей як між зонами зварного з'єднання, так і між зварним з'єднанням і основним металом.



Для наукових та інженерно-технічних працівників, а також для студентів металургійних спеціальностей.

Бібліогр. 125, табл. 6, рис. 56.