

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН MIG-ПАЯНИХ З'ЄДНАНЬ ОЦИНКОВАНИХ ТРУБ

О. М. Матвієнків

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,
e-mail: olegmatvienkiv@gmail.com

Основною проблемою з'єднання труб із цинковим покриттям дуговим зварюванням є забезпечення корозійної стійкості зварних швів та збереження захисного покриття на прилеглих до них ділянках. Дана проблема може бути вирішена шляхом застосування технології MIG-паяння, яка дозволяє забезпечити достатньо високу міцність з'єднань – практично на рівні з основним металом, а також зберегти цілісність захисного цинкового покриття завдяки значно меншому тепловому впливу у порівнянні з дуговим зварюванням. Напружено-деформований стан трубопроводів визначається характеристиками внутрішніх та зовнішніх навантажень, основним серед яких є внутрішній тиск. В даній роботі досліджується напружено-деформований стан MIG-паяних з'єднань оцинкованих труб імітаційним моделюванням та експериментально. Досліджувались MIG-паяні стикові з'єднання труб діаметром 150 мм із низьколегованої сталі, які навантажувались внутрішнім тиском величиною 9 МПа. Визначення напружень та деформацій на стінках труб поблизу кільцевого шва виконувались методом тензометрії з використанням тензометричного реєструючого комплексу «SPIDER-8» та спеціально розробленого стенду. Результати досліджень показали, що при використанні V-подібної форми кромки найбільша локалізація кільцевих напружень виникає на зовнішній стінці труб між швом та основним металом. Для зменшення кільцевих напружень та зміни їхньої локалізації було проведено оптимізацію форми кромки. Встановлено, що найбільш оптимальною для стикових MIG-паяних з'єднань труб є X-подібна форма кромки та визначено її розміри. Встановлено, що використання запропонованого типу обробки кромки зменшує рівень залишкових напружень на 21% у порівнянні зі стандартними кромками. Запропонована форма кромки дозволила зменшити величину кільцевих напружень та змінити їх локалізацію із зовнішньої на внутрішню стінку труби, що дозволить підвищити міцність MIG-паяних з'єднань та тривалість експлуатації.

Ключові слова: MIG-паяння, труби, стикові з'єднання, імітаційне моделювання, напруження, тензометрія, форма кромки.

The main challenge in joining zinc-coated pipes using arc welding is to ensure the corrosion resistance of the welds and the preservation of the protective coating in the adjacent areas. This problem can be solved by using MIG brazing technology, which ensures sufficiently high joint strength - almost on a par with the base metal - and preserves the integrity of the protective zinc coating due to significantly lower thermal impact compared to arc welding. The stress-strain state of pipelines is determined by the characteristics of internal and external loads, the main one being internal pressure. This paper investigates the stress-strain state of MIG brazed joints of galvanised pipes by simulation modelling and experimentally. The MIG-butt welded joints of 150 mm diameter low-alloy steel pipes were studied, which were loaded with an internal pressure of 9 MPa. The stresses and strains on the pipe walls near the annular weld were determined by strain measurement using the SPIDER-8 strain measuring complex and a specially designed test bench. The research results showed that when using a V-shaped edge shape, the greatest localisation of annular stresses occurs on the outer wall of the pipes between the weld and the base metal. To reduce the ring stresses and change their localisation, the edge shape was optimised. It was found that the X-shaped edge shape is the most optimal for butt MIG-brazed pipe joints, and its dimensions were determined. It was found that the use of the proposed type of edge processing reduces the level of residual stresses by 21% compared to standard edges. The proposed shape of the edges made it possible to reduce the value of annular stresses and change their localisation from the outer to the inner wall of the pipe, which will increase the strength of MIG-welded joints and the service life.

Keywords: MIG brazing, pipes, butt joints, simulation modelling, stress, tensometry, groove shape.

Вступ

Застосування цинкового покриття для захисту зварних конструкцій, в тому числі трубопроводів, від корозії є одним із найоптимальніших рішень завдяки своїй економічності та екологічності. Однак існує проблема зварюван-

ня оцинкованих сталей. Наявність покриття ускладнює процес зварювання через інтенсивне випаровування цинку.

Основні труднощі зі зварюванням сталевих конструкцій з цинковим покриттям викликані різницею температур плавлення сталі та цинку,

а також випаровуванням цинку. Останніми роками для з'єднання сталей із захисними покриттями, а також для з'єднання різнорідних матеріалів широкого застосування набула технологія MIG-паяння.

Застосування MIG-паяння для з'єднання оцинкованих сталей дає змогу суттєво знизити тепловий вплив на метал і тим самим запобігти інтенсивному випаровуванню цинку, а також зменшити можливість виникнення пропалів та деформацій в процесі отримання з'єднань із забезпеченням міцності з'єднань практично на рівні з основним металом [1].

Особливістю MIG-паяння є нижча температура нагрівання порівняно з температурою зварювання, та плавлення окремо присадкового матеріалу. Низький тепловий вплив при даному процесі забезпечується імпульсним перенесенням крапель електродного металу та використанням присадкових матеріалів зі сплавів на основі міді, які мають відносно невисоку температуру плавлення (в залежності від складу сплаву від 950 до 1080°C).

Аналіз робіт, присвячених дуговому паянню [2, 3], показав, що хімічний склад, структура та механічні властивості паяного з'єднання визначаються процесами, що протікають на міжфазній границі взаємодії рідкого припою та поверхневих шарів основного металу, з утворенням дифузійної зони. Суттєвий вплив на дані процеси мають кут змочування, тепловий баланс та склад газової суміші [4, 5].

При паянні оцинкованих сталевих пластин товщиною 1-2 мм авторами [6] встановлено, що підвищення рівня теплового впливу при дуговому паянні призводить до інтенсифікації дифузійних процесів і, як наслідок, розширення дифузійної зони, ширина якої є ключовим параметром для оцінки рівня міцності. Аналогічні закономірності проявляються при двосторонньому дуговому паянні різнорідних матеріалів, наприклад алюмінієвих сплавів та неіржавіючої сталі [7, 8].

Сучасні технології дають змогу отримати якісні з'єднання із оцинкованої сталі методом MIG-паяння для листів, товщина яких не перевищує 2,0 мм [9, 10].

Проведені нами раніше дослідження механічних властивостей MIG-паяних з'єднань, зразків труб з цинковим покриттям підтвердили їх міцність практично на рівні з основним металом.

Дослідженню механічних властивостей паяних з'єднань присвячено багато робіт, які, в основному, проводились випробуванням зразків на статичний розтяг. Але на даний час практично немає інформації про дослідження напружено-деформованого стану MIG-паяних з'єднань, тому дослідження в даному напрямку є досить актуальними.

Матеріали та методики досліджень

Дослідження напружено-деформованого стану MIG-паяних з'єднань оцинкованих труб проводилось імітаційним моделюванням в пакеті програми SolidWorks та експериментально.

Для дослідження напружено-деформованого стану зварних та MIG-паяних з'єднань використовували труби діаметром 150 мм з товщиною стінки 3,2 мм, виготовлені із низьколегованої сталі та покриті тонким шаром цинку. В якості присадкового матеріалу використовували низьколегований зварювальний дріт та дріт зі сплаву CuSi₃.

Експериментальні дослідження при навантаженні зразків внутрішнім тиском проводились на спеціально виготовленому випробувальному стенді (рис. 1).

Визначення напружень та деформацій на стінках труб поблизу кільцевого шва виконувались методом тензометрії, оскільки він є найбільш поширеним та має певні переваги: найкраще задовольняє критерію ціна-ефективність та оптимально поєднує технічні характеристики.

Вимірювання кільцевих напружень проводилось у восьми точках перерізу стика трубних зразків (по периметру шва) наклеюванням тензорезисторних давачів поблизу шва в поперечному напрямку, які з'єднувались за схемою півмоста Уїтстона (рис. 2).

Передавання та реєстрація даних від давачів здійснювалася за допомогою персонального комп'ютера та восьмиканального тензометричного реєструючого комплексу «SPIDER-8» з ліцензованим програмним забезпеченням «CATMAN».

Вимірювання деформацій труби біля шва при навантаженні внутрішнім тиском здійснювалось за показами механічних індикаторів переміщень, встановлених у восьми точках.

Для порівняння випробування проводились на зразках труб із зварними та паяними з'єднаннями.

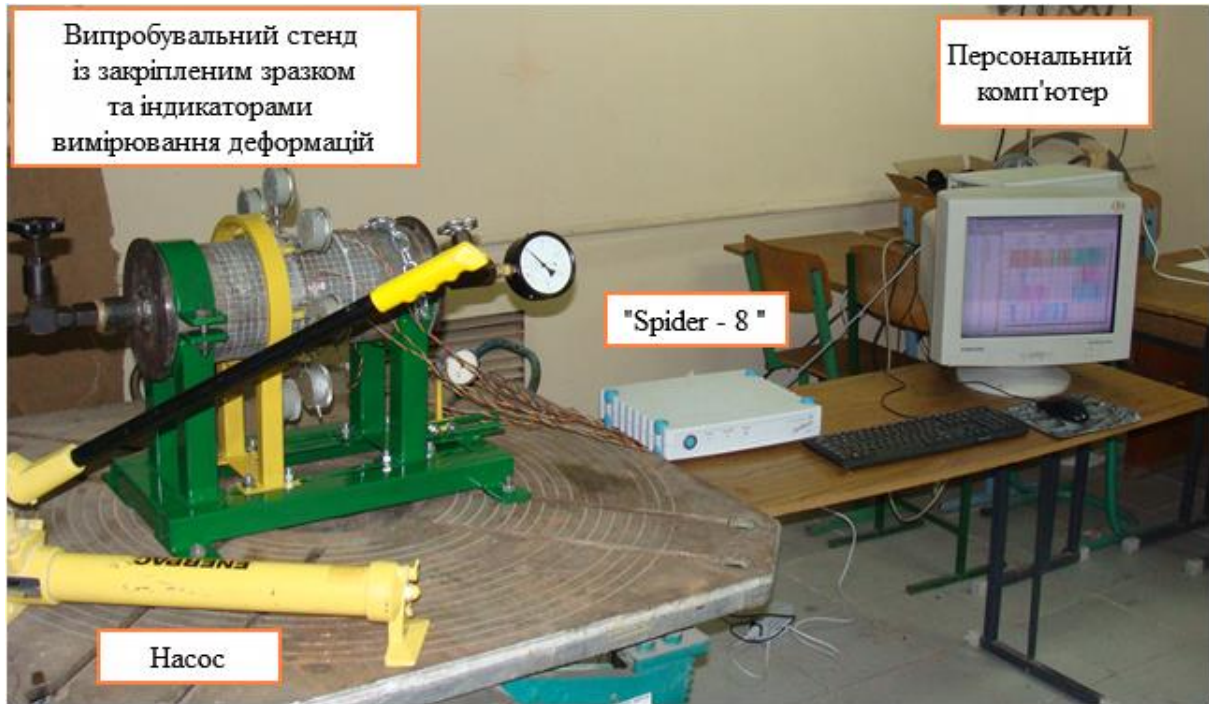


Рисунок 1 – Випробувальний стенд з обладнанням для вимірювання та реєстрації напружень і деформацій

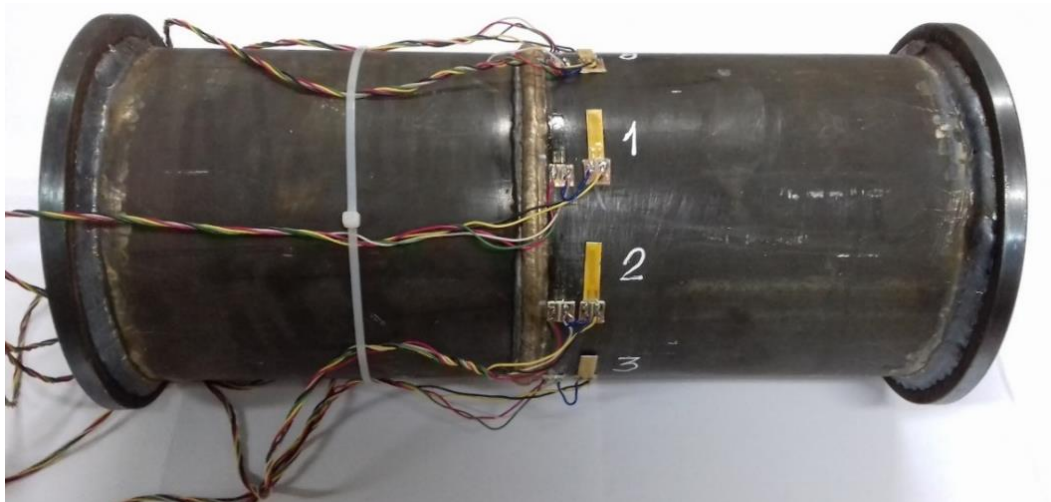


Рисунок 2 – Підготовлений зразок з тензорезисторними давачами

Результати досліджень

За формою та геометричними розмірами досліджувані труби належать до тонкостінних циліндричних оболонок. Для розрахунку тонкостінних посудин застосовується безмоментна теорія оболонок.

Відповідно до безмоментної теорії, напружено-деформований стан тонкостінних оболонок визначається тільки тангенціальними зусиллями та параметрами тангенціальної деформації. Внутрішній тиск створюватиме на стінки труб кільцеві та осьові напруження (рис. 3).

Отже, за теорією безмоментної оболонки кільцеві напруження діють тангенціально до поверхні труб та визначаються за формулою [11]:

$$\sigma_{кц} = \frac{p \cdot r}{\delta}, \quad (1)$$

де p – тиск у трубопроводі, МПа;
 r – внутрішній радіус труби, мм;
 δ – товщина стінки труби, мм.

Повздовжні напруження від внутрішнього тиску в трубопроводі визначаються за формулою:

$$\sigma_{поз} = \frac{p \cdot r}{2 \cdot \delta}. \quad (2)$$

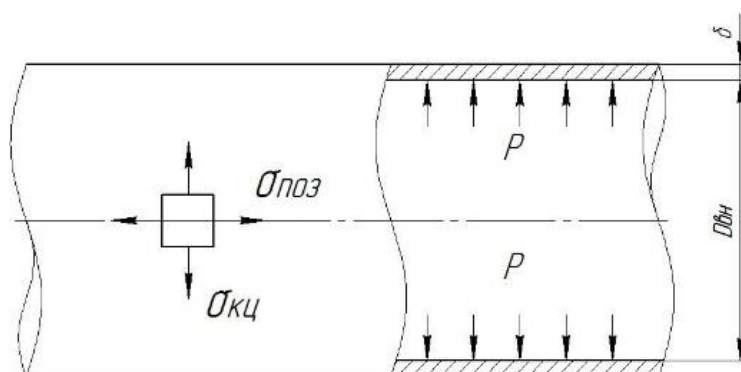


Рисунок 3 – Схема навантаження циліндричної тонкостінної оболонки внутрішнім тиском

Як видно з наведених формул, повздовжні напруження будуть у два рази менші від кільцевих, тож ніякої небезпеки при експлуатації даних труб становити не будуть. Тому в подальших дослідженнях будуть досліджені тільки кільцеві (тангенціальні) напруження.

Максимальний допустимий тиск визначався з умови, що еквівалентні напруження забезпечуватимуть пружно-пластичну деформацію матеріалу, яка виникає при напруженнях (0,9...1,1) межі плинності сталі. Максимальний тиск визначається за формулою:

$$p = \frac{2 \cdot \varphi \cdot \delta}{D + \delta} \cdot 0,9 \cdot \sigma_T, \quad (3)$$

де δ – товщина стінки труб, мм;
 φ – коефіцієнт міцності паяного шва;
 D – внутрішній діаметр труб, мм;
 σ_T – межа плинності сталі ($\sigma_T = 265$ МПа для низьколегованої сталі, за довідниковими даними).

Розрахований за формулою (3) максимальний тиск для даного з'єднання склав 9 МПа, що відповідає еквівалентним напруженням у 238 МПа.

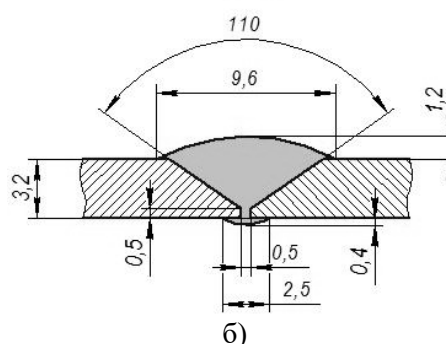
Прогнозування міцності MIG-паяних з'єднань проводилось імітаційним моделюванням, у SolidWorks методом кінцевих елементів. Для цього було розроблено комп'ютерні скінчено-елементні моделі паяних з'єднань стиків досліджуваних труб.

Для достовірності результатів моделювання з експериментальними даними, моделі з'єднань виконувались за розмірами реальних з'єднань. Для цього було виготовлено макрошліфи з'єднань, за якими вимірювались геометричні розміри швів (рис. 4).

В результаті моделювання навантаження та розв'язання механічної задачі отримано напружено-деформований стан MIG-паяних з'єднань.



а)
(4:1)



б)

а) – макрошліф паяного з'єднання (3^x);
 б) – ескіз з'єднання

Рисунок 4 – Розміри паяних з'єднань з V-подібною формою кромки

Розглянувши більш детально розподіл кільцевих напружень (рис. 5) у зоні з'єднання шва з трубами, встановлено, що при використаних геометричних розмірах моделей відбувається локалізація максимальних величин напружень на переході між швом та трубою.

Максимальна величина кільцевих напружень на верхній кромці стінки труби становить 236 МПа. При такому розподілі кільцевих напружень руйнування з'єднань відбувається в місці найбільшої їх локалізації, що також підтверджується експериментальними дослідженнями при руйнуванні зразків випробуванням на розтяг (рис. 6).

Результати проведених досліджень показали, що така геометрія швів не забезпечує відповідної міцності з'єднань. Для того, щоб зменшити максимальну величину кільцевих напружень та позбутися їх локалізації поблизу шва, слід змінити геометрію шва та, відповідно,

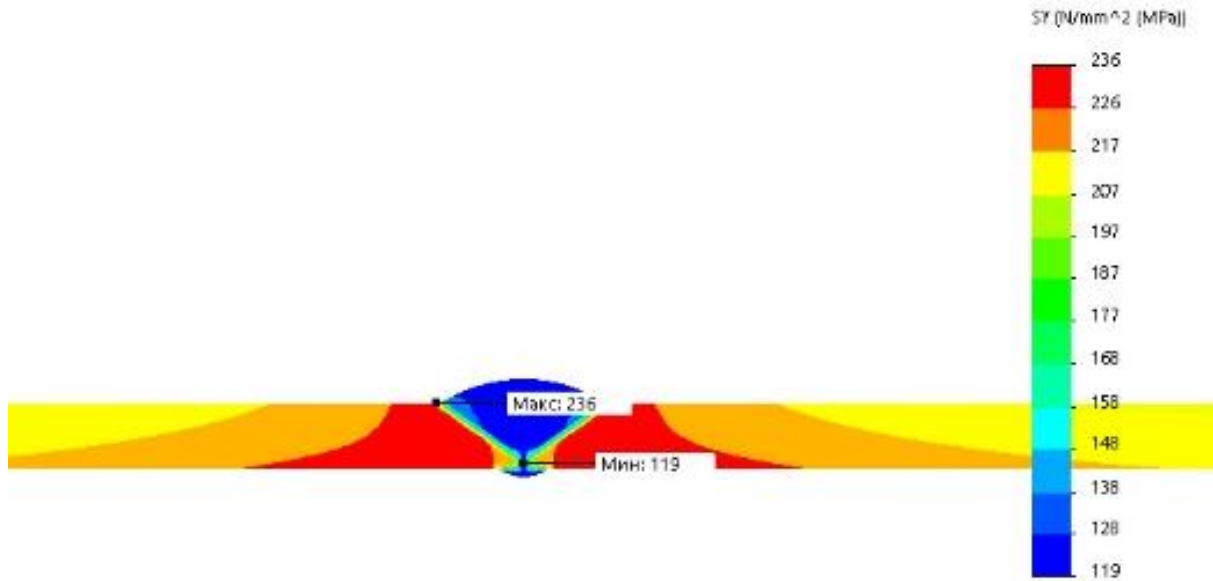


Рисунок 5 – Епюра розподілу кільцевих напружень в перерізі паяного з'єднання з V-подібною формою кромки



Рисунок 6 – Зруйноване з'єднання труб

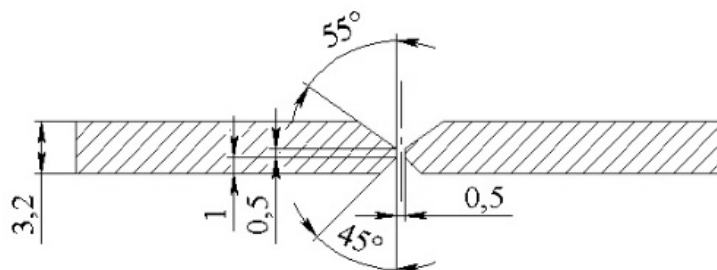


Рисунок 7 – Схема форми підготовки кромки за результатами оптимізації

форму кромки труб. Це дасть змогу збільшити коефіцієнт запасу міцності MIG-паяних з'єднань та термін їхньої експлуатації.

Щоб знайти найбільш оптимальний варіант підготовки кромки, було проведено параметричну оптимізацію у SolidWorks. Виходячи з конструктивних та технологічних міркувань побудовано керований ескіз, що лежить в основі побудови тримірної моделі елементів паяного з'єднання труб. Обмеженням для виконання процесу оптимізації вибрано значення мінімального коефіцієнту запасу міцності не менше 1,55.

Для оболонок під дією тиску локалізація напружень на зовнішній стороні стінок труб біля зварного шва є найбільш небезпечною, тому основним завданням оптимізації було змінити місце локалізації максимальних напружень та зменшити їх величину.

У результаті підготовки вхідних даних для процесу оптимізації моделі елементів паяного з'єднання труб отримано 81 можливий варіант його конструктивних елементів.

Згідно з отриманими результатами дослідження елементів MIG-паяного з'єднання труб оптимальною є X-подібна форма кромки з розмірами, вказаними на рисунку 7.

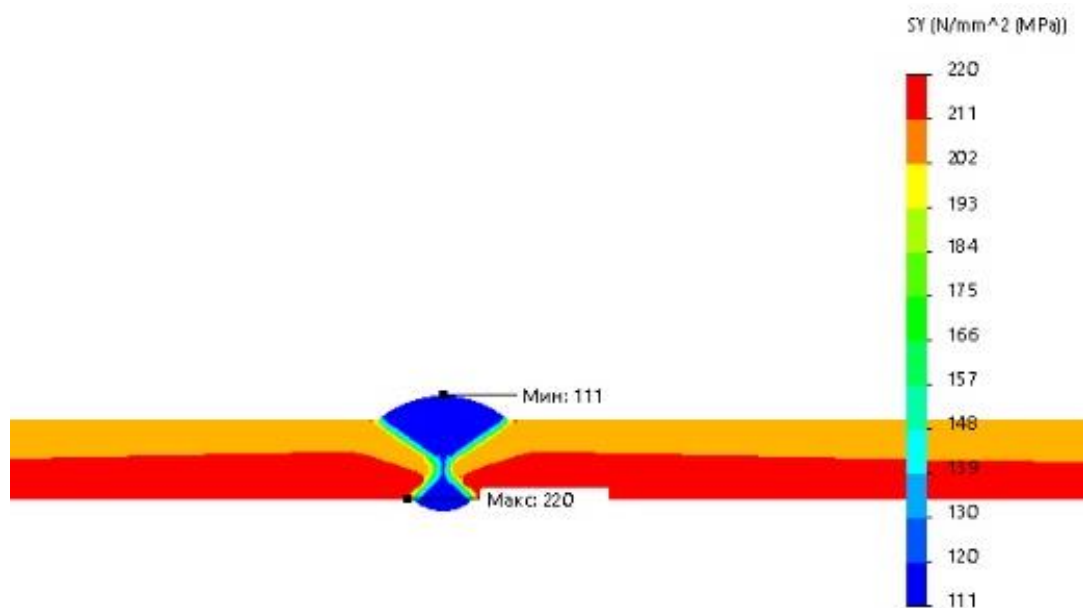


Рисунок 8 – Епюра розподілу кільцевих напружень в MIG-паяному з’єднанні з оптимізованою Х-подібною формою кромки

Для запропонованої форми кромки було проведено моделювання навантаження та розв’язання механічної задачі. За результатами моделювання побудовано епюру розподілу кільцевих напружень в перерізі оптимізованого з’єднання (рис. 8).

Як видно з рисунку 8, перерозподіл напружень в перерізі з’єднання змінився. А саме, максимальні кільцеві напруження локалізуються вже рівномірно по нижній кромці стінки труби на відстані близько 0,7 мм від шва, а їх величина зменшилась на 12%. Такий розподіл кільцевих напружень є більш безпечним для з’єднань труб під дією внутрішнього тиску.

Для підтвердження результатів імітаційного моделювання було проведено експериментальні дослідження на випробувальному стенді (рис. 1). Випробування проводились на трубних зразках зварних та MIG-паяних з’єднань з V-подібною та Х-подібною (оптимізованою) формами кромки.

Опрацювавши отримані числові дані, було побудовано епюру розподілу кільцевих напружень у наволошовній зоні зварного та паяних з’єднань труб при величині внутрішнього тиску 9 МПа (рис. 9).

З графіка розподілу напружень (рис. 9) видно, що при максимальному тиску 9 МПа максимальна величина кільцевих напружень є найменшою в зварному з’єднанні – до 200 МПа. Максимальні кільцеві напруження в MIG-паяних з’єднаннях є вищими, ніж у зварних з’єднаннях та відрізняються залежно від форми підготовки кромки. Зокрема, найбільшими

кільцеві напруження є в паяному з’єднанні труб з V-подібною підготовкою кромки – 263 МПа. В усіх випадках величина максимально допустимих напружень не перевищує гранично допустимого значення 265 МПа.

У з’єднанні з Х-подібним обробленням кромки, виконаним за розмірами, отриманими шляхом оптимізації, величина максимальних кільцевих напружень зменшилась до 208 МПа та є практично на рівні зі зварним з’єднанням.

Обговорення результатів

Отже, конструкція MIG-паяного з’єднання з оптимізованою Х-подібною формою кромки дійсно забезпечує зниження рівня максимальних робочих кільцевих напружень. Максимальні кільцеві напруження у з’єднанні зі стандартними V-подібними кромками досягають 263 МПа, а в з’єднанні з оптимізованими кромками знизилась до 208 МПа – всього на 21%.

Результати проведеного експерименту свідчать про те, що запропонована форма підготовки кромки є ефективною та може бути рекомендованою для з’єднання сталевих труб із цинковим покриттям, що працюють при навантаженні внутрішнім тиском.

Проведений аналіз отриманих результатів показав, що розбіжність значень максимальних кільцевих напружень, отриманих імітаційним моделюванням та в процесі експерименту складає від 4,7 до 6,7%. Вказані величини відповідають допустимим похибкам при оцінці напружено-деформованого стану трубопроводів.

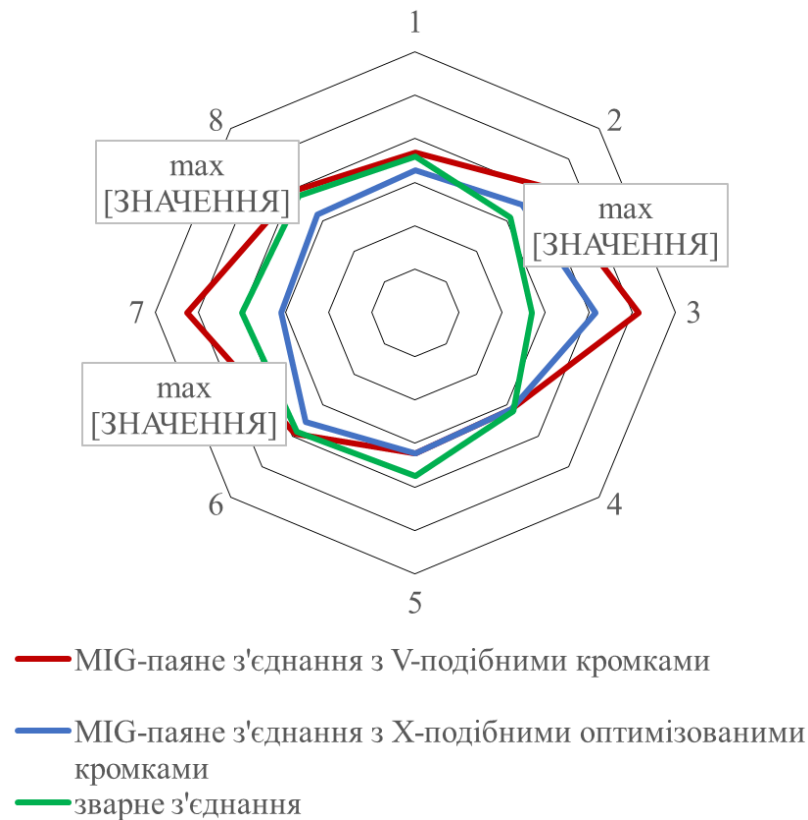


Рисунок 9 – Розподіл кільцевих напружень по зовнішній стінці труби при навантаженні внутрішнім тиском 9 МПа

Висновки

1. Результати дослідження напружено-деформованого стану MIG-паяних з'єднань труб свідчать, що на розподіл та величину напружень у перерізі з'єднань суттєво впливає форма підготовки кромки.

2. Експериментальне дослідження напружено-деформованого стану стиків труб при навантаженні внутрішнім тиском підтвердило, що для зменшення рівня залишкових напружень у стикових паяних з'єднаннях оцинкованих труб раціональною є X-подібна форма оброблення кромки, встановлена шляхом параметричної оптимізації.

3. Встановлено, що використання запропонованого типу обробки кромки зменшує рівень залишкових напружень на 21% порівняно зі стандартними.

4. Результати проведеного експерименту свідчать про те, що запропонована X-подібна форма підготовки кромки є ефективною та може бути рекомендована для з'єднань MIG-паянням сталевих труб із цинковим покриттям.

Література / References

1. Quintino L., Pimenta G., Iordachescu D., et al. MIG Brazing of Galvanized Thin Sheet Joints for Automotive Industry. *Materials and Manufacturing Processes*. No 21 (2006). P. 63–73.

2. Miao Y., Wu B., Xu X. et al. Effect of Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of Joints Made by Bypass-Current MIG Welding–Brazing of Magnesium Alloy to Galvanized Steel. *Acta Metall.* No 27 (2014). P. 1038–1045. doi:10.1007/s40195-014-0118-3

3. Rozalski M., Gawrysiuk. W. MIG/MAG braze-welding of galvanised steel sheets and examples of difficult to weld systems. *Welding International*. No 22. 2008. No. 2. P. 239–244.

4. Qin G., Su Y., Meng X., Fu B. Numerical simulation on MIG arc brazing-fusion welding of aluminum alloy to galvanized steel plate. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. No. 78. 2015. P. 1917–1925. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6529-5>

5. Quintino L., Miranda R., Pimenta G. MIG Brazing of Galvanized Thin Sheet Joints for Automotive Industry. *Materials and Manufacturing Processes*. No 21. 2006. P. 63–73.

6. Makwana D., Shome M., Goecke Sven-F. et al. Gas metal arc brazing of galvanized steel sheets. *Science and Technology of Welding and Joining*. No 21. 2016, No. 7. P. 600–606. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/13621718.2016.1145420>

7. Zhang Y., Huang J., Cheng Z. et al. Study on MIG-TIG double-sided arc welding-brazing of aluminum and stainless steel. *Materials Letters*. No 172. 2016. P. 146–148. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2016.02.146>

8. Qin G., Su Y., Wang S. Microstructures and properties of welded joint of aluminum alloy to galvanized steel by Nd: YAG laser + MIG arc hybrid brazing-fusion welding. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. No 24. 2014. P. 989–995. doi: 10.1016/S1003-6326(14)63153-8

9. Varol F., Ferik E., Ozsarac U., et al. Influence of current intensity and heat input in Metal Inert Gas-brazed joints of TRIP 800 thin zinc coated steel plates. *Materials & Design*. No 52. 2013. P. 1099–1105.

10. Rykała J., Pfeifer T. Influence of the technological conditions of welding using the MIG/MAG method on metal transfer in the welding arc. *Welding International*. No 28. 2013, No. 12. P. 931-940.

<http://dx.doi.org/10.1080/09507116.2012.753233>

11. Трубопровідний транспорт газу / Ковалко М. П., Грудз В. Я., Михалків В. Б. та ін. Київ: Арена, 2002. 600 с. Kovalko M. P., Hrudz V. Ya., Mykhalkiv V. B. ta in. *Truboprovodnyi transport hazu*. Kyiv: Arena, 2002. 600 p.