

УДК 519.816: 004.9+519.6

DOI: 10.20535/1810-0546.2017.6.99680

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

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ЗОВНІШНІХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ДІЙ ПРИ ТОЧКОВОМУ КОНТАКТНОМУ ЗВАРЮВАННІ ДЕТАЛЕЙ З ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ СТАЛІ Р6М5

Background. Joining of working part of the instrument using mechanical methods or brazing doesn't ensure its good fixation and isn't technologically reasonable for mass production purposes. This problem can be solved by application of electromagnetic forces for resistance welding methods based on physical effect on joint formation process.

Objective. The aim of the paper is estimation of technological possibilities of resistance spot welding with electromagnetic stirring for joining of instrumental steels.

Methods. Transversal opposite-symmetric magnetic field is generated in the working zone. It has equal value but opposite direction of magnetic induction relative to contact plane of parts to be joined for stirring of molten metal with ponderomotive forces.

Results. Positive changes of parameters of joint formation were detected. They define mechanical properties of joints. Control of molten metal hydrodynamics resulted in decreasing of sponginess-type imperfections in the central area of the nut. It was shown that changes in thermal processes, leading to decreasing of cooling speed, result in decrease of hardened structures in the moulded zone which, in turn, results in decreasing of microhardness of structure elements.

Conclusions. Reasonability and effectiveness of application of electromagnetic forces for resistance spot welding of instrumental steels was proven.

Keywords: instrumental steels; resistance spot welding; external electromagnetic forces; ponderomotive forces; mechanical properties.

Вступ

У сучасному промисловому виробництві при монтажі та відновленні деталей та елементів конструкцій застосовують різноманітні способи зварювання, серед яких точкове контактне є одним із найбільш продуктивних. Досить часто необхідним є створення з'єднань із матеріалів з обмеженою здатністю до зварювання або таких, що, як вважається, не зварюються взагалі. До цих матеріалів належить інструментальна, швидкорізальна сталь Р6М5, яка широко використовується для виготовлення різального інструмента в металообробній промисловості. Його конструкція може бути складена з декількох елементів. При цьому робоча частина може приєднуватися механічно або за допомогою паяння. Перший спосіб не забезпечує надійності фіксації, а другий є нетехнологічним в умовах масового виробництва. Тому актуальним є розв'язання зазначеної задачі за допомогою зварювання.

Відомо, що сталь Р6М5 після нагрівання до температури плавлення та відносно швидкого охолодження схильна до утворення в литій зоні та зоні термічного впливу структур загартовування, наявність яких може спричинити крихке руйнування вузла. Застосування традицій-

них способів зварювання деталей із зазначеної сталі не забезпечує належної якості з'єднання і потребує додаткових витрат технологічного часу для проведення обов'язкової додаткової термообробки. Це своєю чергою негативно позначається на собівартості продукції, знижує продуктивність процесу.

Останнім часом було розроблено нові способи зварювання, що ґрунтуються на додаткових методах фізичного впливу на процеси утворення з'єднань. Вони дають змогу отримати покращену структуру литого металу порівняно із традиційними способами [1]. Так, застосування способу точкового контактного зварювання (ТКЗ) із зовнішніми електромагнітними діями (ЕМД) при зварюванні деталей із конструкційних і нержавіючих сталей дає можливість істотно покращити експлуатаційні характеристики з'єднань, зменшити енерговитрати на утворення точок із заданими геометричними розмірами [2–4].

Постановка задачі

Метою роботи є визначення технологічних можливостей способу ТКЗ із ЕМД в умовах створення з'єднань з інструментальних сталей.

*corresponding author: p.sydoenko@kpi.ua

Методика проведення досліджень

У дослідах, для перемішування всього об'єму розплаву точки пондеромоторними силами, в робочій зоні генерували поперечне зустрічно-симетричне керуюче магнітне поле (КМП), яке характеризується однаковою величиною і протилежним напрямком вектора магнітної індукції відносно площини контактування деталей [2]. При цьому в розплаві формуються потоки, що переміщуються уздовж всієї поверхні ядра зварного з'єднання. До того виключається можливість утворення зустрічних вихорів у його поперечній площині [5, 6].

Реалізація таких електромагнітних дій здійснювалась із використанням чотиріполюсної електромагнітної системи, яка встановлювалась на електродах зварювальної машини співвісно до них [7].

При проведенні експериментальних досліджень використовувались електроди конічної форми як найбільш вживані у промислових умовах виготовлення зварних вузлів за допомогою ТКЗ [8]. За рекомендаціями літературних джерел, матеріалом електродів була вибрана бронза марки БрХ07 [9]. Діаметр робочої поверхні електродів становив 7 мм.

Парметри режимів зварювання сталі Р6М5 були такі: товщина зразків – 1,5 мм, зварювальний струм – 11 кА, час зварювання – 1 с, зусилля стискання – 500 даН.

Результати досліджень

Відомо, що механічні властивості зварного з'єднання безпосередньо залежать від геометричних розмірів ядра точки, особливо від її діаметра. Тому при виконанні ТКЗ цей параметр повинен підтримуватися стабільним на рівні, не меншому за регламентований стандартом [10]. Ступінь впливу висоти зварної точки на механічні властивості зварного з'єднання на сьогоднішній день остаточно не з'ясований. Однак її величина також є регламентованою і повинна становити 20–80 % від товщини зварного з'єднання. При ТКЗ за штатною технологією найбільший вплив на формування геометричних параметрів ядра зварної точки мають енергетичні параметри режиму – зварювальний струм і час зварювання.

У ході проведення експериментів щодо вивчення впливу зовнішнього КМП на формування з'єднань з інструментальної швидкорі-

зальної сталі Р6М5 при ТКЗ фіксували зміни геометричних розмірів зварних точок (діаметр $d_{я}$ і висоту $h_{я}$ ядра) від величини індукції КМП. Величину поперечної складової індукції в зоні зварювання регулювали змінами струму намагнічування електромагнітної системи.

Виявлено збільшення на 16 % діаметра ядра зварної точки за індукції КМП на її периферії близько 6 мТл порівняно з такою ж величиною, отриманою за штатних умов зварювання. При цьому спостерігалось пропорційне зменшення висоти ядра точки приблизно на таку ж величину (рис. 1). Такий ефект пояснюється змінами внаслідок керування гідродинамікою розплаву процесу поширення теплоти. Тобто при застосуванні ЕМД збільшується тепловий потік у горизонтальній площині через зварювані деталі [7]. Слід зазначити, що в цілому схожі результати було отримано в процесі аналогічних досліджень при зварюванні нержавіючих і конструкційних сталей [11]. Також слід відзначити, що при застосуванні таких електромагнітних дій у дугових способах зварювання зафіксовано аналогічні за характером, але більші за величиною зміни геометричних параметрів з'єднань [12]. Це пояснюється швидкоплинністю процесу ТКЗ, унаслідок чого гідродинамічні явища не встигають розвинути повною мірою.

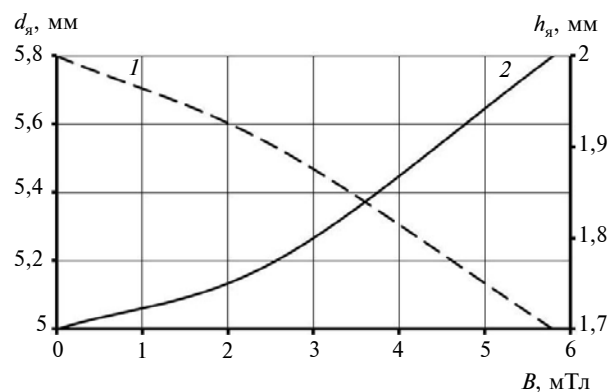


Рис. 1. Вплив індукції КМП на геометричні параметри точки при зварюванні зразків зі сталі Р6М5: 1 – діаметр ядра точки; 2 – висота ядра точки

Таким чином, можна стверджувати, що при зварюванні зразків зі сталі Р6М5 на рекомендованих штатних режимах ТКЗ застосування зовнішніх ЕМД призводить до збільшення діаметрів зварних точок при деякому зменшенні їх висоти. Оскільки механічні характеристики з'єднань в основному залежать від діаметра зварної точки, то можна очікувати підвищення їх значень.

Металографічні дослідження показали наявність у центральній частині ядра зразків зі сталі Р6М5, зварених без ЕМД, дефектів у вигляді усадочних раковин і рихлості металу (рис. 2, *a*).

Зазвичай для запобігання появи дефектів такого роду рекомендовано застосовувати збільшене кувальне зусилля [10]. При цьому для запобігання великій швидкості охолодження металу зварної точки застосовують імпульс підігріву по закінченні часу проходження зварювального струму [13]. Це потребує використання спеціальних блоків керування циклом зварювання та наявності у складі установки для ТКЗ трикамерного приводу стискання.

Застосування зовнішнього КМП при ТКЗ деталей зі сталі Р6М5 привело до істотного зменшення зони рихлот у центральній частині з'єднання (рис. 2, *б*). Це можна пояснити зміною умов кристалізації рідкого металу ядра зварної точки внаслідок перерозподілу температур у її об'ємі. Такий перерозподіл відбувається унаслідок більш інтенсивного перемішування розплаву ядра, ніж при штатній технології.

Слід зазначити, що схожі результати були отримані при ТКЗ з ЕМД, створеними постійними магнітами, зразків аустенітної безнікелевої сталі 12Х13Г18Д [14]. При цьому було зафіксовано підвищення ударної в'язкості та збільшення довговічності роботи отриманих з'єднань.

Мікроструктура металу шва зразка, звареного без впливу магнітного поля, являє собою безструктурний мартенсит і карбіди (рис. 3, *a*). Їх виділення відбувається границями комірок, а також у вигляді евтектичних утворень. Середній діаметр комірок у центрі ядра становить 2,5–5 мкм. У мартенситній матриці спостерігаються, імовірно, частинки інтерметалідів. На периферії литої зони ядра відбувається незначне укрупнення розміру комірок до середнього діаметра 7,7–10 мкм.

Фазовий склад зразків, зварених із застосуванням зовнішнього магнітного поля, аналогічний зразкам, звареним за штатною технологією (рис. 3, *б*). Однак у металі литого ядра границями комірок виділяється більше карбідної евтектики, а виділення інтерметалідів мають більш протяжну форму. При цьому середній діаметр комірки у центрі точки збільшується в два рази та майже не змінюється на її периферії.

Таким чином, застосування зовнішніх ЕМД при ТКЗ дає змогу істотно впливати на процеси кристалізації швів.

Експлуатаційні можливості зварних конструкцій значною мірою залежать від механіч-

них властивостей з'єднань, наприклад від мікротвердості литої зони.

*a**б*

Рис. 2. Загальний вигляд литого ядра зварного з'єднання Р6М5+Р6М5, отриманого: *a* – за штатною технологією, *б* – із застосуванням ЕМД; $\times 25$

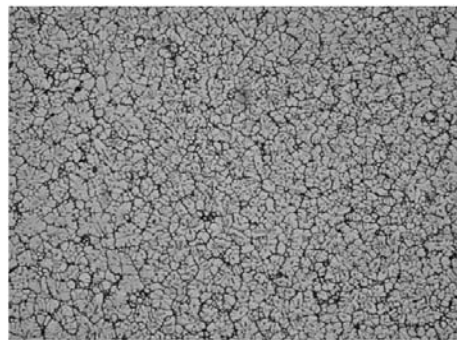
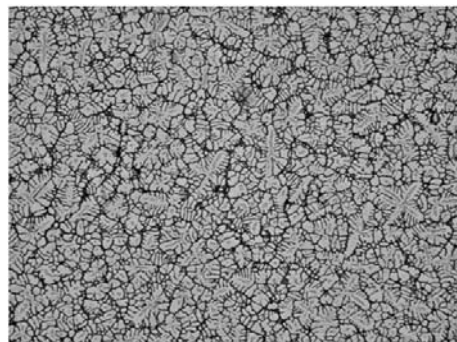
*a**б*

Рис. 3. Мікроструктура центральної частини литого ядра з'єднання Р6М5+Р6М5, звареного: *a* – за штатною технологією, *б* – із застосуванням ЕМД; $\times 500$

Відповідні дослідження здійснювали за методом відновленого відбитка мікротвердоміром, оснащеним алмазною чотиригранною пірамідою з квадратною основою вздовж лінії сплавлення зварного з'єднання (рис. 4).

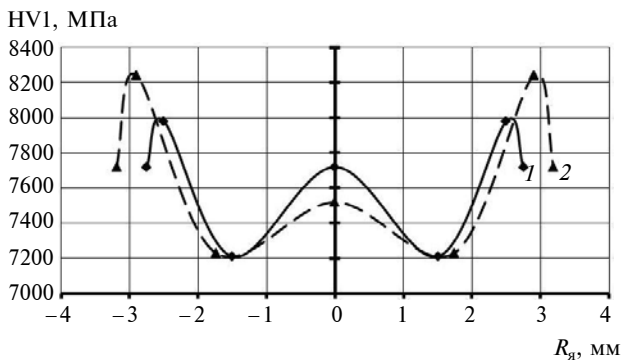


Рис. 4. Розподіл мікротвердості вздовж лінії сплавлення зварного з'єднання із швидкорізальної сталі Р6М5, отриманого: 1 – за штатною технологією, 2 – із застосуванням ЕМД

У випадку застосування ТКЗ з ЕМД спостерігали зменшення мікротвердості вздовж всієї лінії сканування. Зменшення зазначеного параметра в центральній зоні ядра становило 2,5 %. У периферійних областях точки спостерігали незначне збільшення контрольованої величини. У зоні, віддаленій від вертикальної осі симетрії точки на $R_{я}/2$, мікротвердість зміню-

валась незначно. Це можна пояснити перерозподілом температурних зон в об'ємі ядра точки через перемішування рідкого металу.

Таким чином, застосування зовнішніх ЕМД при ТКЗ дає змогу зменшити мікротвердість металу зварної точки, що позитивно впливає на механічні характеристики з'єднання в цілому. Схожі результати були отримані при застосуванні імпульсних ЕМД при точковому зварюванні [15].

Висновки

Інтенсивне безвихрове перемішування завдяки ЕМД розплаву ядра зварного з'єднання із швидкорізальної інструментальної сталі Р6М5 призводить до розмивання його границь, наслідком чого є збільшення на 16 % діаметра точки при деякому зменшенні її висоти.

Застосування зовнішніх ЕМД при ТКЗ дає змогу запобігти появі дефектів кристалізації металу точки без застосування спеціалізованого зварювального обладнання, що розширює технологічні можливості серійного обладнання для ТКЗ.

Подальші дослідження доцільно вести в напрямі виявлення впливу ЕМД на механічні властивості з'єднання з інструментальної швидкорізальної сталі Р6М5.

Список літератури

1. *Спосіб* точкового контактного зварювання із застосуванням зовнішніх електромагнітних дій: Пат. на корисну модель 80278 Україна, МПК В23К 11/11 (2006.01) / Р.М. Рижов, В.В. Кочубей, С.О. Нестуля; заявник та патентовласник Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". – № u2012 12196; Заявл. 24.10.12; Опубл. 27.05.13, Бюл. № 10/2013.
2. *Рижов Р.Н., Кочубей В.В., Швець В.И.* Оценка влияния внешних электромагнитных воздействий на микронеоднородность соединений при точечной контактной сварке // Технологические системы. – 2012. – № 4. – С. 40–42.
3. *Рижов Р.М., Кочубей В.В., Швець В.И.* Оцінка впливу зовнішніх електромагнітних дій на микронеоднорідність з'єднань при точковому контактному зварюванні // V Всеукр. міжгалузева наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та наукових співробітників "Зварювання та споріднені технології", 18–20 квітня, Київ. – К., 2012. – С. 167–168.
4. *Кочубей В.В., Рижов Р.М., Сидоренко П.Ю.* Визначення механічних властивостей зварних з'єднань, виконаних точковим контактним зварюванням із застосуванням зовнішніх електромагнітних дій // Наукові вісті. – 2014. – № 1. – С. 58–63.
5. *Пристрій* для оцінки інтенсивності гідродинамічних процесів при точковому контактному зварюванні з зовнішніми електромагнітними діями: Пат. на корисну модель 73411 Україна, МПК В23К 11/11 (2006.01) / Р.М. Рижов, В.В. Кочубей, С.О. Нестуля, М.Ф. Ляшик; заявник та патентовласник Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". – № u2012 02179; Заявл. 24.02.12; Опубл. 25.09.12, Бюл. № 18/2012.
6. *Спосіб* оцінки інтенсивності гідродинамічних процесів в розплаві зварної точки при контактному точковому зварюванні: Пат. на корисну модель 73412 Україна, МПК В23К 11/11 (2006.01) / Р.М. Рижов, В.В. Кочубей, С.О. Нестуля, М.К. Вдовиченко; заявник та патентовласник Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". – № u2012 02180; Заявл. 25.09.12; Опубл. 27.05.13, Бюл. № 18/2012.
7. *Застосування* зовнішніх електромагнітних дій для керування формуванням швів при точковому контактному зварюванні / Р.М. Рижов, В.В. Кочубей, С.М. Назарук та ін. // Технологические системы. – 2011. – № 3(56). – С. 90–92.
8. *Слиозберг С.К., Чулошников П.Л.* Электроды для контактной сварки. – М.: Машиностроение, 1972. – 96 с.

9. Слиозберг С.К., Михайлова Э.М., Гинзбург С.К. Выбор сплава для электродов точечных машин для сварки низкоуглеродистых сталей // Автоматическая сварка. – 1971. – № 3. – С. 40–42.
10. Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы и размеры: ГОСТ 15878-79. – [Действует с 1980-01-07]. – М.: Ордена “Знак Почета” изд-во стандартов, 1979. – 11 с.
11. Особенности формирования соединений при точечной контактной сварке с внешними электромагнитными воздействиями / В.В. Кочубей, Р.Н. Рыжов, Е.П. Чвертко и др. // Вестник КарГТУ. Сер. Машиностроение. – 2014. – № 3(56). – С. 27–31.
12. Рижов Р.М., Кузнецов В.Д. Магнітне керування якістю зварних з'єднань. – К.: Екотехнологія, 2010. – 288 с.
13. Назаренко И.И. Контактная точечная сварка металла больших толщин // Сварочное производство. – 1969. – № 3. – С. 28–30.
14. Попов В.А. Влияние магнитного поля на формирование соединения при контактной точечной сварке // Сварочное производство. – 1992. – № 10. – С. 25–27.
15. Застосування імпульсних електромагнітних дій для керування процесом кристалізації з'єднань при точковому контактному зварюванні / Р.М. Рижов, В.В. Кочубей, П.Ю. Сидоренко, С.О. Нестуля // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2014. – № 2. – С. 62–65.

References

- [1] R. Ryzhov *et al.*, “Method of resistance spot welding with using of external electromagnetic action”, Patent Ukraine 80278, May 27, 2013 (in Ukrainian).
- [2] R. Ryzhov *et al.*, “Evaluation of the influence of external electromagnetic effects on the microinhomogeneity of compounds in resistance spot welding”, *Tekhnologicheskije Sistemy*, no. 4, pp. 40–42, 2012 (in Russian).
- [3] R. Ryzhov *et al.*, “Estimation of influence of external electromagnetic actions on micron heterogeneity of compounds at resistance spot welding”, in *V All-Ukrainian Conf. “Welding and Related Technologies”*, Kyiv, Ukraine, 2012, pp. 167–168 (in Ukrainian).
- [4] V. Kochubei *et al.*, “Estimation of mechanical properties of welded joints produced by resistance spot welding with electromagnetic stirring”, *Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 1, pp. 58–63, 2014 (in Ukrainian).
- [5] R. Ryzhov *et al.*, “A device for assessing the intensity of hydrodynamic processes at resistance spot welding with external electromagnetic actions”, Patent Ukraine 73411, Sept. 25, 2012 (in Ukrainian).
- [6] R. Ryzhov *et al.*, “A method for intensity estimating of hydrodynamic processes in a weld button at resistance spot welding”, Patent Ukraine 73412, May 27, 2012 (in Ukrainian).
- [7] R. Ryzhov *et al.*, “Application of external electromagnetic action to control the formation of seams at resistance spot welding”, *Tekhnologicheskije Sistemy*, no. 3, pp. 90–92, 2011 (in Ukrainian).
- [8] S. Sliozberg and P. Chuloshnikov, *Electrodes for Contact Welding*, 1st ed. Moscow, SU: Mashinostroyeniye, 1972 (in Russian).
- [9] S. Sliozberg *et al.*, “Selection of electrodes alloy of spot-type machines for welding low-carbon steels”, *Avtomaticheskaya Svarka*, no. 3, pp. 40–42, 1971 (in Russian).
- [10] *Contact Welding. Welded Joints. Constructive Elements and Sizes*, GOST 15878–79, 1979 (in Russian).
- [11] V. Kochubei *et al.*, “Features of joints formation in resistance spot welding with external electromagnetic influences”, *Vestnik KarGTU. Ser. Mashinostroyeniye*, no. 3, pp. 27–31, 2014 (in Russian).
- [12] R. Ryzhov and V. Kuznetsov, *The Magnetic Quality Control of Welded Joints*, 1st ed. Kyiv, Ukraine: Ekotekhnolohiya, 2010 (in Ukrainian).
- [13] I. Nazarenko, “Resistance spot welding metal of large thicknesses”, *Svarochnoye Proizvodstvo*, no. 3, pp. 28–30, 1992 (in Russian).
- [14] V. Popov, “The effect of magnetic field on the formation of a compound in resistance spot welding”, *Svarochnoye Proizvodstvo*, no. 10, pp. 25–27, 1969 (in Russian).
- [15] R. Ryzhov *et al.*, “Application of impulsive electromagnetic affects for crystallization process of joints for spot welding”, *Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 2, pp. 62–65, 2014 (in Ukrainian).

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

ЗАСТОСУВАННЯ ЗОВНІШНІХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ДІЙ ПРИ ТОЧКОВОМУ КОНТАКТНОМУ ЗВАРЮВАННІ ДЕТАЛЕЙ З ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ СТАЛІ Р6М5

Проблематика. Приєднання робочої частини різального інструмента з інструментальної сталі механічно або за допомогою паяння не забезпечує надійності фіксації та є нетехнологічним в умовах масового виробництва. Тому актуальним є

розв'язання вказаної задачі застосуванням електромагнітних дій у контактних способах зварювання, що ґрунтуються на додаткових методах фізичного впливу на процеси утворення з'єднань.

Мета дослідження. Визначення технологічних можливостей способу точкового контактної зварювання з електромагнітними діями в умовах створення з'єднань із інструментальних сталей.

Методика реалізації. Поставлена мета досягається за рахунок генерування в робочій зоні поперечного зустрічно-симетричного керуючого магнітного поля, яке характеризується однаковою величиною і протилежним напрямком вектора магнітної індукції відносно площини контактування деталей для перемішування всього об'єму розплаву точки пондеромоторними силами.

Результати дослідження. Показано особливості позитивних змін параметрів формування з'єднань, що визначають їх механічні властивості. Керування гідродинамікою розплаву дало змогу уникнути дефектів типу рихлот у центральній частині ядра. Доведено, що зміни теплових процесів, які полягають у зниженні швидкості охолодження з'єднань, супроводжуються істотним зменшенням структур загартування в металі литої зони. Наслідком цього є зменшення мікротвердості елементів структури.

Висновки. Доведено доцільність та ефективність використання електромагнітних дій у технологічних процесах точкового контактної зварювання інструментальних сталей.

Ключові слова: інструментальні сталі; точкове контактне зварювання; зовнішні електромагнітні дії; пондеромоторні сили; механічні властивості.

В.В. Кочубей, Р.Н. Рыжов, П.Ю. Сидоренко

ПРИМЕНЕНИЕ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДЕЙСТВИЙ ПРИ ТОЧЕЧНОЙ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ Р6М5

Проблематика. Присоединение рабочей части инструмента из инструментальной стали механически или с помощью пайки не обеспечивает надежности фиксации и нетехнологично в условиях массового производства. Поэтому актуальным является решение указанной задачи применением электромагнитных воздействий в контактных способах сварки, основанных на дополнительных методах физического воздействия на процессы образования соединений.

Цель исследования. Определение технологических возможностей способа точечной контактной сварки с электромагнитными действиями при получении соединений из инструментальных сталей.

Методика реализации. Поставленная цель достигается за счет генерирования в рабочей зоне поперечного встречно-симметричного управляющего магнитного поля, которое характеризуется одинаковым по величине и противоположно направленным относительно плоскости контакта деталей вектором магнитной индукции для перемешивания всего объема расплава точки пондеромоторными силами.

Результаты исследования. Показаны особенности позитивных изменений параметров формирования соединений, определяющие их механические свойства. Управление гидродинамикой расплава позволило избежать дефектов типа рыхлот в центральной части ядра. Доказано, что изменения тепловых процессов, которые заключаются в уменьшении скорости охлаждения соединений, сопровождаются существенным уменьшением закалочных структур металла литой зоны. Следствием этого является уменьшение микротвердости элементов структуры.

Выводы. Доказана целесообразность и эффективность использования электромагнитных воздействий в технологических процессах точечной контактной сварки инструментальных сталей.

Ключевые слова: инструментальные стали; точечная контактная сварка; внешние электромагнитные действия; пондеромоторные силы; механические свойства.

Рекомендована Радою
зварювального факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
05 липня 2017 року