

Пирогов В.А., Бабич В.К. О связи величины S_0 кривой деформации с параметрами уравнения Холла – Петча // *Металлофизика*. – 1986. – Т.8, №6. – С.61 – 64. 4. Панченко Е.В., Скаков Ю.Л., Кример Б.И. *Лаборатория металлографии*. – М.: *Металлургия*, 1965. – 439 с. 5. Hall E.O. *The deformation and ageing of mild steel. III Discuss. Proc. Phys. Soc.* – 1951. – V B–64, Pt.9. – P.747–753. 6. Cottrell A.H. *Theory of brittle fracture in steel and similar metals. Trans. Met. Soc. AIME.* – 1958. – V212. – P.192–209. 7. Кузін О.А., Яцюк Р.А. *Металознавство та термічна обробка металів*. – К.: *Основа*, 2005. – 324 с. 8. Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.О. *Превращения в железе и стали*. – М.: *Наука*, 1977. – 236 с. 9. Garofalo F. *Factors affecting the propagation of a Luders band and lower yield stress in iron. Met. Trans.* – 1971. – V.2. – №8. – P. 2315–2317. 10. *Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике*. – М.: *Наука*, 1975. – 871 с.

УДК 621.791

А.Р. Дзюбик, В.М. Палаш, В.І. Паньків
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра зварювального виробництва, діагностики і відновлення металоконструкцій

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗВАРЮВАННЯ СТИКІВ ТРУБОПРОВОДІВ

© Дзюбик А.Р., Палаш В.М., Паньків В.І., 2011

Проведено дослідження технології зварювання кільцевих стиків трубопроводів, виготовлених з маловуглецевих низьколегованих сталей. Показано, що під час застосування вискоефективних та енергоощадних зварювальних процесів, включно із гібридними технологіями, можна істотно зменшувати погонну енергію за збереження високої технологічної міцності.

Research of technology of welding of circular joints of pipelines, made from low-carbon stahl is conducted. It is rotined that at application of high-efficiency and welding processes, inclusive with hybrid technologies it is possible substantially to diminish linear energy at the maintainance of high technological durability.

Актуальність теми. Під час спорудження та ремонту різного типу трубопроводів виконується дуже великий обсяг робіт зі зварювання кільцевих стиків між окремими трубами. Насамперед це відбувається у випадку магістральних нафто- та газопроводів, які переважно виготовляються зі сталевих труб великого діаметра (до 1420 мм) та товщиною стінки, яка у багатьох випадках сягає 20–25 мм. Сьогодні розроблені доволі ефективні технології зварювання кільцевих стиків як обертових, так і необертових. Найпоширеніші з них ґрунтуються на механізованих способах дугового зварювання суцільними та порошковими дротами [1]. Одночасно з механізованими способами постійно вдосконалюється і ручне дугове зварювання під час виконання необертових стиків [2].

Окрім забезпечення необхідної якості та експлуатаційної надійності, останнім часом все більшого значення надається економії енергетичних та матеріальних ресурсів під час виконання зварних з'єднань. Це досягається зменшенням кількості наплавленого металу та величини погонної енергії (тепловкладення на одиницю довжини зварного шва). Одним з найперспективніших напрямів вирішення цієї проблеми є використання так званих гібридних технологій зварювання, які об'єднують два зварювальні джерела нагрівання, що одночасно діють на зварювальну ванну. Широкі перспективи щодо зменшення енергетичних та матеріальних затрат під час зварювання труб великого діаметра і під час спорудження магістральних трубопроводів відкриває створення установок для гібридного зварювання на основі волоконних лазерів з використанням електричної дуги [3, 4].

Зменшення витрат електроенергії під час дугового зварювання плавленням відбувається також за рахунок активного неперервного керування основними параметрами режиму (величин зварювального струму, напруги на дузі, швидкості та траєкторії руху електродного дроту) під час процесу плавлення дроту, формування електродних крапель та їх перенесення у зварювальну ванну, особливо під час закорочень дугового проміжку, за мінімально можливої величини основного зварювального струму. Це значною мірою реалізується за імпульсно-дугового зварювання та за процесів на основі STT, CMT і CVT технологій [5, 6]. Але зменшення погонної енергії, що існує при цих процесах, включаючи і гібридні, у випадку зварювання високоміцних сталей, схильних до мартенситного та бейнітного перетворень, внаслідок можливого утворення крихких ділянок у колошовній зоні може призвести до зниження технологічної міцності та експлуатаційної надійності з'єднань. У зв'язку з цим особливої важливості набувають дослідження впливу режиму зварювання, зокрема погонної енергії, на характер фазових і структурних перетворень у найнебезпечнішій – колошовній ділянці зони термічного впливу (ЗТВ), на її механічні властивості та розміри.

Мета роботи – дослідити вплив параметрів режиму зварювання, зокрема погонної енергії, на характер структурних перетворень у ділянці перегріву ЗТВ, її лінійні розміри та основні механічні властивості металу високоміцних трубних сталей у цій ділянці з метою встановлення науково обґрунтованих мінімально допустимих величин погонної енергії.

Методика проведення досліджень. Здійснювалось моделювання термічних циклів за однопрохідного та багатопрохідного дугового зварювання низьколегованих сталей на зразках різної товщини – від 4 до 30 мм. Погонна енергія змінювалась у доволі широких межах – від 5 до 30 КДж/см.

При цьому залежно від розмірів зразків та режиму зварювання під час аналізу температурних полів використовувались такі розрахункові схеми:

потужне швидкорухоме джерело у тонкій пластині:

$$\Delta T = \frac{q_U}{2 \cdot p \cdot l \cdot R} \cdot e^{\left[\frac{v}{2a} \cdot (x+R) \right]}; \quad (1)$$

потужне швидкорухоме точкове джерело на поверхні напівнескінченного тіла з адіабатичною границею:

$$DT = \frac{q_U}{2 \cdot p \cdot l \cdot d} \cdot e^{\left(-\frac{v \cdot x}{2a} \right)} \cdot K_0(U), \quad (2)$$

де DT – зростання температури точки тіла; q_U – ефективна теплова потужність джерела; v – швидкість зварювання; d – товщина зварюваної пластини; λ – коефіцієнт теплопровідності; Cg – об'ємна теплоємність металу; t – час; R – просторовий радіус-вектор, віддаль точки від початку рухомої системи координат, $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$; a – коефіцієнт температуропровідності; $K_0(U)$ – функція Беселя від уявного аргументу другого роду нульового порядку; b – коефіцієнт температуровіддачі з поверхні пластини.

Швидкість охолодження зварних швів та наплавлених валиків обчислювалася за формулами такими формулами (3 – 5).

У разі наплавлення валиків на масивну деталь

$$\omega_{ox} = 2\pi\lambda \frac{(T - T_0)^2}{\left(\frac{q}{V_{3\sigma}} \right)}; \quad (3)$$

за однопрохідного зварювання тонких пластин:

$$\omega_{ox} = 2\pi\lambda C_\gamma \frac{(T - T_0)^3}{\left(\frac{q}{V\delta} \right)^2}; \quad (4)$$

у разі зварювання стосовно товстих пластин:

$$\omega_{ox} = 2\pi\lambda \frac{(T - T_0)^2}{\left(\frac{q}{V_{зв}}\right)} \psi, \quad (5)$$

де λ — коефіцієнт теплопровідності; $q/V_{зв}$ — погонна енергія зварювання; C_γ — об'ємна теплоємність; δ — товщина пластини; ψ — коефіцієнт, що залежить від товщини пластини та режиму зварювання, який визначається за спеціальними номограмами; T — вихідна температура, за якої здійснюється зварювання чи наплавлення.

Розмір ділянки перегріву визначався за виразами:

$$\text{для масивної деталі } l = \sqrt{\frac{2q}{p \cdot e \cdot V \cdot c_g \cdot T}}; \quad (6)$$

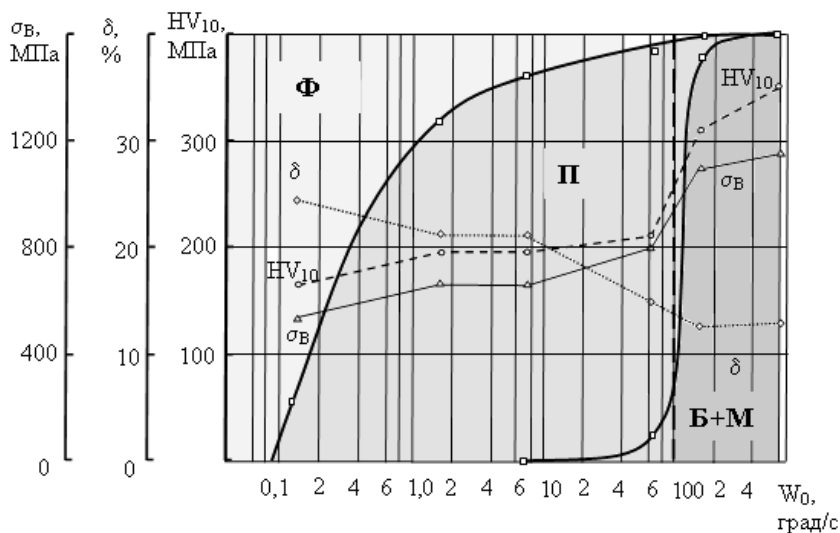
$$\text{тонка пластина } l = \frac{q}{V \cdot c_g \cdot T \cdot d} \sqrt{\frac{1}{2 \cdot p \cdot e}}. \quad (7)$$

Аналіз структурних перетворень здійснювали, використовуючи діаграми анізотермічного перетворення аустеніту та структурні діаграми високоміцних трубних сталей [7].

Основні результати. Отримані результати підрахунку швидкостей охолодження з використанням спеціалізованого програмного забезпечення показують, що у розглянутому діапазоні погонних енергій швидкість охолодження в інтервалі температур (500–800) °С для випадку дії потужного швидкорухомого точкового джерела на поверхні напівнескінченного тіла з адіабатичною межею (масивна деталь) для низьколегованих трубних сталей знаходиться у межах (20...80) град/с, а для потужного швидкорухомого лінійного джерела у тонкій пластині (однопрохідне зварювання з повним проплавленням) – в межах (3...6) град/с. Для випадку плоского шару (порівняно товста пластина) швидкість охолодження знаходиться у наведених межах для масивної деталі і тонкої пластини.

Результати підрахунку розмірів високотемпературної ділянки ЗТВ, обмеженої температурами 1100 °С та температурою плавлення сталі, свідчать про те, що вони прямо пропорційно залежать від величини погонної енергії і обернено пропорційно – від товщини пластини, а її мінімальні значення для масивної деталі не перевищують 0,2 мм.

Вплив швидкості охолодження на мікроструктуру та властивості металу у високотемпературній ділянці ЗТВ для трубної сталі 10Г2Б з використанням даних, наведених у [7], показаний на рисунку.



Мікроструктура та властивості трубної сталі 10Г2Б

Бачимо, що в усьому досліджуваному діапазоні швидкостей охолодження мікроструктура ферито-перлітна з незначною (до 5 %) кількістю бейніту та мартенситу. Щодо механічних властивостей, то зі збільшенням швидкості охолодження до 80 град/с відбувається підвищення твердості та міцності (до 200 HV, та 800 МПа). У той самий час за швидкостей, більших за 6 град/с, відбувається помітне зниження відносного видовження δ (до 15 % за 60 град/с). Слід відмітити, що критичний щодо можливості утворення холодних тріщин вміст мартенситу (20–30 %), спостерігається за доволі великих швидкостей охолодження (більших за 100 град/с). Але навіть і за більших швидкостей реальної небезпеки виникнення у цій ділянці холодних тріщин не виникає, тому що твердість при цьому не перевищує критичної величини 350 HV.

Під час зварювання міцніших трубних сталей [8], мікролегованих титаном, ніобієм і ванадієм, а інколи і молібденом, із застосуванням термомеханічного оброблення листового прокату із пришвидшеним охолодженням (клас міцності X80 та X100), зміна структури і властивостей у ЗТВ істотніша, ніж у сталі 10Г2Б. Це зумовлює потребу у ретельнішому підході до вибору мінімально можливих величин погонної енергії.

Слід відмітити, що у зв'язку зі зменшенням розмірів зварних швів і ЗТВ зростає вплив залишкових напружень на технологічну та експлуатаційну міцність, градієнти яких можуть бути доволі значними. У процесі їх релаксації, особливо під час виникнення тривісного напруженого стану, можуть зароджуватись тріщини. У зв'язку з цим важливого значення набуває інформація про розподіл залишкових напружень у зварному з'єднанні, особливо у його пришовній ділянці, яку можна одержувати різними відомими методами [9, 10].

Висновки. Проведені дослідження показали, що під час зварювання кільцевих стиків трубопроводів, виготовлених з маловуглецевих низьколегованих сталей класу міцності, включно X100, у доволі значних межах можна зменшувати погонну енергію під час використання високоефективних та енергоощадних зварювальних процесів, включно із гібридними технологіями, за збереження високої технологічної міцності. У той самий час для забезпечення експлуатаційної надійності зварних з'єднань потрібно мати надійну інформацію про розподіл залишкових напружень та за необхідності обмежувати їхні величини.

1. Суворов А.Ф., Васильев Г.Г., Горянов Ю.Л., Кинцлер Ю.Э., Мустафин Ф.М., Сенцов С.И., Головин С.В. Сварочно-монтажные работы в трубопроводном строительстве: Учеб. пособие для вузов. – М.: ЗАО "Звезда", 2006 – 240 с. 2. Чернов В.Ю. Удосконалення технології зварювання неповоротних стиків нафтоазопроводів // *Нафтова і газова промисловість*. – 2003. – № 3. – С. 44 – 46. 3. Дилтай У. Сварка и соединение – ключевые технологии третьего тысячелетия // *Автоматическая сварка*. – 2008 – № 11. – С 101 – 107. 4. Kubanek M. LUPuS: Laser – Unterpulver – Hybrid – schweißen – Erfahrungen aus der Forschung // *Schweißen und Schneiden*. – 2006 – № 12, S. 13 – 18. 5. Палаш В.М., Дзюбик А.Р. Оптимізація технології дугового зварювання кільцевих неповоротних стиків магістральних трубопроводів // *Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: мат. конф.* – Львів: КІНПАТPI ЛТД, 2008. – С. 225 – 226. 6. Paul Colegrove, Stewart Williams, Chukwigozie Ikeagu, Adam Thistlethwaite *The Impact of Different Types of Welding Processes on the Residual Stress and Distortion in 4 mm Thick Butt Welds of Ship Plate* // *Trends in Welding Research, Proceedings of the 8th International Conference*. – Pine Mountain, Georgia, USA, 2008 – P. 758 – 765. 7. Шоршоров М. Х., Белов В.В. Фазовые превращения и изменение свойств стали при сварке: атлас. – М. Наука, 1972. – 220 с. 8. Рыбаков А.А. Современное состояние производства труб большого диаметра для магистральных трубопроводов // *Сварщик*. – 2009. – № 5. – С. 16 – 20. 9. Палаш В.М., Дзюбик А.Р. Визначення залишкових напружень в зварних з'єднаннях циліндричних оболонок із високоміцних сталей // *Збірник праць «Математичні проблеми механіки неоднорідних структур»*. – Львів: ІППМ ім. Я.С. Підстригача НАН України, 2010. – С. 137 – 140. 10. Осадчук В.А., Дзюбик А.Р. Оцінка впливу залишкових напружень на статичну міцність зварених кільцевим швом циліндричних оболонок з високоміцних сталей із осьовим тріщиноподібним дефектом // *Зб. пр. 2-ї Міжнар. наук.-техн. конф. „Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій”*. – Львів, 10-13.11.2010 р. – С. 57.