

Геннадій Болотов¹, Максим Болотов², Михайло Руденко³, Владислав Гречка⁴

¹доктор технічних наук, професор кафедри технологій зварювання та будівництва
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: bolotovgp@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>

Scopus: 6506157907. Researcher ID: H-5304-2014

²кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: bolotovmg@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>. Scopus Author ID: 57190377278

³старший викладач кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: rudenko_bear@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9542-7792>

Scopus Author ID: 57190378153. Web of Science: G-6235-2014

⁴аспірант кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: deadsilence166@gmail.com

АКТИВАЦІЯ ПРОЦЕСІВ МАСОПЕРЕНОСУ ПРИ ДИФУЗІЙНОМУ ЗВАРЮВАННІ У ТЛЮЧОМУ РОЗРЯДІ

У роботі досліджений вплив іонної обробки контактуючих поверхонь на активацію процесів масопереносу при дифузійному зварюванні металів. Визначено, що попереднє іонне очищення зварюваних поверхонь в тліючому розряді суттєво скорочує час інкубаційного періоду, пов'язаного з дифузійним розсмоктуванням адсорбованих поверхнею шарів кисню, та забезпечує підвищення коефіцієнта дифузії в перехідній зоні приблизно втричі порівняно зі стандартною підготовкою їх промиванням у розчинниках, і майже на два порядки порівняно з коефіцієнтом самодифузії елементів. Показано, що найбільш ефективним є застосування іонної активації поверхонь при дифузійному зварюванні однорідних, або близьких за хімічним складом металів, коли відсутній такий важливий фактор інтенсифікації процесів масопереносу, як градієнт концентрації елементів в зоні зварювання.

Ключові слова: дифузійне зварювання; тліючий розряд; активація поверхонь; дифузійна зона; масоперенос.

Рис.: 5. Бібл.: 9.

Постановка проблеми. На сьогодні у промисловості поширення отримав один зі способів зварювання тиском – дифузійне зварювання, що здійснюється у твердому стані при температурі не вище 0,7...0,8 температури плавлення з'єднуваних металів. Це дає змогу зварювати різноманітні метали як в однорідних, так і різнорідних сполученнях із мінімальними макропластичними деформаціями [1], що дозволяє усунути завершальну механічну обробку зварної композиції.

Процес утворення з'єднання при дифузійному зварюванні вважають таким, що протікає у три стадії:

- утворення та розвиток фізичного (механічного роз'ємного) контакту;
- активація контактуючих поверхонь з утворенням нових активних центрів внаслідок їх сумісної пластичної деформації;
- об'ємна взаємодія. Цей процес протікає на активних центрах і характеризується утворенням внаслідок гетеродифузії міцних хімічних зв'язків як на поверхнях, так і в об'ємі зони контакту.

Саме завершеність процесів дифузійного масообміну між зварюваними матеріалами визначає міцність їх з'єднання та інші механічні характеристики. Наявність зони дифузії і є ознакою утворення зварного з'єднання.

Однак будь-яка металева поверхня не є ідеально гладкою і чистою. Незважаючи на попередню механічну обробку, в зоні контакту деталей мають місце шари адсорбованого кисню у вигляді тонких та гнучких оксидних плівок товщиною 3...15 нм (в залежності від хімічної активності металу), які гальмують процеси утворення хімічних зв'язків і розвиток дифузійних процесів. При нагріві деталей в зоні утвореного фізичного конта-

кту здійснюється дифузійне розсмоктування кисню по границях та об'єму зерен унаслідок розриву хімічних зв'язків метал – кисень. Тривалість цього періоду, який зветь інкубаційним, залежить від товщини та твердості оксидних плівок і може складати значну частку в загальній тривалості процесу дифузійного зварювання.

Для активації процесів розриву хімічних зв'язків метал – кисень і дифузії кисню вглиб металу застосовують термічний та механічний канали. Термічний канал активації складається в наданні поверхням деталей теплової енергії, що перевищує енергію зв'язків у системі метал – кисень. Проте це вимагає нагріву металів до високих температур, що призводить до погіршення їх структури й фізико-механічних властивостей. Механічний канал передбачає рівень пластичних деформацій контактуючих поверхонь, достатній для руйнування шарів оксидів і розриву міжатомних зв'язків у системах метал – кисень обох з'єднаних матеріалів. Однак залежно від характеристик оксидних плівок, такий варіант може супроводжуватись значною макропластичною деформацією зварного вузла.

Розроблений останніми роками та впроваджений у виробництво спосіб дифузійного зварювання із нагрівом тліючим розрядом [2; 3; 4] дозволив розширити методи активації зварюваних поверхонь деталей. Нагрів нормальним тліючим розрядом здійснюється при тисках газу до 10...15 кПа за рахунок бомбардування поверхонь зварюваних зразків позитивними іонами робочого газу, прискореними електричним полем у проміжку анод – катод (зварювані деталі). Водночас при зниженні тиску газу до 10...100 Па, разом зі зменшенням концентрації іонів у розряді суттєво зростає їх енергія внаслідок переходу тліючого розряду у аномальну форму зі зростанням напруги на розряді. Визначено [3], що в цих умовах енергії бомбардуючих іонів стає достатньо для видалення з поверхні металів внаслідок ефекту катодного розпилення інерідних неметалевих шарів, зокрема, оксидних плівок. Це дає змогу більш активно впливати на основні параметри дифузійного зварювання.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Результати попередніх досліджень [5; 6] свідчать про ефективність іонного очищення (активації) зварюваних поверхонь металів, що визначається у скороченні тривалості циклу зварювання до досягнення необхідної міцності з'єднання. Однак недослідженим залишається вплив іонної активації поверхонь на інтенсивність протікання в зоні контакту процесів дифузійного масообміну, що визначають фізико-механічні властивості зварного з'єднання.

Мета роботи полягає у встановленні якісного та кількісного впливу іонної активації поверхонь на величину коефіцієнтів дифузії елементів в зоні зварювання та енергію активації дифузійних процесів.

Виклад основного матеріалу. Як матеріали для дослідження дифузійного масообміну були обрані електротехнічна сталь 10880 із дуже низьким ступенем легування, що наближає її за своїми властивостями до армо-заліза (чистого заліза), сталь 12X18H9T та сталь 45. Зварювання цих матеріалів у різних сполученнях дозволяє дослідити взаємовплив елементів при дифузії, оцінити роль оксидних плівок типу Me_2O_3 в умовах іонної обробки поверхонь та зварювання в тліючому розряді.

Підготовка зразків до зварювання складалась у механічній обробці зварюваних поверхонь по 6-му класу чистоти приблизно за добу до зварювання, очищення поверхонь розчинником (ацетоном) або іонна обробка безпосередньо перед зварюванням. Діаметр зразків складав 15 мм при довжині 35 мм. Дослідження міцності зварних зразків проводили випробуваннями на статичний розтяг на розривній машині УМ-5. Для випробувань зі зварених деталей виготовляли зразки відповідно до ДСТУ EN 100002-1:2006, тип 4, із розташуванням зварного шва на середині їх робочої частини, роблячи кільцеву канавку у цій зоні (коефіцієнт концентрації напружень $K_n = 1,1$).

На першому етапі досліджували залежність міцності з'єднання від ширини дифузійного перехідного шару в зоні контакту. Дослідження проводили для композиції металів сталь 10880 + сталь 12Х18Н9Т. Обране поєднання матеріалів дозволяє отримати перехідний шар змінного складу від чистого заліза до легованої сталі без утворення крихких інтерметалідів. Для визначення динаміки росту перехідного шару час зварювання поступово збільшували в інтервалі 2–4–6–8–10–15–20 хвилин.

Зварювання зразків здійснювали при температурах 1273, 1373 та 1473 К. Стискаючі напруження складали в усіх дослідах 8 МПа. Попередню іонну обробку зварюваних поверхонь зразків здійснювали в розведеному на 8...10 мм стані у робочій камері в середовищі аргону при тиску газу 60...100 Па протягом 120...150 с. Після обробки поверхні зразків стискалися і здійснювалось зварювання на вказаних режимах.

Вплив попередньої іонної активації на формування міцних зварних з'єднань проявився у зниженні часу зварювання до досягнення однакової міцності при різних способах підготовки поверхонь (рис. 1), що свідчить про зниження тривалості інкубаційного періоду.

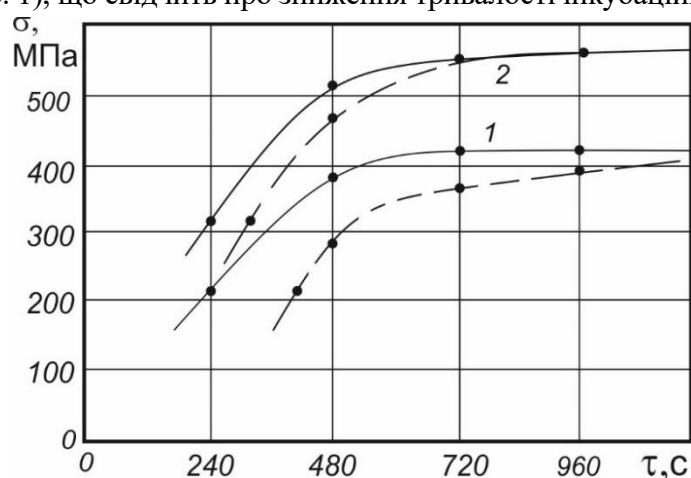


Рис. 1. Кінетика формування міцного зварного з'єднання при дифузійному зварюванні з попередньою іонною обробкою поверхонь (суцільні криві) та без такої (пунктирні криві):
1 – Сталь 10880 + 12Х18Н9Т; 2 – Сталь 45 + 12Х18Н9Т

Дослідження поверхні сталі 10880 на електронному мікроскопі показало, що до іонної обробки вона покрита шаром неметалевих включень глобулярної форми, а в результаті іонного очищення оголюється її тонкий мікрорельєф, на якій можливі найтонші прозорі плівка природного окислу (рис. 2).

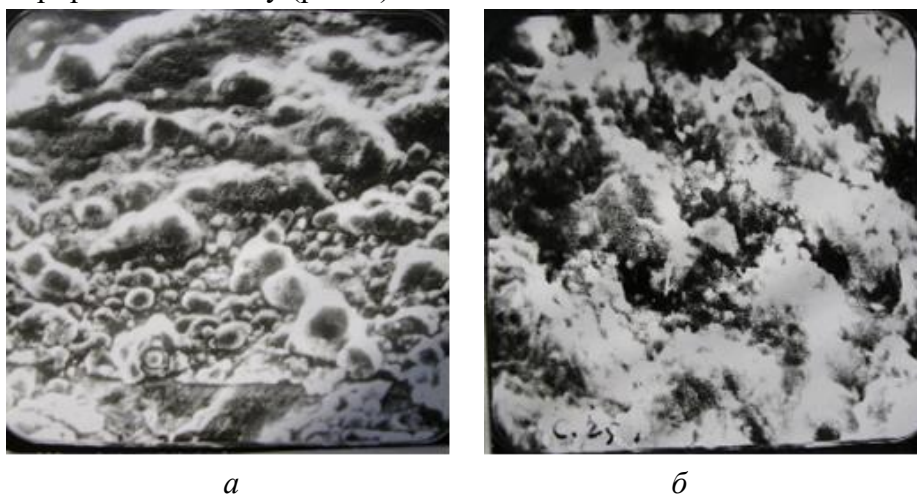


Рис. 2. Зовнішній вигляд поверхні сталі 10880 до (а) та після (б) іонної обробки (x5000)

Ширину перехідної зони у зварних зразках, структура якої відрізняється від вихідної структури обох з'єднаних матеріалів, визначали металографічним методом за допомогою електронного мікроскопа EM-10A. Залежність міцності з'єднання від ширини перехідної дифузійної зони наведена на рис. 3, звідки видно, що при товщині цієї зони у 3...4 мкм, що випробовує найбільші пластичні деформації на першому етапі зварювання, вже забезпечується міцність з'єднання на рівні міцності слабшого матеріалу. У всіх випадках розрив здійснювався по сталі 10880 поза зоною зварювання. Подальше збільшення товщини перехідного шару практично не підвищує міцність. При цьому несуттєво, яким чином досягається оптимальна товщина шару: або за рахунок підвищення температури зварювання при меншій тривалості витримки, або, навпаки, за рахунок тривалої витримки при пониженій температурі.

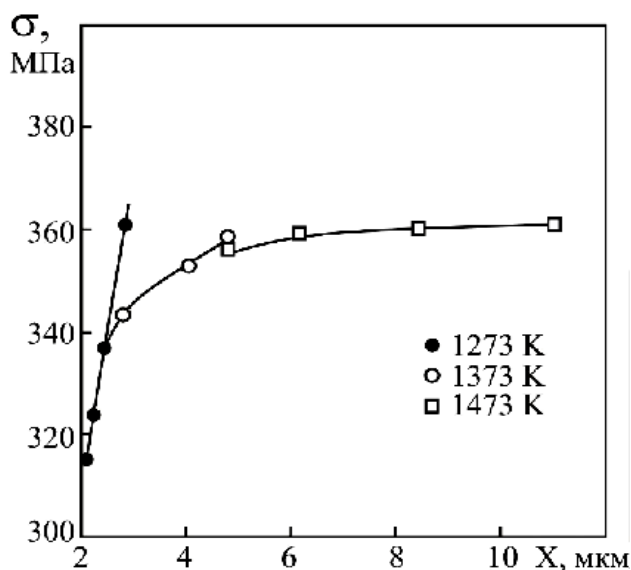


Рис. 3. Залежність міцності зварного з'єднання від ширини перехідного шару

Водночас результати вимірювання мікротвердості (рис. 4) зони зварювання мікротвердоміром ПМТ-3 та розподілу елементів у цій зоні (концентраційні криві на рис. 4) за допомогою мікроаналізатора фірми «Сатеса», свідчать, що дифузійний масообмін здійснюється у помітно більшій зоні, аніж ширина перехідного шару. У процесі утворення зварного шва бере участь шар металу товщиною до 8...10 мкм. Тому можна прийняти, що ширина перехідного шару у 3...4 мкм є мінімально необхідною для отримання надійного з'єднання.



a

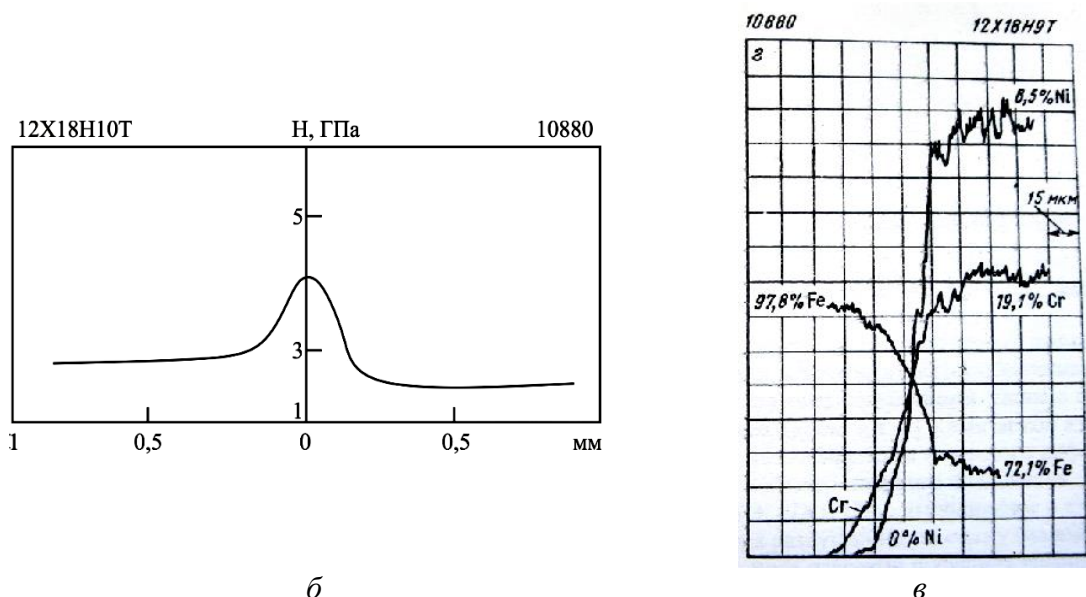


Рис. 4. Характеристики дифузійного зварного шва між сталлю 10880 та 12X18H9T
 а – електронна мікрофотографія (x2500); б – мікротвердість;
 в – концентраційні криві (масштаб 15 мкм)

Розвиток дифузійної зони залежить не тільки від параметрів режиму зварювання (температури та часу), а й необхідної енергії активації дифузії, і визначається загалом коефіцієнтом дифузії елементів зварюваних матеріалів через зону їх контакту.

Енергія активації самодифузії головного елемента застосованих металів – заліза, вміст якого в цих матеріалах становить 79...98 %, орієнтовно визначається як [7]

$$Q_T = 18RT_{пл}, \quad (1)$$

де $R = 8,31$ кДж/моль – універсальна газова постійна;

$T_{пл}$ – температура плавлення металу, К.

Коефіцієнт самодифузії заліза залежить як від величини енергії активації дифузії Q_T , так і температури процесу зварювання T

$$D_T = D_o \cdot \exp(-Q_T/RT), \quad (2)$$

де D_o – частотний фактор, величина якого залежить від типу кристалічної ґратки та від частоти коливань дифундуючого атома, м²/с [8].

Розрахунки за формулами (1) та (2) надають орієнтовне значення коефіцієнта самодифузії заліза на рівні $D_T = 10^{-15}$ м²/с, що збігається з експериментальними даними $(1...2) \cdot 10^{-15}$ м²/с при температурі 1337...1406 К [8].

Головною умовою ефективного масопереносу є щільний контакт поверхонь метал – метал без наявності на них неметалевих шарів насамперед оксидних плівок, що наочно підтверджується результатами іонного очищення поверхонь, наведених на рис. 1.

Слід також враховувати, що з точки зору дифузійного зварювання обробка поверхонь енергетичними іонами може забезпечувати не тільки безпосередній їх контакт, а й можливість прискорення дифузії в результаті створення надлишкової концентрації нерівноважних дефектів передусім вакансійного типу, що підвищує вільну енергію поверхонь [9].

Складність керування процесами дифузії і необхідність отримання міцних зварних з'єднань роблять необхідним визначення впливу як підготовки контактуючих поверхонь, так і параметрів режиму зварювання (температури та часу) на величину коефіцієнта дифузії елементів з'єднаних матеріалів і, відповідно, на ширину дифузійної перехідної зони.

Залежність коефіцієнта дифузії від параметрів режиму можна визначити рішенням другого рівняння Фіка для нестационарного потоку у випадку дифузії в безмежне тіло при різкій концентраційній границі

$$\frac{dc}{dt} = \frac{d^2c}{dx^2} \quad (3)$$

де C – концентрація дифундуючого елемента; x – відстань, на яку він перемістився за час t .

Скориставшись спрощеним рішенням цього рівняння відносно часу дифузії, отримуємо

$$t_{зв} = \frac{1}{\pi D} \left(\frac{C_o \cdot x}{C_o - 2C_x} \right)^2, \quad (4)$$

де C_o та C_x – відповідно, концентрація елемента у вихідному матеріалі та на глибині x від зони з'єднання (у відносних одиницях);

D – коефіцієнт дифузії, m^2/s .

Задаючись оптимальною глибиною дифузії x та концентрацією на заданій глибині $C_x = 0,2C_o$, знаходимо орієнтовну величину коефіцієнта дифузії D

$$D = \frac{x^2}{t_{зв}}. \quad (5)$$

Розрахунки за цією формулою для ширини дифузійної зони $x = 8...10$ мкм та часу зварювання $t = 300...360$ с надають значення D на рівні $(5...8) \cdot 10^{-13} m^2/s$. Водночас згідно з рис. 1 при зварюванні сполучення сталь 10880 + сталь 12X18H9T без іонної активації з'єднуваних поверхонь результуюча величина коефіцієнта дифузії буде майже втричі меншою, оскільки для досягнення однакової міцності зварного з'єднання, тобто, тієї ж ширини перехідної зони, необхідний приблизно втричі більший час ізотермічної витримки.

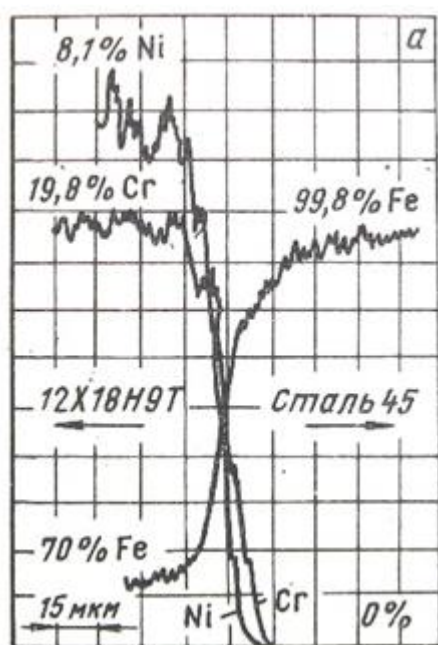
Згідно з (2) значення коефіцієнта дифузії при постійній температурі визначається величиною енергії активації процесу масообміну Q . Розрахунки за формулою (2) показують, що для реалізації процесу дифузійного зварювання вказаної композиції металів при температурі 1373 К необхідна енергія активації складає 220...235 кДж, а після іонної активації поверхонь вона знижується до 170...185 кДж, тобто, майже на 30 %. Це дає змогу знижувати температуру в процесі зварювання на 10...15 %, що позитивно впливає на структуру та механічні характеристики з'єднуваних металів.

Таким чином, для розглянутої композиції з'єднуваних металів іонна активація контактуючих поверхонь збільшує коефіцієнт дифузії через них практично на півтора-два порядки порівняно з коефіцієнтом самодифузії, та приблизно втричі – порівняно зі зварюванням без іонної обробки поверхонь.

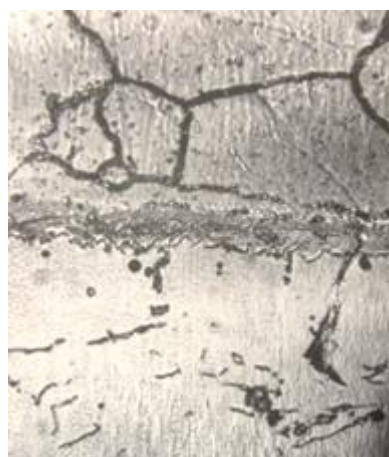
При зварюванні сталі 12X18H9T зі сталлю 45 ефективність іонної активації з'єднуваних поверхонь помітно знижується. Це проявляється у зменшенні тривалості інкубаційного періоду при зварюванні зразків без попередньої іонної обробки поверхонь до досягнення максимальної міцності з'єднань (рис. 1). Це пояснюється відновлювальним характером взаємодії вуглецю, вміст якого у сталі 45 досягає 0,42...0,5 %, із окислами у зоні зварювання. Такий висновок підтверджується тим, що задовільні результати зварювання сталей 12X18H9T + 12X18H9T, які мають у своєму складі не більше 0,12 % вуглецю, були отримані лише з розташуванням у стику перед зварюванням прошарку парафіну, що являє собою сполуки вуглеводнів.

Результати мікрорентгеноспектрального аналізу (рис. 5, а) свідчать, що коефіцієнт дифузії заліза залишився приблизно на тому ж рівні, що й у попередньому випадку. Водночас глибина дифузії у сталь 45 такого карбідоутворюючого елемента, як хром, зменшилася майже у 2,5 раза, відповідно, зменшився коефіцієнт його дифузії з $1 \cdot 10^{-13}$ м²/с до $4 \cdot 10^{-14}$ м²/с. Металографічні дослідження показали, що у з'єднанні сталь 45+ 12Х18Н9Т дифузійна зона складається з тонкого перехідного шару підвищеної твердості і прилеглої до нього знеуглецьованої зони з боку сталі 45 та зони укрупненої структури з боку сталі 12Х18Н9Т (рис. 5, б). Границі зерен у цій зоні збагачені карбідами хрому, що і перешкоджає його більш інтенсивній дифузії. Таким чином, в процесі утворення дифузійного з'єднання роль вуглецю проявляється подвійно.

Як досить активний хімічно і дифузійно рухомий елемент вуглець відновлює оксидні плівки в зоні контакту і забезпечує дифузійний масообмін між з'єднуваними матеріалами. Однак, за наявності активних елементів, здатних утворювати карбіди (хром та ін.), хімічна взаємодія їх з вуглецем викликає зменшення зони взаємного дифузійного масообміну, що впливає на якість зварного з'єднання.



а



12X18H9T

Сталь 45

б

Рис. 5. Характеристики дифузійного зварного шва між сталлю 45 та 12Х18Н9Т:
а – концентраційні криві; б – мікроструктура (x200)

Висновки. Отримані результати дозволяють рекомендувати застосування в єдиному технологічному циклі іонної обробки (очищення) з'єднаних поверхонь та їх нагрів при дифузійному зварюванні, коли під дією іонного бомбардування створюються ювенільні поверхні з активованими шарами, що забезпечують прискорене формування міцного дифузійного з'єднання.

Найбільш ефективним є застосування іонної активації при дифузійному зварюванні однорідних, або близьких за хімічним складом металів, коли відсутній такий фактор інтенсифікації дифузійних процесів, як градієнт концентрації елементів в зоні контакту, а також, металів, які мають у своєму складі незначний вміст елементів-відновників, зокрема, вуглецю.

Список використаних джерел

1. Квасницький, В. В. Дифузійне зварювання різнорідних матеріалів з керованим напружено-деформованим станом / В. В. Квасницький, В. Ф. Квасницький, М. В. Матвієнко // Автоматичне зварювання. – 2018. – № 11-12. – С. 78-85.
2. Котельников, Д. И. Сварка давлением в тлеющем разряде / Д. И. Котельников. – Москва : Металлургия, 1981. – 116 с.
3. Болотов, Г. П. Зварювання та паяння в плазмі тліючого розряду / Г. П. Болотов. – Чернігів : ЧНТУ, 2016. – 143 с.
4. Impact of the Samples Surface State on the Glow Discharge Stability / M. Bolotov, G. Bolotov, S. Stepenko, P. Ihnatenko // *Metals' Treatment and Welding Processes. Appl. Sci.* – 2021. – № 11. – P. 1765.
5. Болотов Г. П. Активційна дія тліючого розряду в умовах дифузійного зварювання / Г. П. Болотов, М. Г. Болотов, Р. М. Рижов // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2011. – № 1 (22). – С. 18-21.
6. Bolotov, G. P. Modification of Materials Surface Layers by Low-Energy Ion Irradiation in Glow Discharge / G. P. Bolotov, M. G. Bolotov // *IEEE "Electronics and Nanotechnology ELNANO'2016": 36th International Conference (April 2016)*. – Kharkiv : IEEE, 2016. – P. 135-140.
7. Банов, М. Д. Расчетно-графический метод определения технологических параметров диффузионной сварки / М. Д. Банов, Н.Ф. Казаков // Диффузионное соединение в вакууме металлов, сплавов и неметаллических материалов : V Межвуз. науч.-тех. конф. – Москва : ПНИЛДСВ, 1970. – С. 232-239.
8. Герцрикен, С. Д. Диффузия в металлах и сплавах / С. Д. Герцрикен, И. Я. Дехтяр. – Москва : Физматгиз, 1960. – 564 с.
9. Бабад-Захряпин, А. А. Радиационно-стимулируемая химико-термическая обработка / А. А. Бабад-Захряпин, Г. Д. Кузнецов. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 96 с.

References

1. Kvasnytskyi, V.V., Kvasnytskyi, V.F., Matviienko M.V. (2018). Dyfuziynne zvaryuvannya riznорidnykh materialiv z kerovanyim napruzhenо-deformovanyim stanom [Diffusion welding of heterogeneous materials with a controlled stress-strain state]. *Avtomatychne zvaryuvannya – Automatic welding, 11-12*, 78-85.
2. Kotelnikov, D.I. (1981). *Svarka davleniyem v tleyushchem razryade [Glow discharge pressure welding]*. Metallurgiya.
3. Bolotov, G.P. (2016). *Zvaryuvannya ta payannya v plazmi tliyuchoho rozryadu [Welding and soldering in glow discharge plasma]*. CHNTU.
4. Bolotov, M., Bolotov, G., Stepenko, S., Ihnatenko, P. (2021). Impact of the Samples Surface State on the Glow Discharge Stability. *Metals' Treatment and Welding Processes. Appl. Sci.*, 11, 1765.
5. Bolotov, G.P., Bolotov, M.G., Ryzhov R.M. (2011). Aktivatsiina diia ylyiuchoho rozryadu v umovakh dyfuziynnoho zvaryuvannya [Activating action of the arcing discharge in the conditions of diffusion welding]. *Visnyk Donbaskoi derzhavnoi mashynobudivnoi akademiyi – Bulletin of the Donbas State Machine-Building Academy*, 1(22), 18-21.
6. Bolotov, G. P., Bolotov, M. G. (2016). Modification of Materials Surface Layers by Low-Energy Ion Irradiation in Glow Discharge. *IEEE "Electronics and Nanotechnology ELNANO'2016" 36th International Conference (April 2016)* (pp. 135-140). IEEE.
7. Banov, M.D., Kazakov, N.F. (1970). Raschetno-graficheskiy metod opredeleniya tekhnologicheskikh parametrov diffuzionnoy svarki [Calculation-graphical method for determining the technological parameters of diffusion welding]. *V Mezhvuzovskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Diffuzionnoye soyedineniye v vakuume metallov, spлавov i nemetallicheskiikh materialov» – Diffusion bonding in vacuum of metals, alloys and non-metallic materials: V Interuniversity. scientific-technical conf.* (pp. 232-239). PNILDSV.
8. Gertsriken, S.D., Dekhtyar, I.Ya. (1960). *Diffuziia v metallakh i splavakh [Diffusion in metals and alloys]*. Fizmatgiz.
9. Babad-Zakhryapin, A.A., Kuznetsov, G.D. (1982). *Radiatsionno-stimuliruyemaya khimiko-termicheskaya obrabotka [Radiation-stimulated chemical-thermal treatment]*. Energoizdat.

Отримано 16.11.2023

Gennadiy Bolotov¹, Maksym Bolotov², Mykhailo Rudenko³, Vladyslav Grechka⁴

¹Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Welding and Construction Technologies
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: bolotovgp@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>

Scopus: 6506157907. Researcher ID: H-5304-2014

²PhD of Technical Sciences, Association Professor of the Department of Welding and Construction Technologies
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: bolotovmg@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>. Scopus Author ID: 57190377278

³Senior Lecturer at the Department of Welding and Construction Technologies
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine).

E-mail: rudenko_bear@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9542-7792>

Scopus Author ID: 57190378153. Web of Science: G-6235-2014

⁴Graduate Student at the Department of Welding and Construction Technologies
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: deadsilence166@gmail.com

**ACTIVATION OF MASS TRANSFER PROCESSES
IN DIFFUSION WELDING IN A GLOW DISCHARGE**

The paper examines the effect of ion treatment of contacting surfaces on the activation of mass transfer processes during diffusion welding of metals. Using the example of welding titanium alloys, stainless steel with armco-iron and steel 45, it was determined that the preliminary ion cleaning of the welded surfaces in a glow discharge in an argon environment significantly reduces the time of the incubation period associated with the diffusional absorption of oxygen layers adsorbed on the surface, and provides a reduction in time isothermal aging until the maximum strength of the connection is reached.

It is also shown that to ensure the strength of the welded joint at the level of strength of the base metal, it is sufficient to form a transition layer with a thickness of 3...4 microns, which experiences the largest plastic deformations at the first stage of welding. A further increase in the thickness of the transition layer practically does not lead to an increase in strength.

Ionic activation of the surfaces to be joined, which is carried out in a vacuum chamber immediately before welding, provides an increase in the diffusion coefficient in the transition zone by approximately three times compared to standard surface preparation by washing them in solvents, and by almost two orders of magnitude compared to the self-diffusion coefficient of the elements. It was established that when welding stainless steel with steel 45, the efficiency of ion activation of surfaces decreases, which is due to the reductive nature of the interaction of carbon contained in the composition of steel 45 in a significant amount, with oxides in the welding zone.

It is shown that the most effective application of ionic activation of surfaces during diffusion welding of metals that are homogeneous or similar in chemical composition, when there is no such important factor of intensification of mass transfer processes as the concentration gradient of elements in the welding zone, as well as metals that contain a small amount of reducing elements, in particular, carbon.

Keywords: diffusion welding; glow discharge; surface activation; diffusion zone; mass transfer.

Fig.: 5. References: 9.