

УДК 621.791.763

В.В. Кочубей, Р.М. Рижов, П.Ю. Сидоренко

**ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ, ВИКОНАНИХ ТОЧКОВИМ КОНТАКТНИМ ЗВАРЮВАННЯМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЗОВНІШНІХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ДІЙ**

The paper reveals investigation results of effect of external electromagnetic fields on mechanical properties of welded joints produced by resistance spot welding. Results of research of external electromagnetic fields effect on the mechanical properties of constructive and stainless steels and joints made from different materials were presented. Samples which are suitable for performing static-load tests of spot welding for the minimization of data misrepresentation were proposed and the analysis was performed. The results of shear and peel tests for different thickness samples made from structural steel St3, stainless steel 12X18H10T were presented as well as those for different joints made from these materials. The tendencies of changes of mechanical properties for joints made from structural and stainless steels and for those made from different metals for different thicknesses and for different values of the external magnetic field induction were presented. Basing on the analysis of data obtained during the static-load tests the range of values of the external magnetic field was determined which allows producing the welded joints with the highest effect on their mechanical properties. The application of external electromagnetic fields in the spot welding with the optimal value of magnetic field induction of constructive and stainless steels and joints made from materials with different thickness allows increasing shear strength up to 10 % and tear strength – up to 50 %.

**Keywords:** resistance spot welding, external electromagnetic fields, static load tests, mechanical properties of the joints.

**Вступ**

Механічні властивості є одними з найважливіших характеристик зварних з'єднань, виконаних будь-якими способами зварювання. Вони віддзеркалюють якість з'єднань з точки зору експлуатаційної надійності зварних вузлів.

При дуговому зварюванні одним зі способів підвищення механічних властивостей з'єднань є застосування зовнішніх електромагнітних дій (ЕМД). Їх суть полягає в створенні силового впливу на розплав при взаємодії в об'ємі ванни зварювального струму із зовнішнім керуючим магнітним полем (КМП) [1].

Відомі також позитивні результати застосування зовнішніх електромагнітних дій при точковому контактному зварюванні (ТКЗ) конструкційних і нержавіючих сталей, а також з'єднань, складених із матеріалів з різними фізико-хімічними властивостями [2, 3]. Особливістю створення ЕМД у цих умовах є генерування поперечного зустрічно-симетричного електромагнітного поля в зоні формування зварної точки та його взаємодії зі зварювальним струмом, унаслідок чого виникають сили, що обертають розплав у вертикальній площині, перпендикулярній відносно магнітних потоків. При цьому відбувається керування формуванням зварних з'єднань, вплив на процес кристалізації зварних точок, поліпшення їх механічних властивостей.

Для визначення механічних властивостей зварних з'єднань, виконаних дуговими способами зварювання, відносно легко вибрати зразки з необхідними для випробувань конструктивними параметрами. При цьому стандартизовані групи механічних показників (границі міцності  $\sigma_b$ , границі текучості  $\sigma_T$  тощо), що визначаються для різних складових з'єднання (ділянки зварного шва, зони термічного впливу), дають змогу проводити порівняльний аналіз різних типів зварних швів, однозначно оцінювати вплив технологічних прийомів, що застосовуються при зварюванні.

**Постановка задачі**

Механічні випробування зварних з'єднань, виконаних ТКЗ, через характерні особливості зварної точки не дають змоги отримати аналогічні результати. Їх міцність визначають випробуваннями контрольних зразків на зріз і на відрив (ГОСТ 6996–66). При цьому фіксують руйнівне навантаження на точку. Для різних товщин і для різних матеріалів величина цього навантаження зазвичай різна, що пояснюється відмінностями у структурі та геометричних параметрах зварних точок. Привести отримані дані до стандартизованих механічних показників неможливо внаслідок дії комплексу зусиль на зразок під час випробувань. Через зазначені складнощі в літературі відсутній порівняльний

аналіз різних зварних з'єднань, отриманих за допомогою ТКЗ.

З урахуванням зазначеного метою роботи є визначення механічних властивостей з'єднань, отриманих ТКЗ із застосуванням зовнішніх ЕМД за різних методик випробування та різних індукцій КМП.

### Методика проведення досліджень

У досліджах використовували магнітну систему (рис. 1), конструкція якої наведена в [2]. Це дало можливість, на відміну від застосованих постійних магнітних полів [4], надавати обертального руху розплаву вздовж усієї бічної поверхні ядра з'єднання.

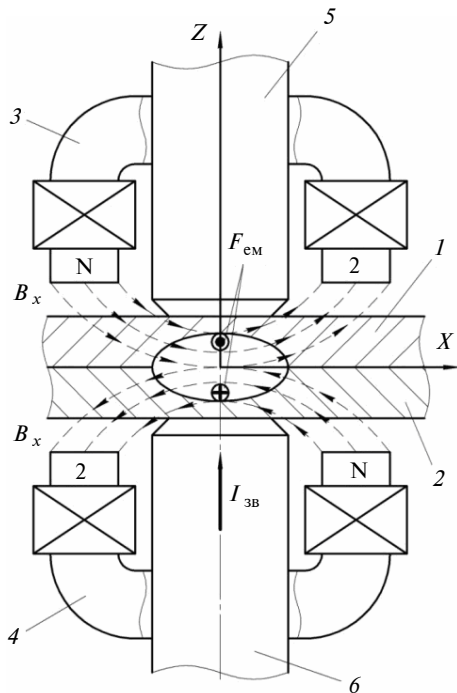


Рис. 1. Схема процесу: 1, 2 – деталі, що зварюються; 3, 4 – електромагніти; 5, 6 – електродами машини;  $B_x$  – радіальна складова керуючого магнітного поля;  $I_{зв}$  – зварювальний струм;  $F_{ем}$  – електромагнітна сила

Струм намагнічування ( $I_{ем}$ ) через котушки електромагнітів змінювали в межах 0–5 А, що давало змогу отримувати величину індукції КМП поблизу границі ядра зварної точки в діапазоні 5–7 мТл.

Зварювання проводили на машині для точкового контактного зварювання МТ-1215, оснащеної регулятором циклу зварювання РКС-801. Чотириполюсну електромагнітну систему встановлювали симетрично відносно елек-

тродів зварювальної машини. Товщина зразків із конструкційної сталі Ст3 і нержавіючої сталі 12Х18Н10 становила 0,8; 1,0 і 1,5 мм. Параметри режимів зварювання наведені у таблиці.

Таблиця. Параметри режимів зварювання

Матеріал	Товщина зразків, мм	Зварювальний струм, кА	Час зварювання, с	Зусилля стискання, ДаН
Ст3 + Ст3	0,8	6,9–7,1	0,16–0,2	250
	1,0	7,3–7,5	0,18–0,24	
	1,5	9,5–9,8	0,92–1	600
12Х18Н10 + 12Х18Н10	0,8	4,9–5,2	0,18–0,24	350
	1	4,9–5,2	0,2–0,26	
Ст3 + 12Х18Н10	0,8	4,9–5,2	0,18–0,24	350
	1	4,9–5,2	0,26–0,3	

При проведенні досліджень використовувалися зразки для механічних випробувань кількох типів, як рекомендовані [5], так і новорозроблені (рис. 2). Визначення механічних властивостей зварних з'єднань проводились на універсальній випробувальній установці TIRA test-2300 при статичному навантаженні.

Для випробування на зріз були використані зразки зварені з напуском (рис. 2, а). Величина напуску та ширина зразків товщиною 1,5 мм становила 25 мм, зразків товщиною 0,8–1,0 мм – 20 мм. Наявність напуску зумовлювала виникнення додаткового ексцентричного навантаження. В результаті відбувався вигин зразків, що спричиняв дію на зварну точку, крім зусилля зрізу, зусилля відриву. Величина вигину і, відповідно, зусилля відриву залежала від жорсткості зразка в місці з'єднання. Унаслідок цього при статичних випробуваннях напускних з'єднань виконаних ТКЗ неможливо забезпечити навантаження зразків у заданому напрямку, а отже, привести отримані дані до стандартних механічних показників.

Проведення випробувань зразків типу І (рис. 2, в) на відрив показало, що в зоні з'єднання завжди виникає значний вигин пластин. При цьому точки руйнувались не тільки від зусилля відриву, а й від напружень вигину при деформуванні зразків у процесі навантаження. Збільшення товщини матеріалу пластин приводило до зменшення вигину внаслідок відповідного збільшення жорсткості горизонтальної частини зразків у місці руйнування. В процесі пошукових досліджень виявлено значний розкид отриманих даних, що пояснюється наявністю неконтрольованих напружень вигину.

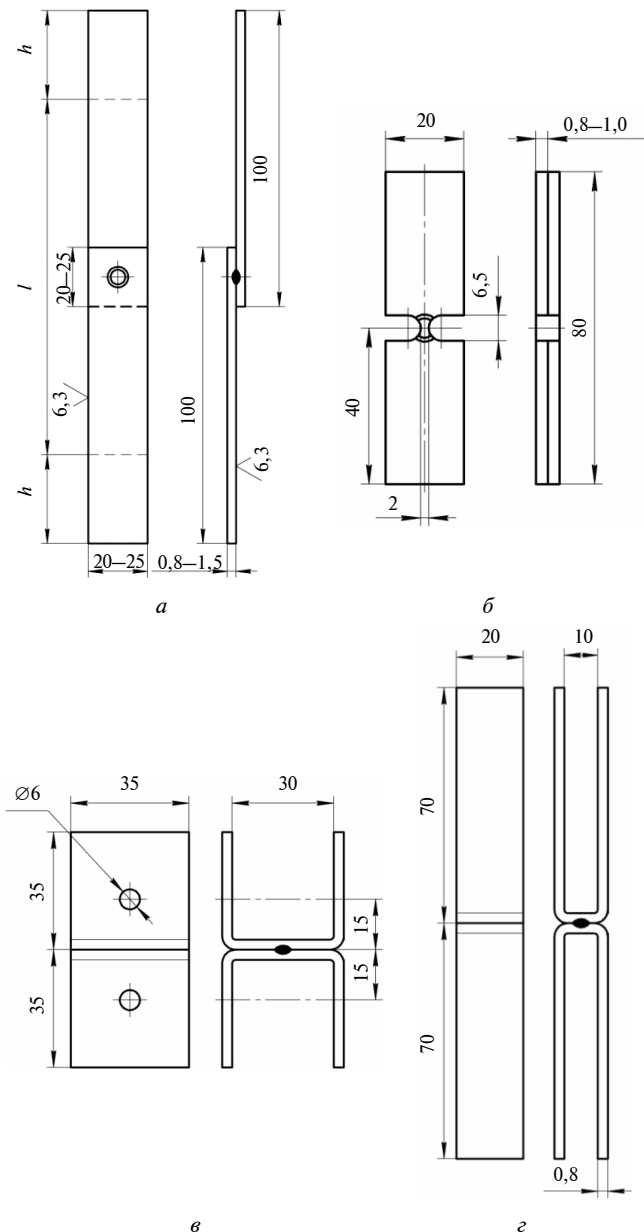


Рис. 2. Типи зразків для статичних випробувань: *a* – на зріз; *б* – на розрив; *в* – на відрив, тип I; *г* – на відрив, тип II; *h* – довжина захвату випробувальної машини; *l* – довжина робочої частини зразка

Для зменшення вигину зразків при навантаженні, а отже, і зменшення розкиду значень даних розроблено зразки типу II (рис. 2, *г*). Після зварювання пластин унапуск їм надавали П-подібної форми для подальшого закріплення в затискних пристроях випробувальної установки. Ділянка зразка зі зварною точкою фіксувалась таким чином, щоб унеможливити будь-який механічний вплив на зону зварювання при його формуванні. В затискні при-

строї випробувальної установки зразки встановлювались зі спеціальною вставкою, яка запобігала деформаціям їх бічних частин при затисканні. Крім того, вказана вставка надає додаткової жорсткості горизонтальній частині зразка. В такий спосіб зменшувався вигин зразка, і, відповідно, руйнівні напруження зводились до мінімуму. Ці заходи дали змогу істотно зменшити розкид даних з'єднань, отриманих ТКЗ, при випробуваннях на відрив.

Для визначення впливу зовнішнього КМП різної індукції на експлуатаційні властивості зварної точки розроблено зразок для випробувань на розрив (рис. 2, *б*). За допомогою зразків такого типу визначались механічні властивості всього об'єму металу, який під час зварювання перебував під термомеханічним впливом. Особливістю їх конструкції є те, що розривне зусилля прикладалося тільки до зони, що обмежена розмірами зварної точки.

Для всіх проведених дослідів була визначена стабільність процесу зварювання як відношення різниці найбільшого і найменшого руйнівного зусилля точок до середнього його значення у даній серії зразків [5]. Діапазон стабільності для всіх випробувань був у межах 0,1–0,21. Тому можна стверджувати, що зварювання виконується досить стабільно.

### Результати досліджень

Результати статичних випробувань зварних зразків, виконаних із конструкційної сталі Ст3, нержавіючої сталі 12Х18Н10 та різнорідних з'єднань із цих матеріалів, отриманих за допомогою ТКЗ із застосуванням зовнішніх електромагнітних дій, наведено на рис. 3–5.

У процесі досліджень зафіксовано зростання величини руйнівного зусилля на зріз  $P_{зріз}$  зі збільшенням струму намагнічування  $I_{ем}$  через котушки електромагнітної системи в діапазоні 0–5 А (рис. 3, *а*). При цьому збільшення зазначеного показника відбувалось нерівномірно. Так, при збільшенні  $I_{ем}$  від 0 до 3 А величина  $P_{зріз}$  зростає в середньому на 4 % відносно вихідних умов. Збільшення  $I_{ем}$  до 4 А призводить до різкого збільшення  $P_{зріз}$  на 3 % відносно попереднього його значення. Подальше збільшення струму намагнічування електромагніту зумовлює незначне (менше 0,5 %) збільшення руйнівного зусилля. На основі цього можна зробити висновок, що збільшення струму намагнічування більше 5 А, а отже, величини ін-

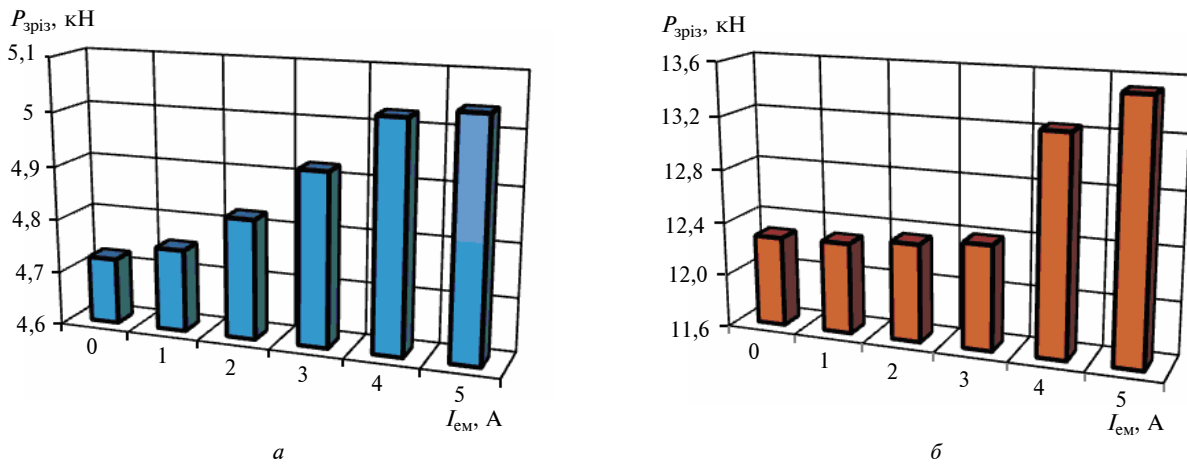


Рис. 3. Руйнівне зусилля на зріз зразків зі сталі Ст3, отриманих ТКЗ за різних струмів намагнічування: *а* – товщина 1 + 1 мм, *б* – товщина 1,5 + 1,5 мм

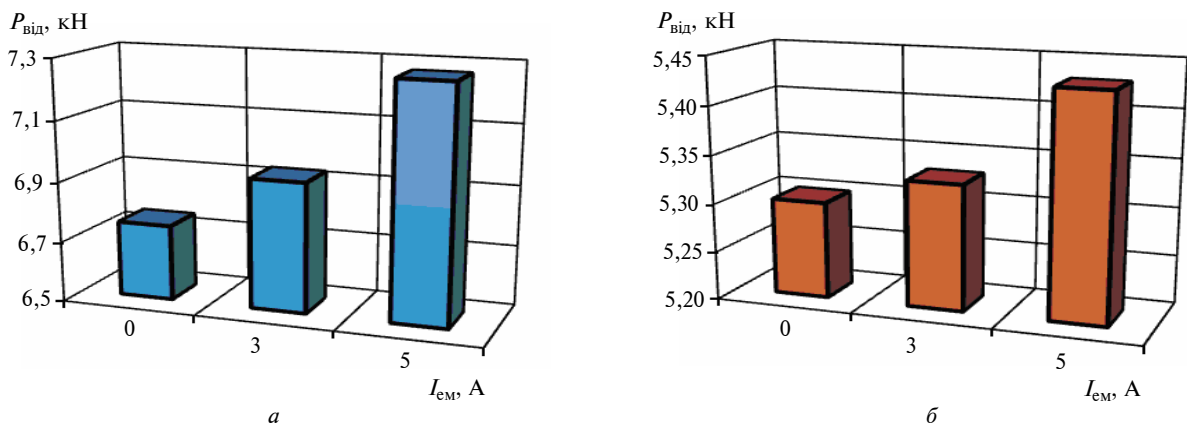


Рис. 4. Руйнівне зусилля зварної точки на зріз, зразків зі сталі товщиною 1 мм, отриманих ТКЗ за різних струмів намагнічування: *а* – 12X18H10 + 12X18H10; *б* – Ст3 + 12X18H10

дукції магнітного поля в зоні зварювання більше 7 мТл, не призведе до істотних змін механічних властивостей з'єднань. Загальне збільшення  $P_{\text{зріз}}$  зразків, зварених із ЕМД, становить у середньому 6,5 % порівняно зі зразками, звареними за штатною технологією.

Характер змін величини  $P_{\text{зріз}}$  зразків зі сталі Ст3 товщиною 1,5 мм аналогічний відносно зразків товщиною 1 мм (рис. 3, б). Зафіксовано плавне зростання досліджуваного показника на 1 % при зростанні струму намагнічування до 3 А, подальше зростання до 7 % при 4 А та уповільнення до 3 % при 5 А відносно попереднього значення руйнівного зусилля. Загальне збільшення  $P_{\text{зріз}}$  у цьому випадку становить 10 % порівняно зі зразками, звареними за штатною технологією.

Аналогічний характер залежності величини  $P_{\text{зріз}}$  від  $I_{\text{ем}}$  мають зразки, що виконані із

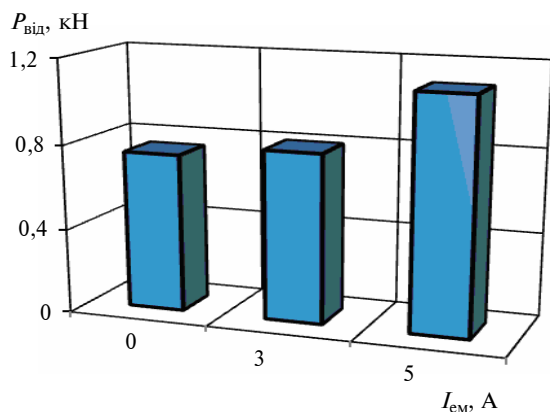
нержавіючої сталі 12X18H10, та зразки, складені зі сталей Ст3 і 12X18H10 (рис. 4).

Випробування зварних точок на відрив зразків, виконаних із конструкційної сталі Ст3, нержавіючої сталі 12X18H10 і різномірних з'єднань із цих матеріалів, проводили на разках типу II. Отриманим залежностям притаманні тенденції, виявлені при випробуваннях зразків на зріз (рис. 5).

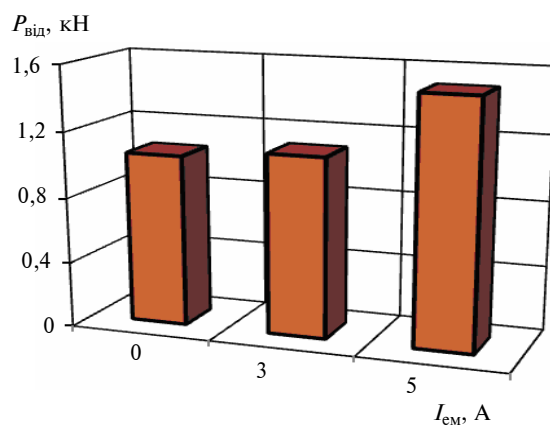
Загальне збільшення руйнівного зусилля на відрив у цьому випадку становить: 46 % – для зразків із сталі Ст3; 42 % – для зразків із нержавіючої сталі 12X18H10; 50 % – для зразків із різномірних матеріалів Ст3 + 12X18H10.

Зразки типу I використано для випробувань на відрив зварних з'єднань зі сталі Ст3, товщиною 1,5 мм. Залежність руйнівного зусилля від струму електромагніта в цьому випадку подібна до отриманих раніше. Однак для цієї залежності притаманна деяка нерівномірність

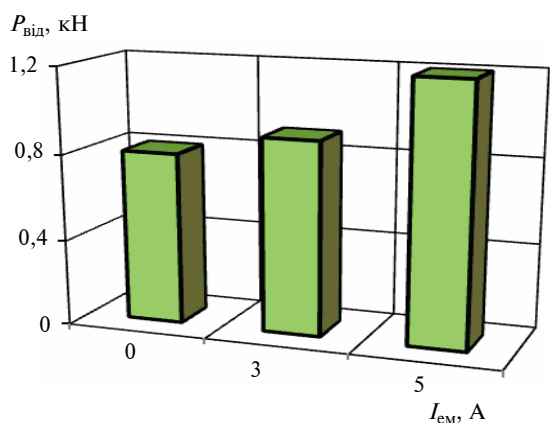
отриманих даних. Це пояснюється спотворенням отриманих результатів напруженнями вигину при деформації зразків у процесі навантаження.



a



б



в

Рис. 5. Руйнівне зусилля на відрив зразків товщиною 0,8 + 0,8 мм: а – Ст3+Ст3; б – 12X18H10 + 12X18H10; в – Ст3 + 12X18H10

Для виявлення залежності механічних властивостей зварних з'єднань від енергії, що вкладається, та величини індукції КМП були

проведені випробування на розрив зразків, наведених на рис. 2, б, товщиною 1 мм із матеріалів, використаних у попередніх дослідженнях. За результатами випробувань отримували значення питомого навантаження на метал зварного з'єднання, який під час зварювання перебував під термомеханічним впливом. У процесі досліджень встановлено зростання контрольованого параметра зі зростанням величини індукції КМП. Найбільше зростання цього параметра (близько 100 %) зафіксовано у зварних зразків із конструкційної сталі Ст3 при найкоротшому часі зварювання. У випадку використання зразків із нержавіючої сталі 12X18H10 вплив ЕМД на механічні характеристики зварних з'єднань значно менший, що може бути пояснено меншою величиною теплопровідності матеріалу порівняно зі Ст3. Для зразків із різномірних матеріалів значення зростання величини питомого навантаження металу приблизно у два рази більше, ніж у зразків із нержавіючої сталі. Таким чином, найбільший ефект від застосування ЕМД проявляється при зварюванні на "жорстких" (мінімальний час зварювання) режимах зразків із матеріалів з більшою теплопровідністю.

На основі аналізу отриманих експериментальних даних та беручи до уваги ефект покращення механічних властивостей виконаних ТКЗ унаслідок збільшення геометричних розмірів зварної точки [6], можна зробити висновок, що застосування зовнішнього керуючого магнітного поля дає змогу збільшувати діаметр зварної точки, що своєю чергою покращує механічні властивості зварного з'єднання.

### Висновки

При випробуваннях на зріз доцільним є використання зразків з мінімальною довжиною частини, яка містить зварну точку, що сприяє зменшенню негативного впливу від напружень вигину при деформуванні зразків у процесі навантаження та зменшенню спотворення експериментальних даних.

Застосування зовнішніх електромагнітних дій при ТКЗ із оптимальним значенням індукції магнітного поля конструкційних та нержавіючих сталей і з'єднань з різномірних матеріалів різної товщини дає можливість збільшити руйнівне зусилля на зріз до 6–10 %, а руйнівне зусилля на відрив – до 50 %.

Максимальне покращення механічних властивостей з'єднань, отриманих точковим кон-

тактним зварюванням з електромагнітними діями, досягається при індукції на границі зварної точки до 7 мТл, що відповідає струмам намагнічування електромагнітної системи до 5 А.

Подальший розвиток цього напрямку робіт потребує дослідження впливу зовнішніх електромагнітних дій на структуру металу характерних зон зварної точки.

1. *Рижов Р.М., Кузнецов В.Д.* Магнітне керування якістю зварних з'єднань. – К.: Екотехнологія, 2010. – 287 с.
2. *Застосування зовнішніх електромагнітних дій для керування формуванням швів при точковому контактному зварюванні / Р.М. Рижов, В.В. Кочубей, С.М. Назарук та ін. // Технолог. системи. – 2011. – № 3. – С. 90–92.*
3. *Рыжов Р.Н., Кочубей В.В., Швец В.И.* Оценка влияния внешних электромагнитных воздействий на неоднородность соединений при точечной контактной сварке // Там же. – 2012. – № 4. – С. 40–42.
4. *Попов В.А.* Влияние магнитного поля на формирование соединения при контактной точечной сварке // Сварочное производство. – 1992. – № 10. – С. 28–29.
5. *Контроль точечной и роликовой электросварки / Б.Д. Орлов, П.Л. Чулошников, В.Б. Верденский, А.Л. Марченко. – М.: Машиностроение, 1973. – 304 с.*
6. *M. Pouranvari and S.P.H. Marashi*, “Failure mode transition in AISI 304 resistance spot welds”, *Welding J.*, vol. 91, pp. 303–309, 2012.

Рекомендована Радою  
зварювального факультету  
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
14 жовтня 2013 року