

УДК 539.3: 620.19:620.17

ВПЛИВ ЕНЕРГІЇ ЗВАРЮВАННЯ НА МІЦНІСТЬ З'ЄДНАНЬ З ВИСОКОМІЦНОЇ СТАЛІ S960QC

І. Р. ДЗІЮБА, Т. ПАЛА

Технологічний університет, Кельце, Польща

Досліджено зварні з'єднання (ЗЗ) плит товщиною 6...8 mm, отримані електродуговим і лазерним методами з різними значеннями енергії зварювання Ω . Деформації і напруження в розтягнаних плитах зі зварним швом розраховано числовим методом за допомогою програми ABAQUS. Характеристики матеріалу в модельованих ЗЗ одержано за результатами випробувань мінізразків, вирізаних з відповідних зон. Розподіл деформацій на поверхні зразків розраховано числово і порівняно з отриманим за допомогою відеосистеми ARAMIS. За результатами аналізу напружень і деформацій у внутрішніх прошарках зварюваних плит встановлено небезпечні зони, де може розвиватися пошкоджуваність. Виявлено, що міцність ЗЗ суттєво залежить від значень Ω і під час зварювання з низькою енергією близька до міцності основного матеріалу.

Ключові слова: *сталь S960QC, зварні з'єднання, характеристики міцності, локальні напруження і деформації.*

Вступ. Сьогодні широко застосовують високоміцні низьковуглецеві сталі [1, 2], зварні з'єднання (ЗЗ) яких повинні забезпечити міцність, не нижчу, ніж основного металу (ОМ). Під час зварювання внаслідок теплового впливу початкова мікроструктура відпущеного мартенситу і бейніту трансформується у ферит зі скупченнями коагульованих карбідів [3, 4]. Деградація мікроструктури, а також характеристик міцності ЗЗ залежить від температури і тривалості впливу теплового потоку. Оскільки використовують різні технології зварювання, тепловий вплив на метал теж різний. У цьому дослідженні за характеристику теплового потоку прийняли погонну енергію зварювання Ω , яку розраховали згідно з нормативними рекомендаціями [5, 6]. Ставили за мету встановити її вплив на зміну характеристик матеріалу в зоні термічного впливу (ЗТВ); створити числові моделі ЗЗ, отримані за різних значень Ω ; оцінити міцність ЗЗ на основі порівняння обчислених розподілів напружень і деформацій матеріалу у внутрішніх прошарках.

Методичні особливості досліджень. Випробовували на розтяг метал ЗЗ на плитах зі сталі S960QC завтовшки 6...8 mm і завширшки 20...30 mm, які виконали за двома технологіями: електродуговою (режим 1: $\Omega_1 = 1,2...1,6$ kJ/mm, режим 2: $\Omega_2 = 0,6...0,8$ kJ/mm) і лазерною (режим 3 – $\Omega_3 = 0,16...0,2$ kJ/mm). Плоскі зразки розміром (0,5×2,0×25,0 mm) для визначення характеристик матеріалу вирізали з різних зон ЗЗ: ОМ, металу шва (МШ) і ЗТВ (рис. 1a), причому зі ЗТВ – з трьох місць: безпосередньо біля лінії сплавлення з МШ (ЗТВ1), посередині товщини ЗТВ (ЗТВ2) і ближче до ОМ (ЗТВ3). Мікроструктуру зон вивчали на сканівному мікроскопі JSM-7100F.

Модельоване ЗЗ охоплювало зони МШ, ЗТВ1, ЗТВ2, ЗТВ3 і ОМ, розміри яких відповідали досліджуванім ЗЗ (рис. 1b). Діаграми в координатах істинні напруження σ_T – деформації ϵ_T отримали за результатами одноосового розтягування зразків згідно з методикою [7, 8]. Діаграмами σ_T – ϵ_T характеризували матеріал відповідних зон модельованого ЗЗ.

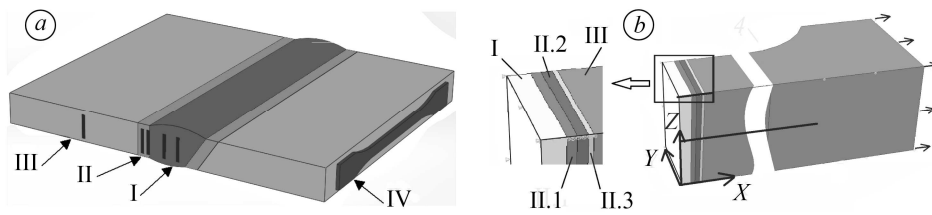


Рис. 1. ЗЗ зі зонами (а: I – МШ; II – ЗТВ; III – ОМ; IV – схема розташування зразків на розтягування та модельоване (b) для розрахунку числовим методом з поділом на зони: II.1 – ЗТВ1; II.2 – ЗТВ2; II.3 – ЗТВ3.

Fig. 1. Welded joint (WJ) with the areas (a: I – WM (weld material); II – HAZ (heat affect zone); III – BM (base material); IV – scheme of tensile specimen cut out and modeling (b) for FEM calculation with divided on the areas: II.1 – HAZ1; II.2 – HAZ2; II.3 – HAZ3.

Експериментальні результати. ОМ властива мікроструктура відпущеного мартенситу і бейніту з розміром зерен 5...15 μm (рис. 2a). Є окремі вclusions розміром до 1,0 μm , а в зоні фериту – численні виділення карбідів розміром 50...150 nm.

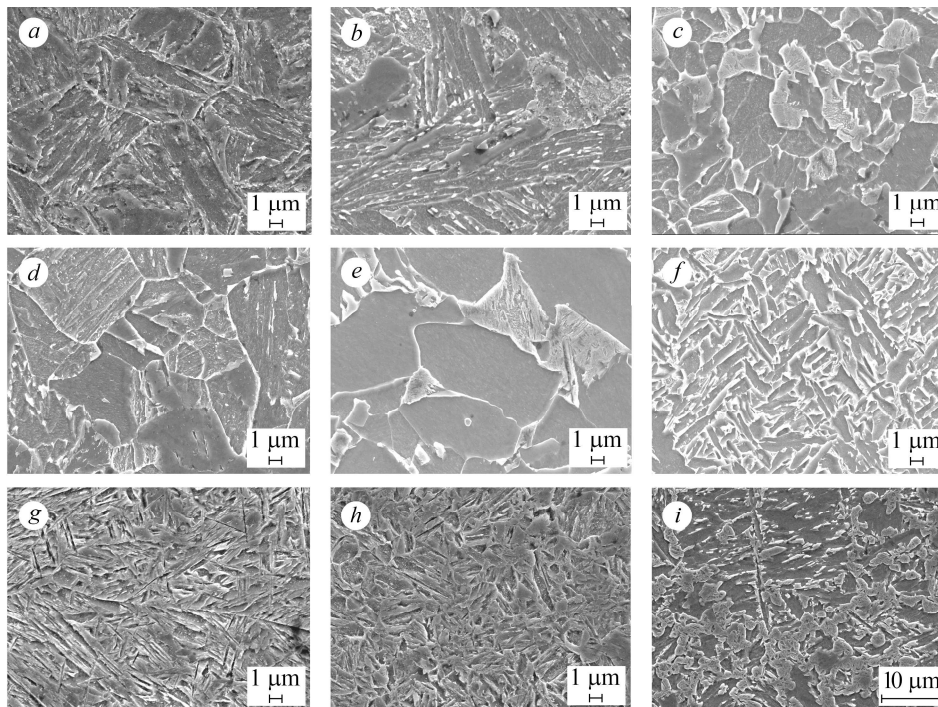


Рис. 2. Мікроструктура металу різних зон ЗЗ: ОМ (a); ЗТВ3 (b); ЗТВ2 (c); ЗТВ1 (d); МШ (e) – за режиму 1; МШ (f) – за режиму 2; МШ (g); ЗТВ1 (h); ЗТВ2 (i) – за режиму 3.

Fig. 2. Microstructures of WJ: BM (a); HAZ3 (b); HAZ2 (c); HAZ1 (d); WM (e) – by regime 1; WM (f) – by regime 2; WM (g); HAZ1 (h); HAZ2 (i) – by regime 3.

Під час зварювання початкова мікроструктура ОМ змінюється [3, 4]. У ЗТВ за зварювання електродуговим методом накладанням двошарового шва ($\Omega_1 = 1,2 \text{ kJ/mm}$) зафіксували такі особливості. Мікроструктурі ЗТВ1 властиві ділянки фериту, бейніту і відпущеного мартенситу з карбідами розміром 30... 200 nm (рис. 2b), ЗТВ2 – дрібнозернистого фериту, перліту і бейніту (рис. 2c), а у ЗТВ3 збільшуються розміри і кількість карбідів на ділянках відпущеного мартенситу і бейніту (рис. 2d) [9, 10]. МШ містить ферит та окремі зерна перліту і бейніту

(рис. 2e). За режиму 2 ($\Omega_2 = 0,7 \text{ kJ/mm}$) тут утворюється дрібнозерниста феритна мікроструктура з карбідами вздовж меж зерен (рис. 2f). Мікроструктури у ЗТВ подібні як за режиму 1. За лазерного зварювання енергетичний потік значно слабший, тому зміни мікроструктури не такі відчутні. МШ формується з розплавленого ОМ, а розмір ЗТВ не перевищує 1 mm. У МШ (рис. 2g) і в ЗТВ біля МШ (рис. 2h) формується мікроструктура мартенситного типу, а біля ОМ – вузька смуга (0,2...0,3 mm) зі коагульованими виділеннями (рис. 2i).

Залежності $\sigma_T - \epsilon_T$ для матеріалу з різних зон ЗЗ подані на рис. 3. Для електродугового ЗЗ (режим 1, $\Omega_1 = 1,2 \text{ kJ/mm}$) вона для ОМ розміщена найвище (рис. 3a). Для матеріалу з інших зон розташована нижче, причому для МШ і ЗТВ2 – найнижче. Для режиму 2 ($\Omega_2 = 0,7 \text{ kJ/mm}$) ці залежності вкладаються по-іншому (рис. 3b). У зонах МШ і ОМ характеристики міцності найвищі, а в ЗТВ – нижчі. У ЗЗ, виконаному лазерним методом (режим 3, $\Omega_3 = 0,2 \text{ kJ/mm}$), залежності $\sigma_T - \epsilon_T$ для зон МШ, ЗТВ1 і ЗТВ2 згруповані разом і лежать вище, ніж для ЗТВ3 і ОМ (рис. 3c). Для ЗТВ3 розміщена між ними і для ОМ вкладається найнижче. Це свідчить, що характеристики міцності всіх зон ЗЗ вищі, ніж ОМ.

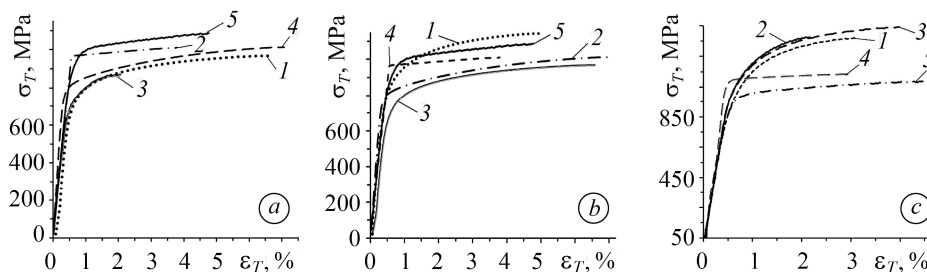


Рис. 3. Залежності $\sigma_T - \epsilon_T$ матеріалу різних зон ЗЗ (1 – МШ; 2 – ЗТВ1; 3 – ЗТВ2; 4 – ЗТВ3; 5 – ОМ), виготовлених електродуговим (а – режим 1; б – режим 2) і лазерним (с – режим 3) зварюванням.

Fig. 3. The dependences of $\sigma_T - \epsilon_T$ for material of different zones WJ (1 – WM; 2 – HAZ1; 3 – HAZ2; 4 – HAZ3; 5 – BM), made by electro-arc (a – regime 1; b – regime 2) and by laser (c – regime 3) welding.

Результати обчислень та їх аналіз. Навантаження до модельованого ЗЗ прикладали, перемішуючи вільний кінець зразка на віддаль, яка відповідає зареєстрованій під час експерименту. Деформації і напруження у ЗЗ розраховували для моменту, який відповідає максимальному значенню сили. Коректність обчислень перевіряли, порівнюючи поля деформацій на поверхні зразків, отримані за допомогою відеосистеми GOM-Aramis (рис. 4a) [11, 12] і розраховані на основі змодельованого ЗЗ (рис. 4b). Встановили, що поля деформацій на поверхні зразка в зонах МШ і ЗТВ подібні, а їх розподіли вздовж середньої по товщині зварених плит лінії (див. рис. 1b) практично збігаються (рис. 4c). Зазначимо, що за режиму 2 найбільше деформується ЗТВ2, тоді як за режиму 1 – МШ. Для ЗЗ, виконаного за лазерною технологією (режим 3), найбільше деформувався в ОМ.

На рис. 5 наведено розподіли нормалізованих розтягальних напружень σ_{11}/σ_y у середньому за товщиною внутрішньому перерізі ЗЗ (див. рис 1b). Причому розраховані напруження нормалізовані за значеннями границі плинності σ_y для матеріалу відповідної зони. Згідно з цими результатами можна виділити зони, де напруження перевищують σ_y ($\sigma_{11}/\sigma_y > 1$), тобто ЗЗ деформується пластично. Для ЗЗ, отриманого за режимом 1 ($\Omega = 1,2...1,6 \text{ kJ/mm}$), значення $\sigma_{11}/\sigma_y > 1$ виявили в МШ (рис. 5a). Зі зменшенням лінійної енергії ($\Omega = 0,6...0,8 \text{ kJ/mm}$, режим 2) зона,

де $\sigma_{11}/\sigma_y > 1$, переміщується в ЗТВ (рис. 5b). За найнижчої лінійної енергії зварювання $\Omega = 0,2 \text{ kJ/mm}$ (режим 3) значення $\sigma_{11}/\sigma_y > 1$ зафіксували в ОМ (рис. 5c).

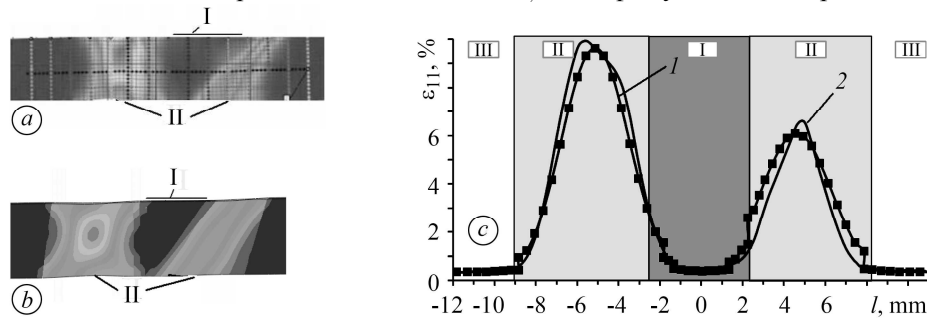


Рис. 4. Поля деформацій на поверхні ЗЗ (режим 2), зареєстровані відеосистемою (a) і обчислені (b), а також їх розподіл (c) уздовж середньої лінії по товщині зварених плит (рис. 1b) згідно з результатами відеосистеми (1) і розрахунку (2).

Fig. 4. The strain fields on the surface of WJ (regime 2) recorded by video-system (a) and obtained by FEM calculation (b) and its distributions (c) along of middle line of welding plates thick (see Fig. 1b) according to video-system (1) and FEM calculation (2).

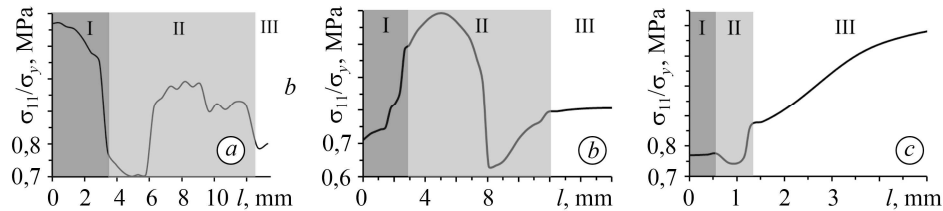


Рис. 5. Розподіли нормалізованих напружень σ_{11}/σ_y у різних зонах ЗЗ, виконаних електродуговим (a – режим 1; b – режим 2) і лазерним (c – режим 3) зварюванням.

Fig. 5. The distributions of normalized stresses σ_{11}/σ_y of WJ made by electro-arc (a – regime 1; b – regime 2), and by laser (c – regime 3) technologies.

ВИСНОВКИ

На основі експериментальних і числових результатів можна стверджувати, що погонна енергія зварювання суттєво впливає на міцність ЗЗ високоміцних феритних сталей. Викликано це змінами бейнітно-мартенситної мікроструктури ОМ під впливом температури [9, 10]. За високих значень $\Omega > 1,2 \text{ kJ/mm}$ у металі ЗТВ збільшуються розміри карбідів і мікроструктура змінюється на феритно-бейнітну, а в МШ – на феритно-перлітну, що призводить до зниження міцності порівняно з ОМ. При $\Omega > 1,2 \text{ kJ/mm}$ найнижчу міцність має МШ, що спричиняє руйнування ЗЗ саме в цій зоні. Зі зменшенням погонної енергії зварювання ($\Omega \approx 0,7 \text{ kJ/mm}$) внаслідок вищої швидкості охолодження у МШ утворюється бейнітно-мартенситна мікроструктура, а в ЗТВ відбуваються подібні зміни, як і за вищих значень Ω . Тут найслабшою є ЗТВ. За використання лазерної технології ЗЗ формують за низьких значень погонної енергії ($\Omega \approx 0,2 \text{ kJ/mm}$). Тоді внаслідок високої швидкості охолодження у МШ утворюється мікроструктура мартенситного типу, а в ЗТВ – мартенситно-бейнітного, внаслідок чого міцність матеріалу у цих зонах вища, ніж в ОМ. Отже, під час зварювання високоміцних феритних сталей перевагу має лазерна технологія.

РЕЗЮМЕ. Исследованы сварные соединения (СС) плит толщиной 6...8 mm, полученные электродуговым и лазерными методами при разных значениях энергии сварки Ω . Деформации и напряжения в растягиваемых плитах со сварным швом рассчитаны числовым методом с помощью программы ABAQUS. Характеристики материала для модели-

руемых СС получены в результате испытаний миниобразцов, вырезанных из соответствующих зон. Числовым методом рассчитано распределение деформаций на поверхности образцов и которое сравнено с распределением, полученным с помощью видеосистемы ARAMIS. По результатам анализа напряжений и деформаций во внутренних слоях свариваемых плит установлены опасные зоны, где может развиваться повреждаемость. Выявлено, что прочность СС существенно зависит от уровня Ω и при сварке с низкой энергией близка к таковой основного материала.

Ключевые слова: *сталь S960QC, сварные соединения, характеристики прочности, локальные напряжения и деформации.*

SUMMARY. Welded joints (WJ) of 6...8 mm thick plates, obtained by electro-arc and laser methods with different welding energy Ω , were tested. Strains and stresses in tension plates with weld were calculated numerically using the program ABAQUS. Material properties in the modeled WJ were obtained on mini specimens cut from the appropriate zones. The distribution of strains on the surface of the specimens calculated numerically was compared to those obtained by video-system ARAMIS. Analysis of stresses and strains in the internal layers allowed to determine the dangerous areas in which damage can develop. It was found that WJ strength significantly depends on level Ω , and that welding with low level of Ω allows to obtain joints with strength similar to the strength of base material.

Keywords: *S960QC steel, welded joints, strength properties, local stresses and strains.*

This research was carried out during the implementation of scientific projects with financial support of MS&HE of Poland.

1. Kumar A., Singh S. B., and Ray K. K. Influence of bainite-martensite content on the tensile properties of low carbon dual phase steels // *Mat. Sci. and Eng.* – 2008. – **474**, № (1–2). – P. 270–282.
2. Нейміц А., Дзіоба І. Р. В'язкість руйнування високоміцної сталі у діапазоні температур переходу від в'язкості до відколу // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2017. – **53**, № 2. – С. 16–23. (Neimitz A. and Dzioba I. R. Fracture toughness of high-strength steels within the temperature range of ductile-to-cleavage transition. Master curves // *Materials Science.* – 2017. – **53**, № 2. – P. 141–150.)
3. Górkа J. Weld properties of high yield strength steel machined thermo-mechanically // *Welded Rev.* – 2011. – **12**. – P. 31–35 (in Polish).
4. Dzioba I., Pała T., and Valkonen I. Strength and fracture toughness of the welded joint made of high-strength ferritic steel // *Acta Mechanica et Automatica.* – 2013. – **7**, № 4. – P. 64–65.
5. *FINTET: Fitness for Service (FFS) Procedure – Final Draft, 2006.*
6. Dzioba I. and Neimitz A. Application of the standard options of the FITNET Procedure to the structural integrity assessment of welded specimens containing cracks // *Int. J. Pressure Vessel and Piping.* – 2007. – **84**, № 8. – P. 475–486.
7. Neimitz A., Galkiewicz J., and Dzioba I. Calibration of constitutive equations under conditions of large strains and stress triaxiality // *Archives of Civil and Mech. Eng.* – 2018. – **18**. – P. 1123–1135.
8. Dzioba I. and Lipiec S. Calibration of the constitutive equations for materials with different levels of strength and plasticity characteristics based on uniaxial tensile test data // *IOP Conf. Series: Mat. Sci. and Eng.* – 2018. – **461**, № 1. – 012018.
9. Bhadeshia H.K.D.K. *Bainite in steels.* 2nd edn. – London: Institute of Materials, 2001.
10. Дзіоба І. Р. Властивості сталі 13ХМФ після експлуатації та деградації в лабораторних умовах // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2010. – **46**, № 3. – С. 65–72. (Dzioba I. R. Properties of the 13HMF steel after operation and degradation under laboratory conditions // *Materials Science.* – 2010. – **46**, № 3. – P. 357–364.)
11. Pała T., Dzioba I., and Galkiewicz J. Verification of strength of the welded joints by using of the Aramis video system // *Acta Mechanica et Automatica.* – 2017. – **11**, № 1. – P. 9–13.
12. Pała T. and Dzioba I. Determination of strain and stress fields in welded joints of S960QC steel // *Archives of Metallurgy and Materials.* – 2017. – **62**. – P. 2081–2087.

Одержано 27.03.2019