УДК 621.791.4:621.791/.792:621.791.052:621.643 DOI: https://doi.org/10.37434/as2023.07.05

# ІНДУКЦІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ ТРУБ І ТРУБНОЇ АРМАТУРИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АКТИВУЮЧИХ РЕЧОВИН (Огляд)

**О.С. Прокоф'єв[1], Р.С. Губатюк[1], С.В. Римар[1], В.М. Абдулах[1], О.І. Петрієнко[1], В.С. Сенчишин[2]**

[1]ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: sytor301@ukr.net
[2]ТНТУ ім. Івана Пулюя. 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

У межах досліджень, що спрямовані на розвиток технологій зварювання сталей в твердій фазі в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (ІЕЗ) було розроблено спосіб індукційного зварювання тиском із застосуванням активуючих речовин труб і трубної арматури із отриманням міцності зварного з'єднання на рівні основного металу. Процес з'єднання відбувається при нагрітих зварювальних крайках основного металу до пластичного стану теплом від вихрових струмів, і повним розплавленням попередньо введених в місце з'єднання активуючих речовин, які хімічно очищують та частково розчиняють метал поверхні зварювальних крайок, і по мірі прикладання тиску до крайок, видавлюються із зони зварного з'єднання. За рахунок прикладання тиску зварне з'єднання формується в твердій фазі пластично деформованим основним металом. У зварному шві спостерігаються лише незначні вкраплення металевої фракції активуючої речовини і її сплаву з основним металом. Бібліогр. 30, табл. 1, рис. 15.

*Ключові слова: індукційне зварювання тиском, активуючі речовини, індукційне нагрівання, зварний стик, труби, трубна арматура*

**Вступ.** В ІЕЗ було розроблено один із способів зварювання в твердій фазі [1–6], який отримав назву «Зварювання-паяння під тиском» [7]. Значний внесок розвиток цього напрямку зварювання вніс професор О.С. Письменний [8, 9]. Спосіб має позитивні досвід апробації і впровадження у виробництво. Наприкінці 80-х років минулого сторіччя в ІЕЗ було розроблено ряд потужних індукційних зварювальних машин П-127, П-130, П-144, П-145 [10] для зварювання труб середнього діаметру нафтового сортаменту, зокрема, обсадних труб із сталі 36Г2С, 12Х1МФ діаметром до 325 мм. Створена на базі машини К-584 для контактного стикового зварювання оплавленням, зварювальна машина для процесу індукційного зварювання П-139 (конструкторська документація із літерою О1) була оснащена блоком індукційного нагрівання з роз'ємними індукторами для зварювання труб діаметром 114, 159, 219, 273, 325 мм. Була створена зварювальна машина П-134 для системи з'єднання «труба – кінцева трубна арматура» для приварювання фланців, ніпелів, різьбових замків тощо. Подальша модифікація зварювальних машин П-144 і П-145 з оснащенням надійним механізмом центрування та затискання труб цангового типу дозволили якісно з'єднувати труби діаметрами від 14 до 325 мм. Зварювальні машини входили до зварювальних комплексів і були розташовані у складі ліній по зварюванню і ізоляції двох і трьох трубних плітей магістральних трубопроводів. При цьому робочий тиск у трубопроводах становив 200 атм. Безпосередня тривалість процесу індукційного зварювання, в залежності від типорозміру труб, складала 10…80 с, а загальний час, включаючи встановлення і зняття труб – 180…240 с.

В ІЕЗ розроблено також технологію високочастотного зварювання тонкостінних спиралешовних труб із вуглецевої сталі 08КП і низьколегованої сталі S355 [11] з використанням активуючих речовин [12] і спосіб індукційного зварювання

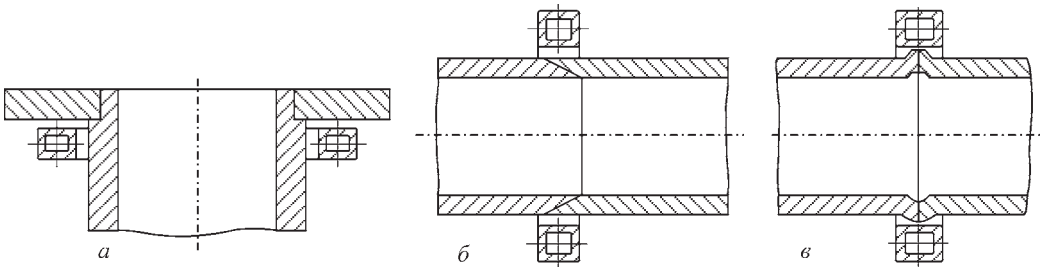


Рис. 1. Типові конфігурації розташування індукторів і зварних з'єднань, які отримують в процесі виконання індукційного зварювання тиском із застосуванням активуючих речовин: з'єднання фланця з трубою (*а*); косостикове з'єднання труб (*б*); стикове з'єднання без внутрішнього ґрату (*в*)

Прокоф'єв О.С. – https://orcid.org/0000-0003-4643-6611, Губатюк Р.С. – https://orcid.org/0000-0002-0851-743X,
Римар С.В. – https://orcid.org/0000-0003-0490-4608, Абдулах В.М. – https://orcid.org/0009-0001-6224-7338,
Петрієнко О.І. – https://orcid.org/0000-0002-1291-7364, Сенчишин В.С. – https://orcid.org/0000-0002-0286-7754
© О.С. Прокоф'єв, Р.С. Губатюк, С.В. Римар, В.М. Абдулах, О.І. Петрієнко, В.С. Сенчишин, 2023

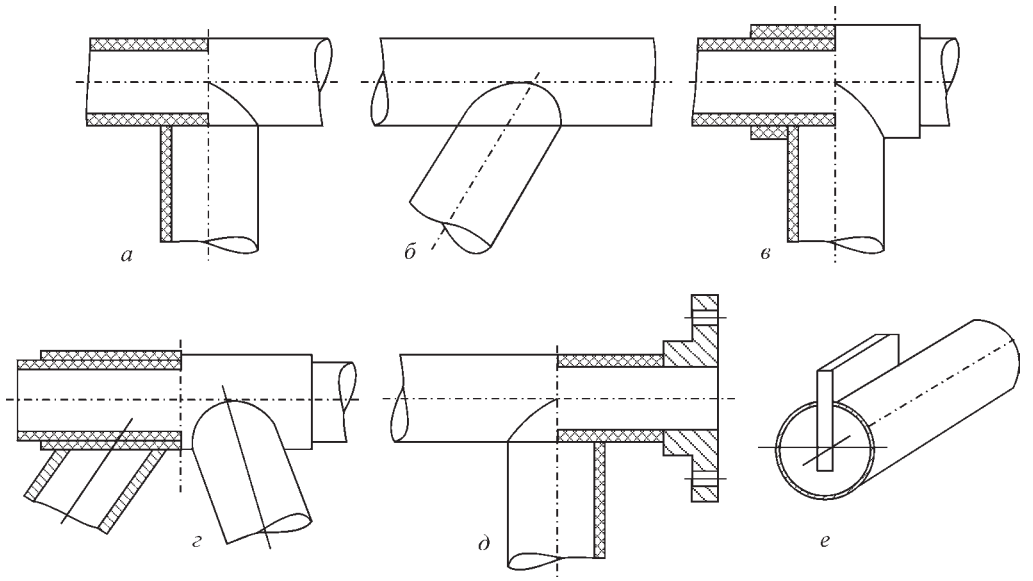


Рис. 2. Типові Т-подібні з'єднання, які отримують в процесі виконання індукційного зварювання тиском із застосуванням активуючих речовин: глухе Т-подібне з'єднання (*а*); Т-подібне з'єднання під кутом (*б*); Т-подібне з'єднання із накладкою (*в*); Т-подібне з'єднання типу велорами (*г*); Т-подібне з'єднання у трубній системі із фланцем (*д*); Т-подібне з'єднання із пластиною (*е*)

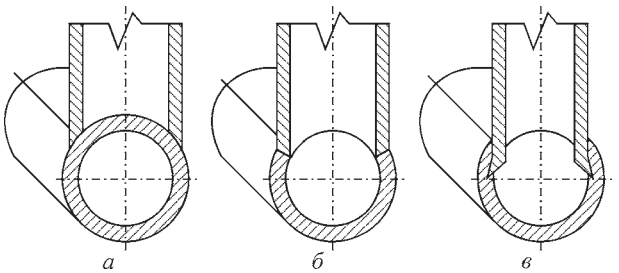


Рис. 3. Конструкції трійникових Т-подібних з'єднань [10], які були адаптовані під технологічний процес індукційного зварювання тиском із застосуванням активуючих речовин: Т-подібне з'єднання із формуванням зовнішнього «фланця» (*а*); Т-подібне з'єднання із конусоподібною формою зварного шва (*б*); Т-подібне з єднання із формуванням внутрішнього «фланця» (*в*)

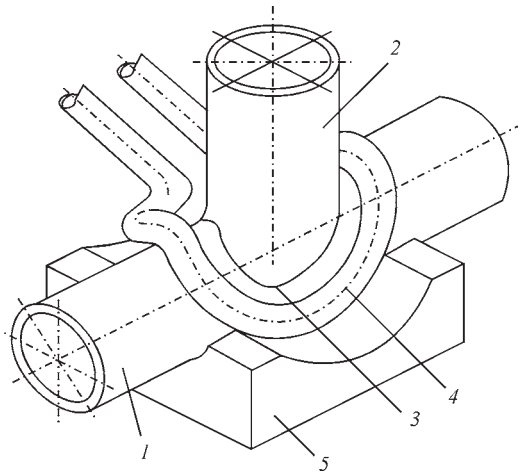


Рис. 4. Схема процесу індукційного зварювання тиском із застосуванням активуючих речовин Т-подібного з'єднання: *1* – основна труба; *2* – відвідна труба; *3* – місце розташування активуючих речовин; *4* – розташування робочого органу – індуктора; *5* – частина зварювального обладнання (упор)

тиском із застосуванням активуючих речовин для виконання високоякісних зварних з'єднань труб малого діаметру і трубної арматури. На рис. 1–3 представлені типові з'єднання трубної арматури, які виконуються названим видом зварювання, а на рис. 4 – схема процесу індукційного зварювання тиском Т-подібного з'єднання.

Активуючі речовини слугують для активації поверхні зварювання [8]. Під поняттям активації поверхні тут розуміється процес видалення хімічним або електрохімічним способом надтонких плівок оксидів, які утворюються на поверхні крайок деталей які зварюються, і незначним розчиненням основного металу з їх поверхонь. До активуючих речовин відносяться суміші у порошкоподібному вигляді та у вигляді виробів із закладних деталей, які отримано шляхом пресування порошкоподібного припою, флюсів, активуючих добавок. Активуючі речовини можуть наноситися на зварювальні крайки шляхом напилення порошкових сумішей, або введенням у зону шву надтонких пластинок із заданим хімічним складом. До активуючих речовин можна віднести активуючі гази та їх суміші.

Отримання високоякісних зварних з'єднань сталевих труб і трубної арматури при виконанні зварювання у твердій фазі є актуальною задачею в умовах відновлення і реконструкції промислових об'єктів народного господарства країни.

Метою статті є описання принципу та послідовності виконання способу індукційного зварювання тиском із застосуванням активуючих речовин труб і трубної арматури та визначення напрямків розвитку даного виду зварювання. Стаття має оглядово-аналітичний характер.

**Обговорення основних положень.** Відомо, що в процесі зварювання тиском сталі із застосуванням активуючих речовин у вигляді припою і флю-

су при локальній температурі 910 °С на стиках з'єднувальних труб у місці з'єднання зароджуються їх спільні зерна [13]. При підвищенні температури до 980 °С (вище точки перетворення α > γ сталі) у стику спостерігаються спільні зерна нормального розміру і включення у вигляді тонких дрібних рваних плям, які є не до кінця видавленими утвореннями продуктів реакції припою і флюсу з окислами основного металу, які перебували у розплавленому стані. При досягненні температури 1050 °С на крайках зварюваних деталей лінія стику засобами металографії уже не виявляється і практично зникають вищезгадані плями. Тут вже йде інтенсивна взаємодія основного металу зварювальних крайок з рідким розплавленим припоєм і флюсом, переміщення рідких фракцій продуктів реакції на периферію зварного шву за рахунок збільшення об'єму металу з підвищенням температури, а при виконанні осадження майже повне їх видавлення із шву в утворюваний ґрат.

У зварному шві при термохімічному впливі розплавлених активуючих речовин на зварювальні поверхні деталей відбувається інтенсивне збагачення легкоплавкої фази основним металом. Цей процес протікає настільки інтенсивно, що у легкоплавкій фазі саме основний метал зварювальних деталей стає основним. Його доля може досягати 70 %, при цьому елементи, які є основою застосованої активуючої речовини стають лише компонентами легкоплавкої фази.

Позитивним є вплив на отримане зварне з'єднання послідуючої термічної обробки (ТО) зварного з'єднання для нормалізації металу і зняття механічних напружень. При температурах 900…1050 °С при виконанні ТО відбувається повторна перекристалізація і зняття механічних напружень, забезпечуються найбільші показники ударної в'язкості для більшості сталей [14–16]. У зварному з'єднанні, коли більша частина об'єму металу під індуктором при зварюванні не перевищувала температур точок фазових переходів $Ac_1$…$Ac_3$, при яких починається ізотермічний розпад аустеніту, і де показник ударної в'язкості є досить високим, операція ТО для деяких марок сталей проводиться лише із метою зняття деформаційних механічних напружень, які утворюються при осадженні. Так, для стикових з'єднань, отриманих індукційним зварюванням тиском із застосуванням активуючих речовин товстостінних труб із сталі 36Г2С діаметром 50 мм із товщиною стінки 10 мм, їх ТО виконувалась в інтервалі температур 700…750 °С [3], які є наближеними до точки $Ac_3$.

При дослідженні можливості з'єднання конструкцій із труб і трубної арматури необхідно: здійснити розрахунок розповсюдження електромагнітних і температурних полів у зоні зварного з'єднання при здійснені індукційного нагрівання із визначенням електромагнітних параметрів системи «індуктор–виріб» і геометрії індуктора; виготовити дослідні зразки із матеріалу деталей, які підлягають зварюванню; здійснити індукційне нагрівання зразків і дослідити розповсюдження температурного поля за допомогою безконтактних і контактних методів вимірювання температур (пірометра, термопар); при необхідності, здійснити корегування конструкції індуктора і режимів нагрівання; згідно з матеріалом зварюваних деталей підібрати відповідні активуючі речовини; здійснити зварювання дослідних зразків; дослідити якість зварного з'єднання; при необхідності провести корегування режимів зварювання.

Сам процес індукційного зварювання тиском з використанням активуючих речовин відбувається в два етапи. На першому етапі здійснюється індукційне нагрівання стиснутої зони зварного шву з витримкою у часі до розплавлення попередньо введених в зону шву активуючих речовин, які в розплавленому стані активують з'єднувальні поверхні деталей, вступаючи з ними у хімічну реакцію, очищаючи і частково розчиняючи метал поверхні та захищаючи їх від дії навколишнього середовища. Цей процес подібний до технології паяння. Після цього здійснюється другий етап зварювання, при якому переривається процес нагрівання і відбувається осадження зварювальних деталей з видавленням із місця з'єднання розплавлених активуючих речовин в ґрат, відбувається контрольована пластична деформація місця з'єднання із збільшенням її контактної поверхні і кристалізація під тиском незначних залишків розчину металу активуючих речовин з основним металом в зварному шві з утворенням кристалічних решіток, як при технології зварювання тиском (рис. 5 і 6). Обидва етапи процесу зварювання взаємозалежні і визначають результат процесу з'єднання.

Після зварювання, в разі необхідності, тим же індуктором проводиться операція ТО зварного з'єднання.

Важливим є визначення хімічного складу активуючих речовин, їх апробація і аналіз отриманих зварних швів. Одними із основних чинників при виборі активуючої речовини є її хімічна сумісність з основним металом, і температура її плавлення, яка повинна бути нижчою, за температуру плавлення основного металу.

В ряді досліджень у якості активуючої речовини в процесі індукційного зварювання тиском сталей застосовувалась суміш порошкоподібного припою ПАН-3 та порошкоподібного флюсу тетраборату натрію (бури). Ця суміш у вигляді пастоподібної маси наносилась на кромки зварю-

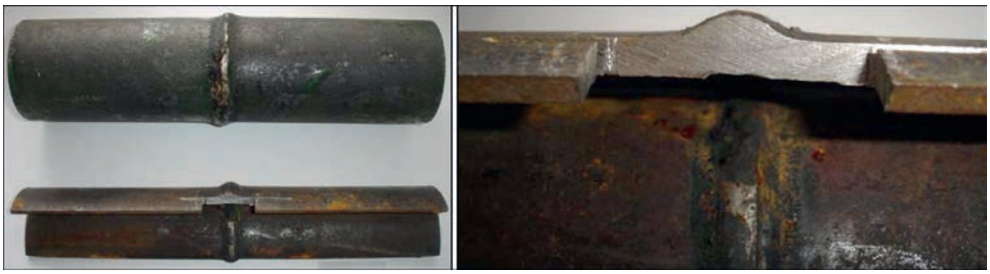

Рис. 5. Отримані у процесі індукційного зварювання тиском із застосуванням активуючих речовин зварні з'єднання без внутрішнього ґрату

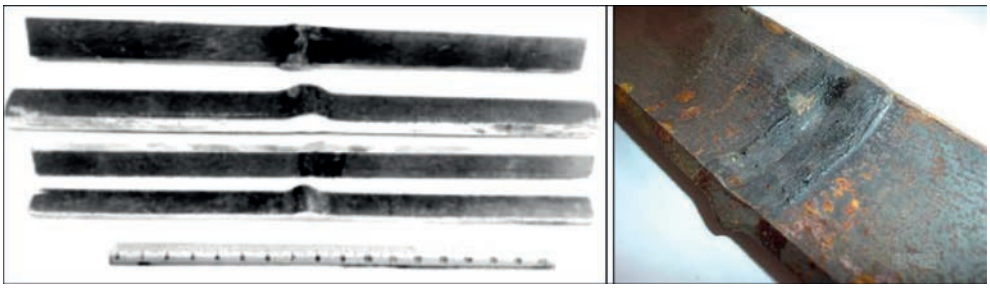

Рис. 6. Зразки, вирізані із сталевих труб діаметром 325 мм і товщиною стінки 12 мм без внутрішнього ґрату [10]

вальних деталей перед їх складанням при стиковому зварюванні. В припій ПАН-3 входить марганець (Mg), нікель (Ni), кремній (Si), а основою є мідь (Cu). Температура плавлення припою складає 935 °С. Відомо, що застосування припою ПАН-3 при паянні забезпечує міцність паяного з'єднання на рівні 300…350 МПа, а при виконанні процесу індукційного зварювання тиском міцність зварного з'єднання досягає вже 400…650 МПа.

Також у складі активуючих речовин застосовувались і порошкові металеві суміші припою в яких основою був нікель (Ni). Суміші наносилися на крайки зварювальних деталей шляхом напилення, а флюси наносилися безпосередньо перед процесом зварювання. Температура плавлення легкоплавкої фази у зварному шві була вища ніж при застосуванні припою ПАН-3.

Для процесу осадження вирішальне значення має ступень пластичної деформації з'єднувальних крайок, яка залежить від температури їх нагрівання, і величина прикладеного тиску.

При індукційному нагріванні зони зварювання необхідно прагнути до отримання як найбільш рівномірного температурного поля на зварювальних поверхнях крайок деталей для їх більш рівномірного нагрівання, оскільки це запобігає недогріванню і перегріванню будь яких ділянок зварного з'єднання і забезпечує рівномірне розплавлення легкоплавкої фази активуючих речовин. Це досягається конфігурацією індуктора і підбором необхідних параметрів високочастотного джерела живлення – струму, напруги і частоти, з урахуванням можливості підвищення потужності або частоти струму джерелом живлення при втраті феромагнітним матеріалом магнітних властивостей при температурі вище точки Кюрі (для сталі ~750 °С). При невисоких частотах джерела живлення (одиниці кГц) магнітне поле має більшу глибину проникнення у феромагнітне середовище завдяки меншому впливу скін-ефекту, що забезпечує більш рівномірне нагрівання деталей. Однак, при втраті феромагнітним матеріалом магнітних властивостей глибина проникнення зростає та може перевищити товщину деталей, і процес нагрівання суттєво уповільнюється. При цьому необхідно підвищувати потужність або частоту струму (до десятків і сотень кГц), або і те й інше. З підвищенням частоти струму скін-ефект посилюється, зростає густина струму і посилюється теплова потужність нагрівання.

Розподілення температури вздовж вісі (0, z) трубної заготівки або циліндричних виробів при концентрично розташованому ззовні індукторі, який забезпечує необхідний характер нагрівання крайок для їх деформації досить точно описується залежністю [17]:

$$T(z) = T_0 \cdot \exp[-2 \cdot D \cdot x^2(z)],$$

де $z$ – осьова координата; $T_0$ – температура на торцях крайок труб, які піддаються зварюванню в стик;

$$D = 0{,}2 \cdot (r_H / z_0)^2; \quad x(z) = z / r_H;$$

де $r_H$ – зовнішній радіус труби; $z_0 = 2 \cdot \delta$ – координата зони нульової деформації; $\delta$ – товщина стінки труби.

На рис. 7 для прикладу показані магнітні силові лінії розрахункового електромагнітного поля і розподіл температурного поля в районі зварного стику верхньої поверхні товщиною 3 мм трубних заготівок, яке утворюється трьохвитковим індуктором з радіальним розташуванням витків (подібне розташування витків виконано для узгодження роботи індуктора з високочастотним джерелом

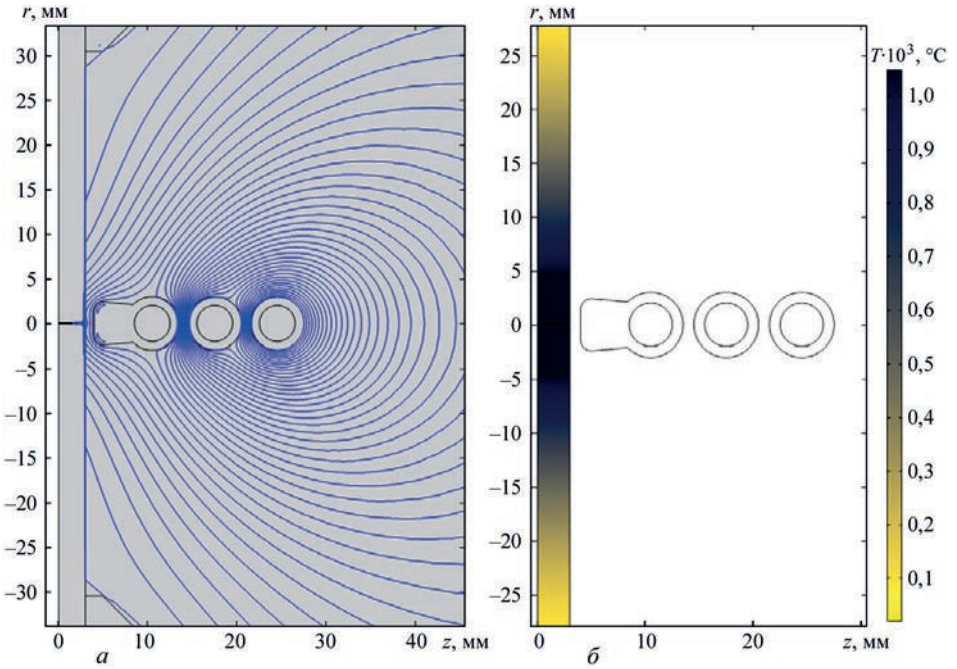


Рис. 7. Магнітні силові лінії розрахункового електромагнітного поля і розподіл температурного поля в районі зварного стику верхньої поверхні трубних заготівок, яке утворюється трьохвитковим індуктором з прямокутним концентратором магнітного поля

живлення) і прямокутним концентратором магнітного поля на внутрішній поверхні індуктора. Видно, що зварювальні торці заготівок прогріти рівномірно. Розрахунки здійснені чисельним методом скінчених елементів, які добре узгоджуються з дослідними даними.

На рис. 8 наведена розрахункова залежність [18] (яка підтверджена експериментом) температури від координат точок на поверхні зварювальних деталей на початку проведення пластичної деформації при осадженні і зварюванні фланця товщиною 8 мм із трубою з товщиною стінки 5 мм, а також зразок виконаного зварного з'єднання з використанням припою ПАН-3. Температура в зварювальних деталях знаходиться в діапазонах 1000…1100 і 950…1100 °С, в яких забезпечуються необхідні умови для розплавлення активуючих речовин в зварному шві і достатню для осадження пластичність сталі.

Характерною особливістю якісного зварного стикового з'єднання труб при виконанні процесу індукційного зварювання тиском із застосуванням активуючих речовин є відсутність на внутрішній поверхні труби ґрату у зоні зварного шву і його наявність на зовнішній поверхні у вигляді плавно опуклого валику, який для даного виду зварювання підсилює зварне з'єднання. Отримання такої форми зварного з'єднання (див. рис. 5 і 6) стає можливим завдяки створенню необхідного розподілу температурного поля в радіальному і осьовому напрямі ділянок зварювальних деталей від їх крайок [4], що визначається на стадії математичного моделювання і результатів вимірювання температур при зварюванні дослідних зразків.

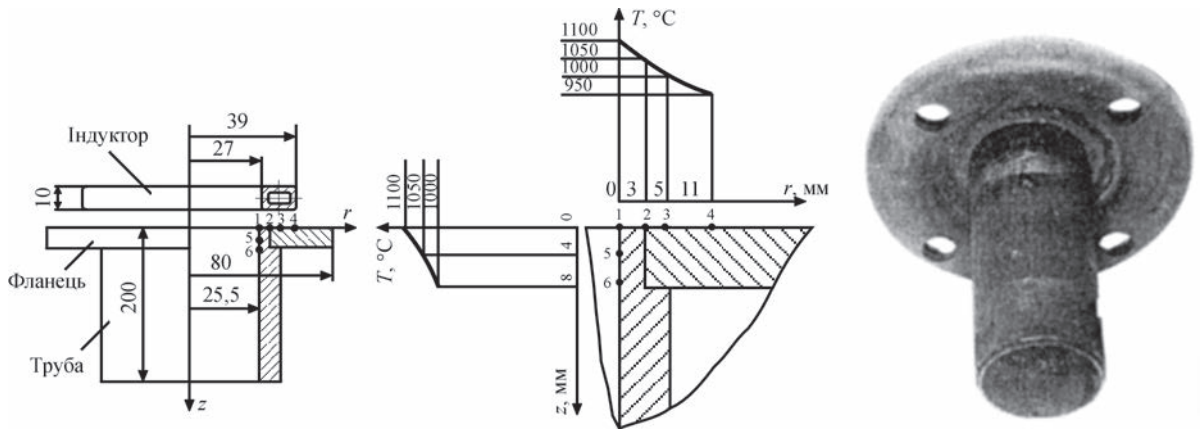


Рис. 8. Розрахункова схема процесу індукційного зварювання тиском із застосуванням активуючих речовин труби діаметром 60 мм з товщиною стінки 4 мм із фланцем з зовнішнім діаметром 160 мм з робочим органом – індуктором (*а*); розрахункова картина температурного поля у зварному шві та навколо шовної зони, для забезпечення якісного виконання зварювання (*б*) [18]; зразок зварного з'єднання труби із фланцем (*в*)

Розподіл температур обумовлює напрямок деформування крайок зварювальних деталей при осадженні і відповідно формування зварного шву. Об'єми металу із меншою температурою мають більший опір деформуванню ніж об'єми металу із більшою температурою.

Виконання осадження і деформація крайок зварювальних деталей у зварному шві і навколошовній зоні визначається за наступними чинниками: геометричними параметрами і конструктивними розмірами зварного з'єднання й індуктора; розподілом температурного поля у крайках зварювальних деталей і зварному шві та навколошовній зоні, при якому можливо виконати пластичну деформацію; зусиллям осадження (силою стискання) зварювальних деталей для забезпечення пластичної деформації зони шву.

При виконанні осадження велике значення має сила стискання, як фактор який суттєво впливає на кінцевий результат зварювання при отриманні товщини лінії зварного шву та розподілу хімічних сполук металу у самому шві.

Для стикових з'єднань труб міцність з'єднання на розрив та кут загину підвищується із збільшенням ступеню пластичної деформації ε у площині шва, яка відповідає закономірності [2]:

$$\varepsilon = (H/\delta)\cdot 100\ \%,$$

де $H$ – висота валика зварного шва на зовнішньому боці труби (рис. 9 і 10). На рисунках $a$ – внутрішній радіус індуктора; $c$ – половина ширини індуктора; $h_l$ – розмір металу у пластичному стані, який деформується і з якого формується валик з габаритними розмірами $H$ і $h_y$.

Ступінь пластичної деформації знаходиться у межах ε = 20…50 % в залежності від марки сталі. Така закономірність характерна і для показників ударної в'язкості зварних з'єднань [5].

Осадження виконується подібно до осадження процесу стикового контактного зварювання оплавленням, що забезпечується спеціальними зварю-

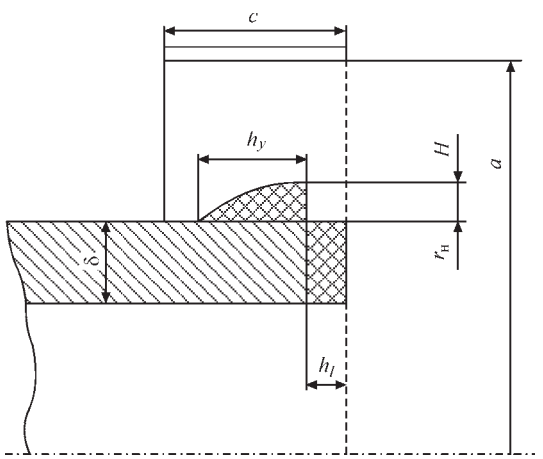


Рис. 9. Схема ділянки осадження крайок деталей, які підлягають зварюванню встик у процесі індукційного зварювання тиском із застосуванням активуючих речовин [17]

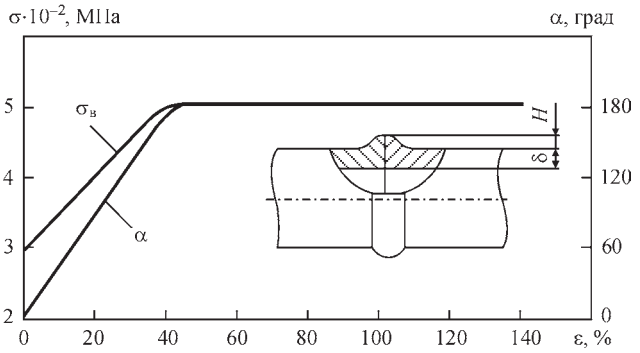


Рис. 10. Залежність міцності σ і кута загину α отриманого зварного з'єднання від ступеню пластичної деформації ε у площині зварного стику для стикового зварювання тиском із застосуванням активуючих речовин труб [2]

вальними машинами і обладнанням і призводить до пластичної деформації, контактного зминання і зменшення товщини зварного шву. Момент виконання осадження визначається температурою плавлення застосованої активуючої речовини і температурою при якому метал зварювальних крайок деталей стає пластичним. При досягненні температури пластичності металу не повинно відбуватися змін якості застосованої активуючої речовини у зоні зварного шву, що визначається на стадії її вибору.

При осадженні частина основного металу зварювальних деталей разом із продуктами активації (продуктами термічної і хімічної взаємодії та окислами і шлаками) і легкоплавкою фазою видавлюється на поверхню деталей, формуючи ґрат. Основний метал навколошовної зони, що має меншу температуру ніж метал у зварному шву і який під дією тиску переміщується в осьовому напрямі до шву, є основним чинником, що впливає на видавлення легкоплавкої фази на периферійні ділянки шву при взаємній зустрічній деформації.

Після осадження шов має дуже малу товщину – 3…7 мкм. Зазвичай приблизно 30…60 % довжини зварного шву наочно не піддається візуалізації і у з'єднанні має місце спільні проростілі зерна основного металу двох деталей без вкраплень легкоплавкої фази. Тобто з'єднання на цих ділянках відбувається по основному металу у твердій фазі.

Кристалізація залишків у шві легкоплавкої фази металу починає відбуватися у віддалених від джерела нагрівання – індуктора найменш нагрітих ділянках зварного шву. Так, при стиковому зварюванні товстостінних труб малого діаметру ці ділянки розташовані ближче до внутрішньої поверхні труби. Саме вони при зустрічній взаємній деформації зварювальних деталей при осадженні першими вступають у формування зварного шву.

На рис. 11 наведена залежність [10] хімічного складу металу у зварному шві у процесі індукційного зварювання тиском із застосуванням активуючих речовин в залежності від його товщини, отримана В.Д. Табелевим, а в таблиці – показники

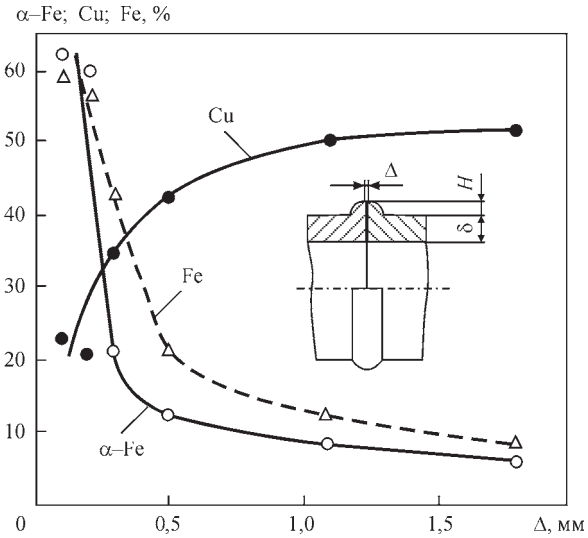


Рис. 11. Залежність хімічного складу металу у зварному шві у процесі індукційного зварювання тиском із застосуванням активуючих речовин в залежності від його товщини (ПАН-3 і тетраборат натрію) [10]

**Таблиця. Масовий склад основних елементів у зварному шві, в залежності від ступеня пластичної деформації ε для процесу індукційного зварювання тиском із застосуванням активуючих речовин [2]**

| ε, % | Масовий склад основних елементів, % | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Fe | Cu | Mn | Ni | Si |
| 2,2 | 68,1[1] | 5,30[1] | 18,1[1] | 3,2[1] | 4,6[1] |
| | 62,0[2] | 6,10[2] | 26,1[2] | 3,2[2] | 2,7[2] |
| 12,5 | 83,2[1] | 2,76[1] | 6,1[1] | 1,7[1] | 2,1[1] |
| | 88,2[2] | 1,30[2] | 8,5[2] | 1,3[2] | 0,7[2] |
| 38,0 | 93,5[1] | 0,52[1] | 3,3[1] | 0,7[1] | 0,7[1] |
| | ~97[2] | 0,30[2] | 1,5[2] | < 1[2] | 0,6[2] |
| *Примітка:* [1] – дані рентгеноспектрального аналізу<br>[2] – дані оптико-спектрального аналізу | | | | | |

масового складу основних елементів у ньому, в залежності від ступеню деформації [2].

Хімічні елементи із неметалічних домішок порошкоподібної суміші активуючої речовини при нагріванні внаслідок дифузії переміщуються у легкоплавку фазу, де утворюють нові з'єднання, а при осадженні разом із легкоплавкою фазою видавлюються із зони зварного шву.

На мікрорентгеноспектрограмі на рис. 12 показано розподіл залишків хімічних елементів активуючих речовин, які входять до основного металу у поперечному перерізі отриманого зварного шву [19]. Внаслідок термічної і хімічної взаємодії їх концентрація підвищується від основного металу в навколошовній зоні до максимального значення у зварному шві. Підвищення їх концентрації у шві не є бажаним. Лише при встановленні балансу між основними чинниками процесу зварювання можливо отримати зварні шви з найменшим включенням залишків легкоплавкої фази (рис. 13, *а*) [18, 20], або їх практичною відсутністю (рис. 13, *б*). На рис. 12 фрагментарно, на окремій ділянці, у вигляді лінії товщиною 2…7 мкм спостерігаються залишки легкоплавкої фази, яка не була повністю видавлена (рис. 13, а), а частка міді (Cu) у шві складає ~1,5 % [18, 19]. Частка міді у шві, в якому він не візуалізується (рис. 13, *б*) складала лише ~0,018 % [18, 19]. Така мала частка обумов-

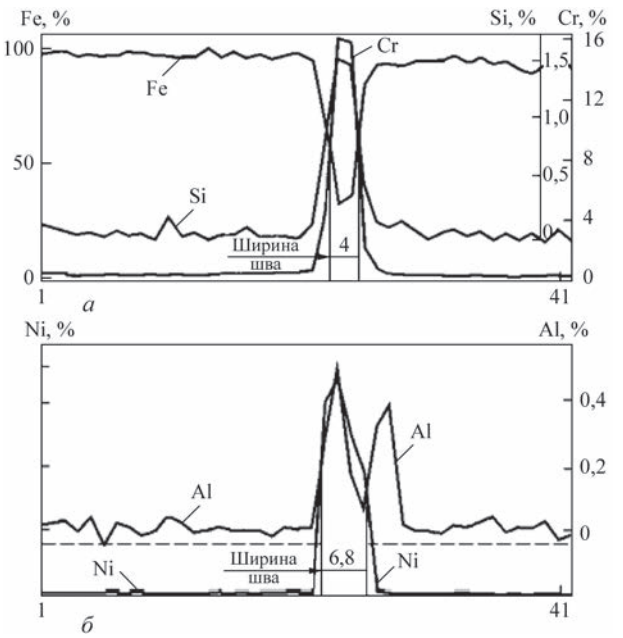


Рис. 12. Розподіл основних хімічних елементів у зварному шві завтовшки 2…7 мкм [19]: Fe – основний метал, Cr, Si – у складі основного металу (у залишках легкоплавкої фази припою спостерігається підвищення концентрації Cr і Si та зниження концентрації Fe) (*а*); Al, Ni – у складі основного металу, (у залишках легкоплавкої фази припою спостерігається підвищення концентрації Al і Ni) (*б*)

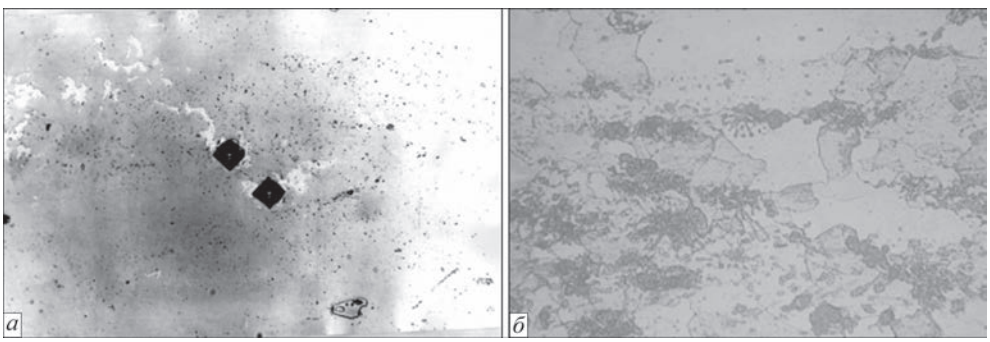


Рис. 13. Лінії зварного шва завтовшки до 2,5 мкм (збільшення ×320): із ізольованими вкрапленнями легкоплавкої фази припою (*а*) [18, 20]; без вкраплень легкоплавкої фази припою, яка наочно не визначається через взаємне проростання спільних зерен основного металу обох зварювальних деталей (*б*)

лена практично повним її видавленням на периферію зварного шву у валик та ґрат. Підвищення складу заліза (Fe) та зниження інших компонентів, які були у складі активуючої речовини, безпосередньо залежать від ступеню деформації при стисканні. Було також проведено аналіз складу залишків легкоплавкої фази за елементами Fe, Si, Cr, Ni, Al. Так, у лінії зварного шва основним елементом є залізо α-Fe, частка якого внаслідок дифузійних процесів із основного металу зварювальних деталей складає 45 %.

Довжина ліній зварного шва із залишками легкоплавкої фази (рис. 13, *а*) складає ~40 % від загальної довжини шву, а інша частина довжин ліній зварного шву ~60 % не візуалізується (рис. 13, *б*), що підтверджує присутність у з'єднанні проростлих зерен основного металу без вкраплень легкоплавкої фази, що свідчить про те, що більша частина з'єднання відбулася по основному металу у твердій фазі.

На периферійних ділянках деталей труб і трубної арматури, які віддалені від зварного шва і де температурний вплив є невеликим, при виконанні осадження можуть утворюватися ділянки із механічним впливом деформування у межах пружної деформації, поверхневого нагартування, що може призвести до тріщиноутворення на поверхні деталей при їх експлуатації, особливо при відхиленні від необхідного температурного поля. Подібні вади можна виправити, застосувавши післязварювальну індукційну ТО зварного з'єднання тим же індуктором.

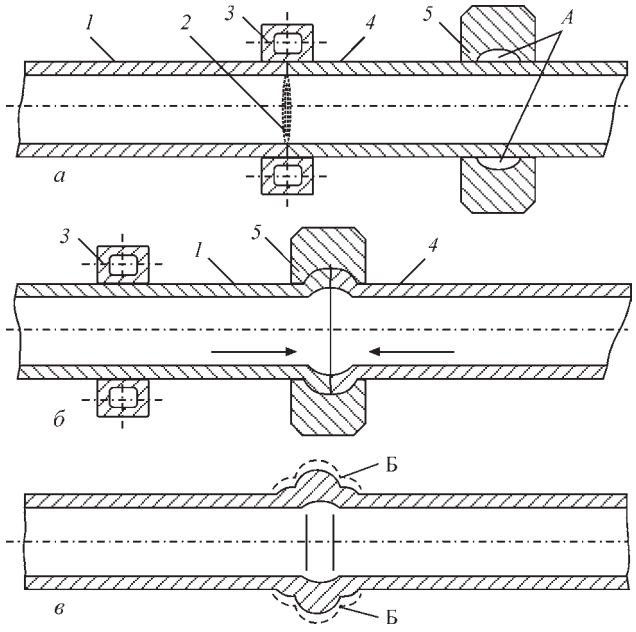


Рис. 14. Схема формування зварного шва у процесі індукційного зварювання тиском з використанням спеціального пристрою, формуючого зовнішній валик заданої форми [19, 21]: процес нагрівання (*а*); процес осадження (*б*); отримане зварне з'єднання (*в*): *1* і *4* – зварювальні трубні деталі; *2* – активуючі речовини у зварному шві; *3* – кільцевий індуктор; *5* – формуючий пристрій; А – формуюча внутрішня поверхня пристрою; Б – отримана зовнішня поверхня зварного шва

Визначалась також мікротвердість за Віккерсом у зварному з'єднанні вуглецевої сталі (рис. 13, *а*). Мікротвердість на лінії зварного шву становить *HV*0,25 – 1720…1790 МПа, навколошовної зони – *HV*0,25 – 1680…1810 МПа, основного металу – *HV*0,25 – 1680…1930 МПа [19]. Ці дані свідчать про наближення показників твердості лінії зварного шву із незначними залишками легкоплавкої фази і навколошовної зони до показників твердості основного металу. Крихких структур і структур притаманних високотемпературному нагріванню не виявлено.

На рис. 14 показана схема формування зварного шва у процесі індукційного зварювання тиском з використанням спеціального пристрою, формуючого зовнішній валик заданої форми [18, 21].

Процес індукційного зварювання тиском із застосуванням активуючих речовин трубної арматури характеризується відносно малим часом зварювання – від 40 с при тонкостінних деталях до 120 с при товстостінних деталях, включаючи процес нагрівання до робочої температури більшої частини металу під індуктором вище точки $Ac_3$. Це обумовлює зниження вірогідності утворення метастабільних структур в зоні зварного шва. Скорочуючи тривалість перебування металу в інтервалі температур, які є вищими за точки фазових перетворень, а також зменшуючи швидкість охолодження поступовим зниженням струму в індукторі в інтервалі температур 500…600 °С, можна отримати необхідний рівень ударної в'язкості і міцності у зварному з'єднанні. Встановлено [22], що на значення ударної в'язкості у навколошовній зоні впливає величина (бал) зерна аустеніту, яка залежить від швидкості охолодження. За даними роботи [23], висока швидкість кристалізації легкоплавкої фази металу зварного шву, а також пластична деформація основного металу при осадженні призводять до деформації кристалічної решітки металу навколошовної зони, що негативно впливає на показники міцності. Це також пов'язано із повним, або частковим фазовим перетворенням фериту в аустеніт. Тому ТО після зварювання є бажаною, а в ряді випадків і необхідною для нормалізації металу зварного з'єднання і зняття залишкових напружень.

Зазначимо невисоке енергоспоживання в процесі індукційного зварювання тиском із застосуванням активуючих речовин в зв'язку із невисокою температурою зварювання без необхідності розплавлення основного металу і можливістю вкладання дозованої теплової потужності саме у місце з'єднання зварювальних крайок за рахунок проникнення магнітного поля [8]. Однак обладнання для здійснення процесу є коштовним.

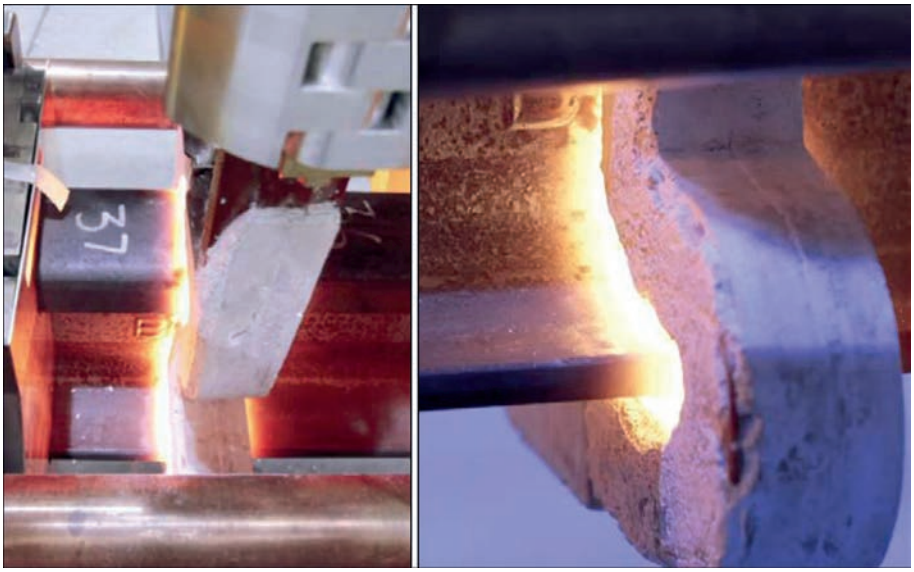

Рис. 15. Індукційне зварювання тиском залізничних рейок [27]

Застосування індукційного нагрівання при якому виділення теплової енергії у струмопровідному тілі, що знаходиться у змінному електромагнітному полі, є прогресивним і має важливу перевагу безконтактної передачі дозованої енергії в задану ділянку виробу, як за наявністю атмосфери, так і за її відсутністю. Така передача енергії не впливає на виріб, на відміну, наприклад, від газополум'яного нагрівання, де можливе навуглецьовування поверхні виробу.

Перспективними напрямками досліджень індукційного зварюванні тиском з використанням активуючих речовин є математичне моделювання електромагнітних, теплових і термо-деформаційних процесів сучасними методами розрахунку; фізичне моделювання процесів на модельних зразках; з'єднання різнорідних сталей, в тому числі важко зварюваних [24–26]; дослідження післязварювальної ТО місця з'єднання; і особливо зварювання суцільних стрижнів різного профілю, в тому числі прокатних масивних тіл із складним поперечним перерізом, включаючи залізничні рейки (рис. 15) [27].

Відмітимо розширення застосування самого процесу індукційного нагрівання. Окрім відомих виробничих процесів пов'язаних із нагріванням і плавленням металів, таких як термічна і термохімічна обробка деталей машин, обробка тиском, зварювання, паяння, наплавлення, а також виплавка металів у електропечах, ще одним сучасним напрямком його розвитку є застосування у гібридних процесах зварювання [28] та у підготовчих операціях, таких як підігрів зварювальних деталей, підігрів електродів при плавлені металів [29, 30].

**Висновки**

До переваг процесу індукційного зварювання тиском із застосуванням активуючих речовин, слід віднести наступне: безконтактне, бездротове підведення енергії при виконанні зварювання; активація поверхні крайок деталей, які підлягають зварюванню; економне енергоспоживання за рахунок зниженої температури зварювання у твердій фазі і можливість вкладання дозованої теплової потужності саме у місце з'єднання зварювальних крайок завдяки проникненню магнітного поля; висока вірогідність збереження первинної структури кристалічної решітки металу шву і навколошовної зони завдяки зниженій температурі зварювання; отримання зварних стикових швів труб без внутрішнього грату завдяки контрольованій пластичній деформації при осадженні; наближення показників твердості зварного з'єднання до показників твердості основного металу; можливість проведення термічної обробки зварного з'єднання безпосередньо після процесу зварювання тим же індукційним обладнанням, яке використовується для процесу зварювання.

До складності процесу слід віднести те, що необхідна точна підгонка крайок зварювальних деталей для отримання якісного складання під зварювання; підбір і апробація активуючої речовини і додаткова операція її нанесення на крайки зварювальних деталей або її попереднє розташування у зварному проміжку; коштовне обладнання для здійснення процесу.

## Список літератури


1. Лебедев В.К., Табелев В.Д., Письменный А.С. (1983) Стыковая пайка под давлением стальных трубопроводов. *Автомат. сварка*, **9**, 25–27.
2. Письменный А.С., Табелев В.Д., Карета Н.Л. и др. (1985) Структура и фазовый состав швов, выполненных капиллярной пайкой и пайкой с приложением давления. *Автомат. сварка*, **11**, 26–29.
3. Лебедев В.К., Табелев В.Д., Письменный А.С. и др. (1989) Высокотемпературная пайка труб для геологоразведочного бурения. *Автомат. сварка*, **5**, 28–30.
4. Лебедев В.К., Письменный А.С., Касаткин О.Г. и др. (1990) Физическое моделирование осадки при сварке или пайке-сварке труб встык. *Автомат. сварка*, **8**, 17–20.

5. Лебедев В.К., Табелев В.Д., Письменный А.С. (1993) Ударная вязкость стыковых соединений, паяных с пластическим деформированием основного металла. *Автомат. сварка*, **8**, 29–31.
6. Письменный А.С., Шинлов М.Е., Буженецкий А.И. (1995) Применение индукционной сваркопайки для соединения труб нефтяного сортамента. *Автомат. сварка*, **12**, 35–38.
7. ДСТУ 3761. 2-98 (2006) *Зварювання та споріднені процеси. Ч. 2. Процеси зварювання та паяння. Терміни та визначення. Зміна № 1 – Абетковий покажчик українських термінів доповнити терміном «Зварювання-паяння під тиском» і класифікаційним номером терміностатті 3.92. Чинна від 2006.07.01 (ІПС № 3), 1.*
8. Письменный А.С. (2005) *Индукционный нагрев для сварки и родственных технологий*. Б.Е. Патон (ред.). Киев, ИЭС им. Е.О. Патона.
9. Pis'menny A.S. (1997) *High-frequency welding of metals*. Ed. by B.E. Paton. Amsterdam: Harwood Acad. Publ.
10. Письменный А.С., Прокофьев А.С. (2002) Прессовая сварка труб с применением активирующих веществ. *Автомат. сварка*, **7**, 22–27.
11. Письменный А.С. (2008) *Высокочастотная сварка металлических изделий. Индукционный нагрев для сварки и родственных технологий*. Б.Е. Патон (ред.). Киев, ИЭС им. Е.О. Патона.
12. Полухин В.В., Прокофьев А.С., Ромашко Д.В. и др. (2018) Влияние активирующих веществ на качество спиральношовных труб, полученных с применением высокочастотной сварки. *Автомат. сварка*, **10**, 32–39. https://doi.org/10.15407/as2018.10.05
13. Гельман А.С. (1970) *Основы сварки давлением*. Москва, Машиностроение.
14. Кучук-Яценко С.И., Кирьян В.И., Казымов Б.И. и др. (2008) Особенности испытаний на ударную вязкость сварных соединений труб, выполненных автоматической контактной стыковой сваркой оплавлением. *Автомат. сварка*, **10**, 5–11.
15. Кучук-Яценко С.И., Письменный А.С., Шинлов М.Е. и др. (2006) Ускоренная индукционная термообработка сварных швов труб из сталей контролируемой прокатки. *Автомат. сварка*, **3**, 9–13.
16. Кучук-Яценко С.И., Швец Ю.В., Загадарчук В.Ф. (2013) Технология термической обработки соединений труб из стали класса прочности К56, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением. *Автомат. сварка*, **2**, 3–8.
17. Письменный А.С. (1990) Синтез индукционных систем для сварки и пайки труб встык. *Автомат. сварка*, **5**, 11–15.
18. Прокоф'єв А.С. (2007) *Індукційне зварюкопаяння тонкостінних трубчастих конструкцій проміжної та кінцевої трубчастої арматури*. Автореф. дис. … канд. техн. наук, 05.03.06. Київ, Нац. техн. ун-т України «Київський політехн. ін-т».
19. Письменный А.С., Прокофьев А.С., Письменный А.А. и др. (2010) Свойства сварных соединений трубных заготовок, полученных прессовой сваркопайкой с формирующим устройством. Автомат. сварка, **7**, 25–28.
20. Письменный А.С., Новикова Д.П., Прокофьев А.С. и др. (2004) Свойства металла шва при индукционной сваркопайке стали 20. *Автомат. сварка*, **12**, 27–33.
21. Письменний О.С., Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (UA) (2010) *Спосіб стикового зварювання тиском у твердій фазі стрижнів та труб*. Пат. № 92965.
22. Лебедев Б.Ф., Пащин А.Н., Дудко С.М. (1989) Влияние термического цикла сварки с принудительным формированием шва на размер зерна и ударную вязкость металла ЗТВ конструкционных сталей. *Автомат. сварка*, **11**, 1–5.
23. Карета Л.Н., Сладкова В.Н. (1985) Об искажениях кристаллической решетки в металле ЗТВ сварных соединений углеродистых и низколегированных сталей. *Автомат. сварка*, **5**, 18–19.
24. Kane, B., Wasselynck, G., Bui, HK. et al. (2020) Focalization of electromagnetic power at the interface between two composites materials for induction welding. *The European Physical J. Applied Physics*, 91, 10902-p1–10902-p5. https://doi.org/10.1051/epjap/2020200022
25. Vollmer M., Baunack D., Janoschka D. et al. (2020) Induction Butt Welding Followed by Abnormal Grain Growth: A Promising Route for Joining of Fe–Mn–Al–Ni Tubes. *Shap. Mem. Superelasticity*, **6**, 131–138.
26. Bhogendro Meitei, R.K., Maji, P., Kumar, P. et al. (2022) Induction Welding of 304L Stainless Steel and Copper in Vacuum Environment. *J. of Materials Engineering and Performance*, 31, 7220–7227.
27. Network Rail Mirage Rail Induction Welder Trial. https://www.youtube.com/watch?v=b8X1FhoY6ro.
28. Mohan, D., Tomków, J., Gopi, S. (2021) Induction Assisted Hybrid Friction Stir Welding of Dissimilar Materials AA5052 Aluminium Alloy and X12Cr13 Stainless Steel. *Advances in Materials Science*, 21(**3**), 17–30.
29. Медовар Л.Б., Лебідь В.А., Письменний О.С., Пентегов І.В., Римар С.В., ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (UA) (2018) *Спосіб попереднього підігріву масивного металевого електрода для процесу електрошлакового переплаву металу*. Пат. на кор. модель № 125005.
30. Медовар Л.Б., Лебідь В.А., Письменний О.С., Пентегов І.В., Римар С.В., ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (UA) (2018) *Індукційна установка для підігріву металевого електрода для процесу електрошлакового переплаву метала* Пат. на кор. модель № 126093.


## References


1. Lebedev, V.K., Tabelev, V.D., Pismenny, A.S. (1983) Pressure butt brazing of steel pipelines. *Avtomatich. Svarka,* **9**, 25–27 [in Russian].
2. Pismenny, A.S., Tabelev, V.D., Kareta, N.L. et al. (1985) Structure and phase composition of welds made by capillary brazing and pressure brazing. *Avtomatich. Svarka,* **11**, 26–29 [in Russian].
3. Lebedev, V.K., Tabelev, V.D., Pismenny, A.S. (1989) High-temperature brazing of pipes for exploration work drilling. *Avtomatich. Svarka,* **5**, 28–30 [in Russian].
4. Lebedev, V.K., Pismenny, A.S., Kasatkin, O.G. et al. (1990) Physical modeling of upsetting in butt welding and braze-welding of pipes. *Avtomatich. Svarka***,** **8**, 17–20 [in Russian].
5. Lebedev, V.K., Tabelev, V.D., Pismenny, A.S. (1993) Impact toughness of butt joints brazed with plastic deformation of base metal. *Avtomatich. Svarka,* **8**, 29–31 [in Russian].
6. Pismenny, A.S., Shinlov, M.E., Buzhenetsky, A.I. (1995) Application of induction braze welding for joining of pipes of petroleum assortment. *Avtomatich. Svarka,* **12**, 35–38 [in Russian].
7. DSTU 3761. 2-98 (2006) Welding and related processes. Pt 2. Welding and soldering processes. Terms and definitions. Change No. 1 – Add the term «Pressure braze-welding» and the classification number of the term article 3.92 to the alphabetical index of Ukrainian terms. Valid from 2006.07.01.
8. Pismenny, A.S. (2005) *Induction heating for welding and related technologies.* Ed. by B.E. Paton. Kyiv, PWI [in Russian].
9. Pis'menny, A.S. (1997) *High-frequency welding of metals*. Ed. by B.E. Paton. Amsterdam: Harwood Acad. Publ.
10. Pismenny, A.S., Prokofiev, A.S. (2002) Press welding of pipes using activating materials. *The Paton Welding J.,* **7**, 22–27.
11. Pismenny, A.S. (2008) *High-frequency welding of metal products. Induction heating for welding and related technologies.* Ed. by B.E. Paton. Kyiv, PWI [in Russian].
12. Polukhin, V.V., Prokofiev, A.S., Romashko, D.V. et al. (2018) Influence of activators on the quality of spirally-welded pipes, produced with application of high-frequency welding. *The Paton Welding J.,* **10**, 32–39. https://doi.org/10.15407/as2018.10.05
13. 13.Gelman, A.S. (1970) Fundamentals of pressure welding. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
14. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Kirian, V.I., Kazymov, B.I. et al. (2008) Peculiarities of impact toughness tests of automatic

flash butt welded joints on pipes. *The Paton Welding J.,* **10**, 5–10.
15. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Pismenny, A.S., Shinlov, M.E. et al. (2006) Accelerated induction heat treatment of welds on pipes from controlled-rolled steels. *The Paton Welding J.,* **3**, 7-10.
16. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Shvets, Yu.V., Zagadarchuk, V.F. et al. (2013) Technology of heat treatment of pipe joints from steel of K56 grade produced by flash-butt welding. *The Paton Welding J.,* **2**, 2-7.
17. Pismenny, A.S. (1990) Synthesis of induction systems for butt welding and brazing of pipes. Avtomatich. Svarka, **5**, 11–15.
18. Prokofiev, A.S. (2007) *Induction braze welding of thin-wall tubular structures of intermediate and final tubular fittings.* In: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree. Kyiv, NTU Kyiv Polytechnic Institute [in Ukrainian].
19. Pismenny, A.S., Prokofiev, A.S., Pismenny, A.A. et al. (2010) Properties of the welded joints of tubular billets produced by pressure braze-welding with a forming device. *The Paton Welding J.,* **7**, 22-25.
20. Pismenny, A.S., Novikova, D.P., Prokofiev, A.S. et al. (2004) Properties of weld metal at induction braze-welding of steel 20. *The Paton Welding J.*, **12**, 26-32.
21. Pismenny, O.S. (2010) *Method of pressure butt welding in solid phase of bars and pipes.* Pat. 92965 *Ukraine, PWI [in Ukrainian].*
22. Lebedev, B.F., Pashchin, A.N., Dudko, S.M. (1989) Influence of welding thermal cycle with forced formation of weld on grain size and impact toughness of HAZ metal of structural steels. *Avtomatich. Svarka,* **11**, 1–5 [in Russian].
23. Kareta, L.N., Sladkova, V.N. (1985) On distortions of crystalline lattice in HAZ metal of joints of carbon and low-alloyed steels. *Avtomatich. Svarka,* **5**, 18–19 [in Russian].
24. Kane, B., Wasselynck, G., Bui, HK. et al. (2020) Focalization of electromagnetic power at the interface between two composites materials for induction welding. *The European Physical J. Applied Physics*, 91, 10902-p1–10902-p5. https://doi.org/10.1051/epjap/2020200022
25. Vollmer, M., Baunack, D., Janoschka, D. et al. (2020) Induction butt welding followed by abnormal grain growth: A promising route for joining of Fe–Mn–Al–Ni tubes. *Shap. Mem. Superelasticity*, **6**, 131–138.
26. Bhogendro Meitei, R.K., Maji, P., Kumar, P. et al. (2022) Induction welding of 304L stainless steel and copper in vacuum environment. *J. Mater. Eng. and Performance*, 31, 7220–7227.
27. Network Rail Mirage Rail Induction Welder Trial. https://www.youtube.com/watch?v=b8X1FhoY6ro.
28. Mohan, D., Tomków, J., Gopi, S. (2021) Induction assisted hybrid friction stir welding of dissimilar materials AA5052 aluminium alloy and X12Cr13 stainless steel. *Advances in Materials Sci.*, 21(**3**), 17–30.
29. Medovar, L.B., Lebid, V.A., Pismennyi, O.S., Pentegov, I.V., Rymar, S.V. (2018) *Method of solid electrode preheating for electroslag remelting process of metal.* Pat. on utility model 125005 Ukraine, PWI [ in Ukrainian].
30. Medovar, L.B., Lebid, V.A., Pismennyi, O.S., Pentegov, I.V., Rymar, S.V. (2018) *Induction installation of metal electrode heating for electroslag remelting process of metal.* Pat. on utility model 126093, Ukraine, PWI [in Ukrainian].

# INDUCTION WELDING OF PIPES AND PIPE FITTINGS WITH THE USE OF ACTIVATING SUBSTANCES (Review)

O.S. Prokofiev[1], R.S. Gubatyuk[1], S.V. Rymar[1], V.M. Abdulah[1], O.I. Petrienko[1], V.S. Senchyshyn[2]

[1] E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: sytor301@ukr.net
[2]Ternopil Ivan Puluj National Technical University. 56 Ruska Str., 46001, Ternopil, Ukraine.

In the framework of studies aimed at the development of technologies of welding steels in a solid phase at the PWI of NAS of Ukraine, a method of induction pressure welding of pipes and pipe fittings with the strength of welded joint at the level of base metal with the use of activating substances was developed. The process of joining occurs when welded edges of base metal are heated to the plastic state with a heat from eddy currents and by a complete melting of preliminary activating substances introduced into the place of a joint, which are chemically cleaned and partially dissolve the metal of the surface of welding edges and as the pressure is applied to the edges, they are squeezed out from the welded joint zone. Due to the applied pressure, the welded joint is formed in the solid phase by a plastic deformed base metal. In the weld, only slight embeddiments of metal fraction of the activating substance and its alloy with the base metal are observed. 30 Ref., 1 Tabl., 15 Fig.

*Keywords: induction pressure welding, activating substances, induction heating, welded butt, pipes, pipe fittings*

Надійшла до редакції 28.03.2023

**VII Міжнародна конференція**
**«Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи діагностування і прогнозування»**

18–20 жовтня 2023 р. на базі Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя відбудеться 7-а Міжнародна конференція «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи діагностування і прогнозування» (VII International Conference «In-service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction»).

Організатори заходу – Європейське товариство з цілісності конструкцій (ESIS), Українське товариство з механіки руйнування матеріалів, Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України та Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України.

Наукові напрями конференції: методи оцінювання, прогнозування та виявлення пошкодження матеріалів, неруйнівний контроль, методи оцінювання деградації та запобігання руйнуванню, проблеми впливу середовища на руйнування і міцність матеріалів, довговічність, цілісність та подовження терміну служби конструкцій.

Робоча мова: англійська.

Форма участі у конференції: очна, онлайн. Кінцевий термін реєстрації учасників – 1 вересня 2023 р. Тези доповідей приймаються до 1 вересня 2023 р.

Виголошені доповіді після рецензування буде опубліковано у спецвипуску «Procedia Structural Integrity», що індексується базами «Scopus» і «WoS».