

ВИМОГИ ДО ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАШИН КОНТАКТНОГО МІКРОЗВАРЮВАННЯ

Ю.М. Ланкін

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: lankin.y.n@gmail.com

Зварювання деталей товщиною до 0,5 мм зазвичай називають мікрозварюванням. Контактне мікрозварювання широко застосовується в електроніці та приладобудуванні. Теплова інерційність зварюваних деталей при контактному зварюванні пропорційна квадрату їх товщини. Внаслідок малої теплової інерційності деталей при мікрозварюванні зміна їх температури близька до зміни в часі зварювального струму промислової частоти 50 Гц. Для виключення пульсацій температури контактне мікрозварювання необхідно проводити імпульсами постійного струму або зварювальним струмом високої частоти. При мікрозварюванні початковий контактний опір деталь-деталь перевищує власний опір зварюваних деталей в десятки разів. Для зменшення початкових виплесків розплавленого металу і стабілізації якості зварного з'єднання при мікрозварюванні необхідне плавне зростання зварювального струму. Бібліогр. 12, табл. 2.

Ключові слова: контактне мікрозварювання, теорія подібності, теплова інерційність, частота зварювального струму, типові режими зварювання

Контактне зварювання – найбільш продуктивний спосіб зварювання, який охоплює до 50 % зварювальної продукції в загальному обсязі всіх способів зварювання [1]. Зварювання деталей товщиною до 0,5 мм зазвичай називають мікрозварюванням. Воно широко застосовується в електроніці та приладобудуванні при виробництві автомобільної електроніки, датчиків, медичних приладів, батарей та батарейних модулів, електронних компонентів, а також при виробництві ювелірних виробів [2–4]. Часто мікрозварювання використовують при збірці кварцевих резонаторів, п'єзоелектричних приладів, конденсаторів, звичайних і твердотільних резонаторів, термопар, різних нагрівальних модулів, мініатюрних вібродвигунів, термобатарей, дистанційних решіток тепловиділяючих збірок, які працюють в активній зоні атомних реакторів, а також при герметизації корпусів мініатюрних приладів, мембранних коробок, сифонів і монтажі електроприладів. Зустрічаються відомості [4, 5] про заміну процесу пайки при виробництві електронної апаратури та ювелірних виробів на контактне мікрозварювання, яке має в порівнянні з нею ряд серйозних переваг: відсутність припоїв і флюсів, вищі електричні характеристики отриманого з'єднання, термо- та вібростійкість, мінімальний вплив температури на з'єднувані деталі, чистіші умови виробництва та інші.

В більшості випадків вимоги, що висувуються до отриманого зварного з'єднання, обмежуються необхідною міцністю. Однак при зварюванні деталей відповідального призначення, крім високої гарантованої якості та надійності з'єднань, необхідно забезпечити їх високу повторюваність і відсутність виплесків часток розплавленого металу. Висока повторюваність необхідна при виробництві складних виробів, коли проводиться вели-

ка кількість зварювань і від якості кожної з них в значній мірі залежить якість готового виробу [7, 8].

Особливості контактного мікрозварювання. Мікрозварювання має ряд особливостей, які створюють додаткові проблеми в технології та конструюванні обладнання. Мала товщина зварюваних деталей є причиною малої теплової інерційності зварюваних точок. За теорією подібності теплова інерційність зварюваних деталей повинна бути пропорційною квадрату товщини деталей. Експериментальне визначення величини цієї інерційності ніким не проводилось, а аналітичне рішення нестационарного нагріву зварної точки джерелом струму складної форми навіть при значних спрощуючих припущеннях досить складне. Тому оцінки інерційності відбувались шляхом математичного моделювання.

При контактному точковому мікрозварюванні діаметр електродів набагато більший за товщину зварюваних деталей. Це дозволяє уявити, що основна частина зварювального струму протікає по стовпчику металу діаметром, що дорівнює діаметру електродів, і висотою, що дорівнює сумарній товщині зварюваних деталей. При цьому спрощуючому припущенні проведено моделювання динаміки нагріву струмом частотою 50 Гц зварних точок низьковуглецевої сталі різних товщин на аналоговій ЕОМ [9]. Якщо в першому наближенні зварюваний виріб можна уявити як інерційну ланку першого порядку, то за результатами моделювання теплові постійні часу Q зварюваних деталей в діапазоні товщин $\delta = 1 \dots 0,2$ мм добре описуються рівнянням $Q = 0,057\delta^2$ с.

Таким чином, розрахункова теплова постійна часу зварної точки приблизно пропорційна квадрату товщини зварюваного металу. В результаті для низьковуглецевої сталі при частоті зварюваль-

Ланкін Ю.М. – <https://orcid.org/0000-0001-6306-8086>

© Ю.М. Ланкін, 2021

ного струму 50 Гц пульсації температури, викликані періодичною зміною зварювального струму в часі, нехтувано малі при зварюваних товщинах більше 2,5...2,0 мм. При товщині $\delta = 1,0$ мм пульсації температури центру точки складають $< 10\%$. При зварюванні малих товщин температура зварюваної точки в процесі її формування з невеликим запізненням прямує за зміною зварювального струму, задній фронт імпульсу струму фактично не бере участь в зварюванні і нагрів (формування) точки суттєво залежить від форми імпульсу зварювального струму.

Через відносно малий власний опір деталей і малих зварюваних зусиль зростає роль контактних опорів як джерел тепла на початку зварювання. Так, за розрахунками та експериментами В.Е. Моравського [3] при зменшенні товщини листів з низьковуглецевої сталі в 40 разів (з 2,0 до 0,05 мм) значення початкових контактних опорів деталь-деталь відрізняється в 170 разів. У загальному випадку відношення контактних опорів до власного опору зварюваних деталей зворотно пропорційне їх лінійним розмірам. З цієї причини при контактному мікрозварюванні різко зростає ймовірність початкових виплесків і робить її надзвичайно чутливою до форми переднього фронту імпульсу зварювального струму.

Особливості режимів контактного точкового мікрозварювання. При зварюванні металів середніх і великих товщин на промисловій частоті зварювального струму накопичено значний досвід зі стабілізації параметрів зварної точки шляхом програмного та автоматичного регулювання параметрів процесу під час зварювання. Цей досвід майже не використовується в контактному точковому мікрозварюванні, яке за різноманіттям режимів зварювання та стабільності якості зварних з'єднань поступається контактному зварюванню звичайних товщин. Це викликано відсутністю швидкодіючих регульованих зварювальних джерел живлення.

Зварювання середніх і великих товщин проводять на зварювальних машинах змінного струму промислової частоти 50 Гц. Відповідно до критеріїв подібності [10] тривалість зварювального імпульсу пропорційна квадрату товщини зварюваного металу. Тому, якщо при зварюванні, наприклад, низьковуглецевої сталі товщиною 1 мм в середньому встановлюється час протікання зварювального струму 0,188 с, то для зварювання того ж матеріалу товщиною 0,2 мм на подібному режимі тривалість зварювання повинна бути 0,023 с, а товщиною 0,1 мм – всього 0,009 с. Регулювати час зварювання на частоті мережі 50 Гц в цьому випадку практично неможливо. Крім того, вельми важко регулювати і зварювальний струм.

При зварюванні металів середніх і великих товщин на промисловій частоті регулювання струму відбувається шляхом зміни кута включення тиристорів. Тому після 120° фази зварювального стру-

му температура зварної точки починає падати слідом за струмом і зростання розмірів розплавленого ядра припиняється. Другий полуперіод зварювального струму марний, оскільки не веде до подальшого збільшення розмірів розплавленого ядра. Звідси випливає, що зварювання сталі товщиною менше за $0,2 + 0,2$ мм на змінному струмі промислової частоти можливе тільки одним полуперіодом напруги мережі, а діапазон фазового регулювання складає $0 \dots 90^\circ$, який відраховується від кута зсуву фаз напруги та струму зварювального контура.

Для однополуперіодного зварювання, крім управління струмом шляхом регулювання кута включення тиристора, розроблено спосіб управління струмом шляхом регулювання тривалості ввімкненого стану тиристора [10, 11]. Це здійснюється за допомогою примусового гашення тиристора, коли струм досягне заданого значення на інтервалі його зростання.

Як в першому, так і в другому випадку відсутня можливість керувати формою переднього фронту імпульсу струму. За всіма цими причинами для зварювання малих товщин в переважній більшості випадків застосовуються так звані конденсаторні машини [3].

Разом з незаперечними перевагами конденсаторні машини в області управління режимом зварювання значно поступаються машинам змінного струму для зварювання декількома періодами струму. В конденсаторних машинах вкрай важко керувати формою імпульсу зварювального струму та зовсім неможливо регулювати зварювальний струм під час зварювання. Відомі доволі незграбні спроби хоч якось змінювати природну форму струму розряда конденсатора, але всі вони призводять до різкого ускладнення зварювального джерела живлення, а можливості регулювання форми імпульсу струму вкрай обмежені [3, 11].

Відомі джерела живлення з лінійними транзисторними регуляторами [6–8, 12]. Вони мають ідеальні регульовальні характеристики, які дозволяють реалізувати будь-які зварювальні цикли та автоматичне регулювання параметрів зварювання. Нажаль, через дорожнечі та громіздкості, як і у випадку дугового зварювання, вони навряд чи знайдуть скільки-небудь широке застосування.

Принципово машини для контактного мікрозварювання нічим не будуть відрізнятися від машин для зварювання середніх і великих товщин на змінному струмі, якщо дотримуються умови подібності [9]: частота зварювального струму $f = k_6 \delta^{-2}$, опір зварювального контура $Z_k = k_5 \delta^{-1}$ та маса рухомих частин машини $m = k_7 \delta^5$. Однак при контактному мікрозварюванні залишається вплив відносно великого початкового контактного опору зварюваних деталей. Але для цього, зокрема, і необхідне розширення можливостей регулювання зварювальної машини.

Необхідні технічні характеристики машин для контактного мікрозварювання на змінному

Таблиця 1. Усереднені рекомендовані режими точкового контактного мікрозварювання низьковуглецевих сталей

| δ , мм | $\overline{d_{ел}}$, мм | $\overline{F_{зв}}$, кг | $\overline{I_{зв}}$, кА | $\overline{t_{зв}}$, с | f , кГц | $\overline{P_{зв}}$, кВт | $I_{зв}^{min}$, кА | $t_{зв}^{max}$, с |
|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|---------------------------|---------------------|--------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 0,05 | 1,15 | 12,7 | 2,2 | 0,0036 | 20,0 | 2,2 | 1,50 | 0,01 |
| 0,10 | 1,66 | 25,6 | 3,08 | 0,0090 | 5,00 | 3,08 | 2,09 | 0,026 |
| 0,15 | 2,05 | 36,2 | 3,74 | 0,0150 | 2,20 | 3,74 | 2,50 | 0,043 |
| 0,20 | 2,46 | 47,7 | 4,29 | 0,0224 | 1,25 | 4,29 | 2,90 | 0,065 |
| 0,25 | 2,68 | 59,0 | 4,78 | 0,0300 | 0,80 | 4,78 | 3,25 | 0,87 |

Таблиця 2. Рекомендовані м'які режими точкового контактного мікрозварювання низьковуглецевих сталей

| δ , мм | $d_{ел}$, мм | $J_{зв}^{min}$, кА/мм ² | $I_{зв}^{min}$, А |
|---------------|---------------|-------------------------------------|--------------------|
| 0,05 | 1,0 | 1,056 | 0,875 |
| 0,10 | 1,0 | 0,743 | 0,583 |
| 0,15 | 1,0 | 0,607 | 0,477 |
| 0,20 | 1,5 | 0,526 | 0,929 |
| 0,25 | 1,5 (2,0) | 0,470 | 0,830 (1,476) |

струмі. В електроніці та приладобудуванні контактним мікрозварюванням зварюються вироби в діапазоні товщин 0,05...0,25 мм. Екстраполюємо дані за режимами зварювання середніх і великих товщин та мікрозварювання. Найбільш повно досліджено режими зварювання низьковуглецевої сталі як найбільш розповсюдженої. Статистична обробка всіх доступних баз даних режимів контактного зварювання низьковуглецевої сталі в діапазоні товщин $\delta = 0,5...7,3$ мм дала наступні залежності для усереднених режимів зварювання:

$$\left. \begin{aligned} \overline{d_{ел}} &= 5,5 \cdot \delta^{0,526} \\ \overline{F_{зв}} &= 222 \cdot \delta^{0,956} \\ \overline{I_{зв}} &= 9,264 \cdot \delta^{0,478} \\ \overline{t_{зв}} &= 0,188 \cdot \delta^{1,32} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Розраховані за (1) режими зварювання для діапазону товщин 0,05...0,25 мм наведено в табл. 1.

В табл. 1 наведено необхідні для зварювання малих товщин частоти зварювального струму, при яких пульсації температури точки будуть такі ж, як при зварюванні товщин 1,0 + 1,0 мм на частоті 50 Гц.

Аналіз табл. 1 показує, що при зварюванні на усереднених режимах потрібно досить значні струми і потужність джерела живлення. У сьомому стовпці наведено потужність, яка виділяється в зварюваній точці при напрузі на точці 1 В, яка, як відомо, майже не змінюється зі зміною товщини зварюваних деталей.

На практиці великі товщини зварюють на м'яких режимах для зменшення потужності, середні – на жорстких для збільшення продуктивності. Малі товщини також зварюють на м'яких режимах, щоб не використовувати важко досяжний малий час зварювання, при якому крім того, як показано вище, неможливе гнучке регулювання струму. При зварюванні на підвищених частотах збільшення часу зварювання для малих товщин втрачає актуальність, оскільки кількості періодів зварювального струму,

що збільшується зі збільшенням частоти, цілком достатньо для регулювання струму. Але зменшення необхідної потужності зварювального джерела живлення дуже важливе, оскільки спрощує транзисторний високочастотний силовий генератор.

Формули (1) наведено для середніх параметрів режимів. Отримати зварну точку одних і тих же розмірів можна при різноманітних поєднаннях $I_{зв}$ та $t_{зв}$. Обробка даних експериментальних режимів показала, що взаємозв'язок струму з часом зварювання можна описати наступною комплексною залежністю:

$$I_{зв}^2 t_{зв}^{0,7} = 25,7 \delta^{1,8} \quad (2)$$

Розкид експериментальних даних навколо цієї лінії регресії набагато менший, ніж для кожної зі складових окремо. Згідно з цією залежністю зі збільшенням $t_{зв}$ зварювальний струм $I_{зв}$ знижується і навпаки. Границі варіювання цих параметрів обмежуються наступним – зварювальний струм можна збільшувати з відповідним зменшенням часу зварювання, доки не почнеться виплескування з-під електрода на початку імпульсу струму; час зварювання можна збільшувати з відповідним зменшенням зварювального струму, поки вм'ятини від електрода не перевищать 15 % товщини зварюваного листа. В першому випадку режим зварювання називають гранично жорстким, в другому – гранично м'яким. Природно, для м'яких режимів необхідна потужність джерела живлення менша, ніж для жорстких.

Обробка режимів зварювання низьковуглецевої сталі товщиною 0,9...1,0 мм показує, що діапазон варіювання допустимого струму від середнього для граничних режимів складає $\pm 32\%$. Таким чином, дані табл. 1 можна відкоригувати для м'яких режимів (стовпці 8 і 9). Ці дані відповідають просто рекомендованим м'яким режимам, а аж ніяк не гранично м'яким.

Реально для мікрозварювання використовуються електроди діаметром 1...2 мм [3], табл. 2.

З іншої сторони, для гранично м'яких режимів справедлива залежність:

$$j_{зв}^{\min} = \frac{0,089\sqrt{p}}{\delta^{0,5}}, \quad (3)$$

де $j_{зв}^{\min}$ – мінімальна щільність струму; p – питомий тиск електродів.

В табл. 2 наведено розраховані за (3) величини $j_{зв}^{\min}$, які відповідають значенням мінімального зварювального струму для застосовуваних на практиці електродів і $p = 7$ кг/мм². В результаті виходить, що весь діапазон товщин, що нас цікавлять, можна зварити на струмі близько 1 кА.

Висновки

Теплова постійна часу зварюваних листів пропорційна квадрату товщини листів.

Для низьковуглецевої сталі коефіцієнт пропорційності теплової постійної часу квадрату товщини зварюваних листів $\approx 0,06$ с/мм².

Для того, щоби пульсації температури при зварюванні низьковуглецевої сталі товщиною 0,1 + 0,1 мм, які обумовлені тепловою інерційністю зварної точки, були такими ж, як і при зварюванні сталі товщиною 1,0 + 1,0 мм на частоті 50 Гц, частота зварювального струму повинна бути 5 кГц.

Низьковуглецеву сталь товщиною 0,05...0,25 мм можна зварювати на м'яких (як при зварюванні середніх товщин) режимах, застосовуючи зварювальні струми до 1 кА.

Список літератури

1. Баннов М.Д. (2005) *Технология и оборудование контактной сварки*. Москва, Академия.
2. Атауш В.Е., Леонов В.П., Москвин Э.Г. (1996) Микросварка в приборостроении. Рига, РТУ.
3. Моравский В.Э., Ворона Д.С. (1985) *Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки*. Киев, Наукова думка.
4. Колупаев Ю.Ф., Привезенцев В.И. (2003) Особенности конденсаторной сварки никрома при изготовлении ювелирных изделий. *Сварочное производство*, **11**, 41–43.
5. Паэрэнд Ю.Э., Бондаренко А.Ф. (2005) Особенности формирования импульсов тока для малогабаритных деталей. *Технічна електродинаміка. Тем. вип. силова електроніка та енергоефективність*, Ч. 3, 28–31.
6. Паэрэнд Ю.Э., Бондаренко А.Ф. (2006) Применение импульсов специальной формы для контактной микросварки. *Труды седьмой Международ. научно-практ. конф. «Со-*

временные информационные и электронные технологии» (СИЭТ-2006). Т. 2. Одесса, ДП Нептун, Технология.

7. Паэрэнд Ю.Э., Бондаренко А.Ф. (2006) Источник питания для контактной микросварки с программируемой формой сварочного импульса. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, **4**, 51–54.
8. Ланкин Ю.Н. (1967) Электромоделирование тепловых процессов при контактной точечной сварке. *Автоматическая сварка*, **7**, 23–26.
9. Лебедев В.К., Яворский Ю.Д. (1960) Применение критериев подобия для определения режимов контактной сварки. *Там же*, **8**, 37–44.
10. Патон Б.Е., Лебедев В.К. (1969) *Электрооборудование для контактной сварки. Элементы теории*. Москва, Машиностроение.
11. Патон Б.Е., Гавриш В.С., Гродецкий Ю.С. (1963) Безинерционные схемы автоматического регулирования процессов контактной сварки. *Автоматическая сварка*, **5**, 7–10.
12. Леонов В.П., Барабанщикова Л.А., Греченкова А.А., Атауш В.Е. (1990) Управляемый источник тока «САРМ-1» для контактной микросварки. *Сварочное производство*, **10**, 36–38.

References

1. Bannov, M.D. (2005) *Resistance welding technology and equipment*. Moscow, Akademiya [in Russian].
2. Ataush, V.E., Leonov, V.P., Moskvina, E.G. (1996) *Microwelding in instrument engineering*. Riga, RTU [in Russian].
3. Moravsky, V.E., Vorona, D.S. (1985) *Technology and equipment for spot and projection capacitor-discharge welding*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Kolupaev, Yu.F., Privezentsev, V.I. (2003) Peculiarities of capacitor-discharge welding of nichrome in producing of jewellery. *Svarochn. Proizvodstvo*, **11**, 41–43 [in Russian].
5. Paerand, Yu.E., Bondarenko, A.F. (2005) Peculiarities of formation of current pulses for small-size parts. *Tekhnichna Elektrodynamika. Tem. Issue: Power Electronics and Power Efficiency*, Pt 3, 28–31 [in Russian].
6. Paerand, Yu.E., Bondarenko, A.F. (2006) Application of special shape pulses for resistance microwelding. In: *Proc. of 7th Int. Sci.-Pract. Conf. on Modern Information and Electronic Technologies (MIET-2006)*, Vol.2. Odessa, SE Neptun, Tekhnologiya.
7. Paerand, Yu.E., Bondarenko, A.F. (2006) Power supply for resistance microwelding with programmable shape of welding pulse. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoj Apparature*, **4**, 51–54 [in Russian].
8. Lankin, Yu.N. (1967) Electromodeling of thermal processes in resistance spot welding. *Avtomatich. Svarka*, **7**, 23–26 [in Russian].
9. Lebedev, V.K., Yavorskiy, Yu.D. (1960) Application of similarity criteria for determination of resistance welding modes. *Ibid.*, **8**, 37–44 [in Russian].
10. Paton, B.E., Lebedev, V.K. (1969) *Electric equipment for resistance welding. Theory elements*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
11. Paton, B.E., Gavrish, V.S., Grodetzky, Yu.S. (1963) Inertialess diagrams of automatic regulation of resistance welding processes. *Avtomatich. Svarka*, **5**, 7–10 [in Russian].
12. Leonov, V.P., Barabanshchikova, L.A., Grechenkova, A.A., Ataush, V.E. (1990) Controllable power supply SARM-1 for resistance microwelding. *Svarochn. Proizvodstvo*, **10**, 36–38 [in Russian].

REQUIREMENTS TO TECHNICAL CHARACTERISTICS OF RESISTANCE MICROWELDING MACHINES

Yu.M. Lankin

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: lankin.y.n@gmail.com

Welding of up to 0.5 mm thick parts is usually called microwelding. Resistance microwelding is widely applied in electronics and instrument-making. Thermal inertia of welded parts at resistance welding is proportional to the square of their thickness. As a result of low thermal inertia of parts at microwelding, the change of their temperature is close to the change in time of welding current of 50 Hz industrial frequency. In order to eliminate the ripple, resistance microwelding should be conducted by direct current pulses or high-frequency welding current. At microwelding the initial part-part contact resistance is tens of times higher than that of the parts being welded. To reduce the initial splashes of molten metal and stabilize the welded joint quality, the welding current should increase smoothly at microwelding. 12 Ref., 2 Tabl.

Keywords: resistance microwelding, similarity theory, thermal inertia, welding current frequency, typical welding modes

Надійшла до редакції 01.09.2021