

ВПЛИВ ПІДГОТОВКИ КРОМОК НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПАЯНИХ З'ЄДНАНЬ ОЦИНКОВАНИХ ТРУБ ПОЛЬОВИХ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

О.М. Матвієнків, Л.С. Шлапак

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 506612,
e-mail: ztk@nuing.edu.ua

Основною проблемою з'єднання труб із цинковим покриттям методом дугового зварювання є забезпечення корозійної стійкості шва та збереження захисного покриття на прилягаючих до шва ділянках. Дана проблема може бути вирішена шляхом застосування технології дугового паяння, яка дозволяє на 30% зменшити температурний вплив та забезпечити достатньо високу міцність з'єднань – практично на рівні з основним металом.

Напружено-деформований стан трубопроводу визначається характеристиками внутрішніх та зовнішніх навантажень, основним серед яких є внутрішній тиск. В даній роботі напружено-деформований стан дуго-паяних з'єднань оцинкованих труб досліджується імітаційним моделюванням, методом кінцевих елементів.

Досліджувались паяні з'єднань труб діаметром 150 мм із низьколегованої сталі 16ГС та швами з матеріалів $CuAl_8$ та $CuSi_3$, які навантажувались внутрішнім тиском 9 МПа. Результати досліджень показали, що при використанні стандартної V-подібної форми кромки найбільша концентрація колових напружень виникає на зовнішній стінці труб між швом та основним металом.

Для зменшення колових напружень та зміни їх концентрації було проведено оптимізацію форми кромки.

Запропонована оптимізована форма кромки дозволила зменшити величину колових напружень та змінити їх розподіл, а саме: колові напруження концентруються та рівномірно розподіляються по нижній кромці труб, що підвищить їх міцність та тривалість експлуатації.

Ключові слова: оцинковані труби, дугове паяння, колові напруження, форма кромки, імітаційне моделювання, оптимізація.

Основная проблема соединения труб с цинковым покрытием методом дуговой сварки – обеспечение коррозионной стойкости шва и сохранение защитного покрытия на околошовных участках. Данная проблема может быть решена применением технологии дуговой пайки, которая позволяет на 30% уменьшить температурное влияние и обеспечить достаточно высокую прочность соединений – практически на уровне с основным металлом.

Напряженно-деформированное состояние трубопровода определяется характеристиками внутренних и внешних нагрузок, основной среди которых является внутреннее давление. В данной работе исследуется напряженно-деформированное состояние дуго-паяных соединений оцинкованных труб путем имитационного моделирования способом конечных элементов.

Исследовали паяные соединения труб с диаметром 150 мм из низколегированной стали 16ГС и швами из материалов $CuAl_8$ и $CuSi_3$, которые нагружались внутренним давлением 9 МПа. Результаты исследований показали, что при использовании стандартной V-образной формы кромки наибольшая концентрация кольцевых напряжений возникает на внешней стенке труб между швом и основным металлом.

Для уменьшения кольцевых напряжений и изменения их концентрации оптимизирована форма кромки.

Предложенная оптимизированная форма кромки позволила уменьшить величину кольцевых напряжений и изменить их распределение. А именно, кольцевые напряжения концентрируются та равномерно распределяются по нижней кромке труб, что повысит их прочность и продолжительность эксплуатации.

Ключевые слова: оцинкованные трубы, дуговая пайка, кольцевые напряжения, форма кромки, имитационное моделирование, оптимизация.

The main problem of the zinc-covered pipe connections, using arc welding, is providing the welded joint corrosion resistance and preserving of the protective cover on the adjacent areas. This problem may be solved using the arc brazing technology, allowing to reduce by 30 per cent the temperature impact and provide a rather high strength of joints at the level of the base metal.

The stress-strain state of the pipeline is determined by the characteristics of internal and external pressures, the main of which is the internal pressure. In this article the stress-strain state of arc-brazed joints of galvanized pipes by simulation of the finite element method was studied.

Brazed pipe joints with a diameter of 150 mm from the low-alloy steel 16 HS and joints of materials $CuAl_8$ and $CuSi_3$, loaded by the internal pressure 9 MPa were studied. The research results showed that by using standard V-shaped edges, the largest concentration of a circular tension occurs on the pipe outer wall, between the welded joint and the base metal.

To reduce the circular tension and change its concentration, the optimization of edges shape was conducted.

The proposed optimized form of edges allowed to reduce the value of the circular tension and change its distribution. Namely, the circular tension is concentrated and evenly distributed along the bottom edge of pipes, thus, increasing their strength and service life.

Key words: galvanized pipes, arc brazing, circular tension, form of edges, simulation, optimization.

Вступ

Застосування цинкового покриття для застосування зварних конструкцій, в тому числі трубопроводів від корозії, є одним із найоптимальніших завдяки своїй економічності та екологічності. Однією із суттєвих переваг цинкового покриття є те, що у випадку незначних механічних пошкоджень (подряпин, ударів) цинкове покриття може самовідновлюватись на пошкоджених ділянках за рахунок наявності щільної оксидної плівки. Оскільки цинк є більш активним металом, ніж підкладний метал, то він першим вступає в реакцію із зовнішнім середовищем. У процесі взаємодії на поверхні цинку утворюється щільна оксидна плівка, яка перешкоджає подальшій корозії.

Однак існує проблема зварювання оцинкованих сталей. Наявність покриття утруднює процес зварювання через інтенсивне випаровування цинку при зварюванні. Пари цинку, крім шкідливої дії на здоров'я людини, також негативно впливають на процес зварювання. А саме, перешкоджають стабільному горінню дуги, викликають утворення пор і тріщин у зварному шві, а також спричиняють руйнування захисного покриття в місці з'єднання.

Основні труднощі зварювання сталевих конструкцій з цинковим покриттям викликані різницею температур плавлення сталі та цинку а також випаровуванням цинку. Як відомо температура плавлення заліза – 1539 °С, а цинку – від 420 °С. За температури ~906 °С починається інтенсивне кипіння та випаровування цинку.

Останніми роками для з'єднання сталей із захисними покриттями, а також для з'єднання різнорідних матеріалів широко застосовується технологія дугового паяння.

Застосування дугового паяння для з'єднання оцинкованих сталей дає змогу суттєво знизити тепловий вплив на метал і тим самим запобігти інтенсивному випаровуванню цинку, а також зменшити ймовірність пропалювання та виникнення деформацій під час отримання з'єднань із забезпеченням міцності з'єднань практично на рівні з основним металом [1].

Особливістю дугового паяння є нижча температура нагрівання порівняно з температурою зварювання та плавлення окремо присадкового матеріалу. Низьке тепловкладення при дуговому паянні забезпечується імпульсним перенесенням крапель електродного металу та використанням присадкових матеріалів зі сплавів на основі міді, які мають відносно невисоку точку плавлення (залежно від складу сплаву від 950 до 1080°С). Все це створює передумови для застосування дугового паяння при з'єднанні труб із захисними цинковими покриттями. Дана технологія може бути застосована для приєднання манжетів та розтрубів до труби, при виготовленні та ремонті польових магістральних трубопроводів.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Аналіз робіт, присвячених дуговому паянню [2, 3], свідчить, 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. Як підтверджують раніше проведені дослідження [4], ширина дифузійної зони є ключовим параметром для оцінювання рівня міцності дуго-паяних з'єднань.

Сучасні технології дають змогу отримати якісні з'єднання із оцинкованої сталі методом дугового паяння для листів, товщина яких не перевищує 1,5 мм. Зокрема, у роботі [5] досліджено паяні з'єднання листів із низьковуглецевої сталі товщиною 1,5 мм із використанням дроту CuAl8, які характеризуються високим рівнем мікротвердості та міцності. Рівень механічних властивостей з'єднань такого типу та, відповідно, параметри їх мікроструктури регулюються у широкому діапазоні шляхом раціонального вибору режимів дугового паяння оцинкованої сталі, що підтверджується результатами робіт [6, 7], які отримані для листів товщиною 0,8–1,0 мм з'єднаних із використанням дроту CuSi3 та газового середовища різного складу.

Дослідження механічних властивостей з'єднань, зразків труб польових магістральних трубопроводів ПМТП-150, виконаних методом дугового паяння [8], підтвердили їх міцність практично на рівні з основним металом. Також проведені дослідження в даній роботі показали що міцність стикових паяних з'єднань залежить від форми кромки. А саме з'єднання зі скошуванням кромки володіють більшою міцністю ніж з прямими кромками.

Дослідженню механічних властивостей паяних з'єднань присвячено ряд робіт [9, 10], які, в основному, проводились випробуванням зразків на статичний розтяг. Але на даний час практично немає інформації про дослідження напружено-деформованого стану паяних з'єднань, тому дослідження в даному напрямку є досить актуальними.

Мета роботи

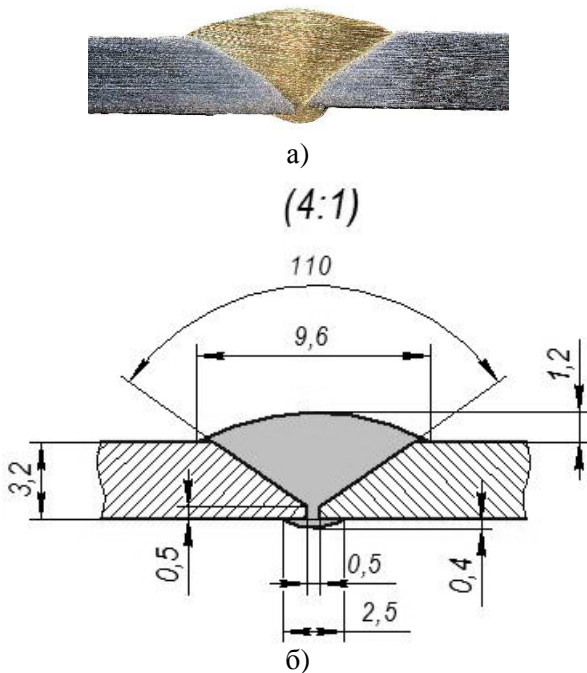
Метою даної роботи є встановлення залежності величини та характеру розподілу напружень від форми кромки в стикових паяних з'єднаннях труб під дією внутрішнього тиску, а також визначення оптимальної форми кромки.

Матеріали та методики досліджень

Для дослідження напружено-деформованого стану паяних з'єднань у даній роботі було обрано труби польових магістральних трубопроводів ПМТП-150, що виготовляються із низьколегованої сталі марки 16ГС, а для захисту від корозії покриті тонким шаром цинку.

Міцність паяних з'єднань прогнозували у програмі розрахунку напружено-деформованого стану методом кінцевих елементів (МКЕ). Для цього було розроблено комп'ютерні скінчено-елементні осиметричні моделі паяних з'єднань стиків труб діаметром 150 мм, товщиною стінки 3,2 мм. Оскільки існуючі стандарти не регламентують розміри швів та форму підготовки кромки для дугового паяння, то відповідні параметри вибирались для з'єднань труб дуговим зварюванням, тип з'єднання С17 згідно з ГОСТ 16037-80.

Для достовірності результатів моделювання з експериментальними даними моделі з'єднань виконувались за розмірами реальних з'єднань. Для цього було виготовлено дуговим паянням макрошліфи з'єднань, за якими вимірювались геометричні розміри швів (рис. 1).



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

Рисунок 1 – Розміри паяних з'єднань

Для імітаційного моделювання як матеріал труб застосовано низьколеговану сталь марки 16ГС, а як матеріал паяних швів – сплави CuSi₃ та CuAl₈. Характеристики даних матеріалів наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні фізичні та механічні властивості матеріалів, що використовувались при імітаційному моделюванні

Матеріал	Модуль Юнга, Па	Коефіцієнт Пуассона	Границя плинності, МПа
16ГС	2·10 ¹¹	0,3	325
CuAl ₈	1,2·10 ¹¹	0,335	200
CuSi ₃	1,1·10 ¹¹	0,394	120

Як гранична умова моделі розглядалась дія на внутрішню поверхню елементів паяного з'єднання труб тиску (рис. 2).

Максимальний тиск визначався з умови, щоб виникаючі еквівалентні напруження забезпечували пружно-пластичну деформацію матеріалу, що виникає при напруженні (0,9...1,1)σ_T [11]. Максимальний тиск визначали за формулою

$$p = \frac{2 \cdot \varphi \cdot \delta}{D + \delta} \cdot 0,9 \cdot \sigma_T, \quad (1)$$

де δ – товщина стінки труб, мм;
φ – коефіцієнт міцності паяного шва;
D – внутрішній діаметр труб, мм;
σ_T – межа плинності сталі (σ_T = 265 МПа для сталі 16ГС, за довідниковими даними).

Розрахований за формулою (1) максимальний тиск для даної моделі склав 9 МПа, що відповідає максимальним еквівалентним напруженням 238 МПа.

Як відомо, розміри кінцевих елементів мають значний вплив на точність результатів, що будуть отримані у процесі імітаційного моделювання, тому побудовано сітку, яка містить у поперечному перерізі триб'ять кінцевих елементів (рис. 3).

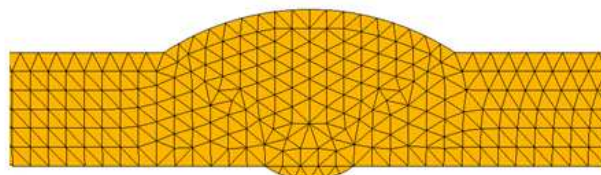


Рисунок 3 – Сітка кінцевих елементів

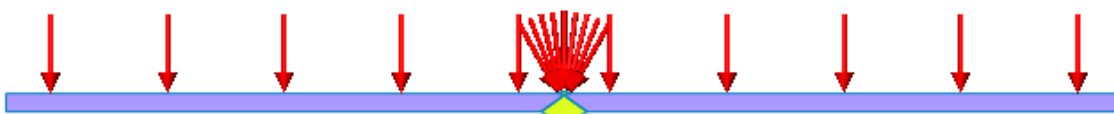
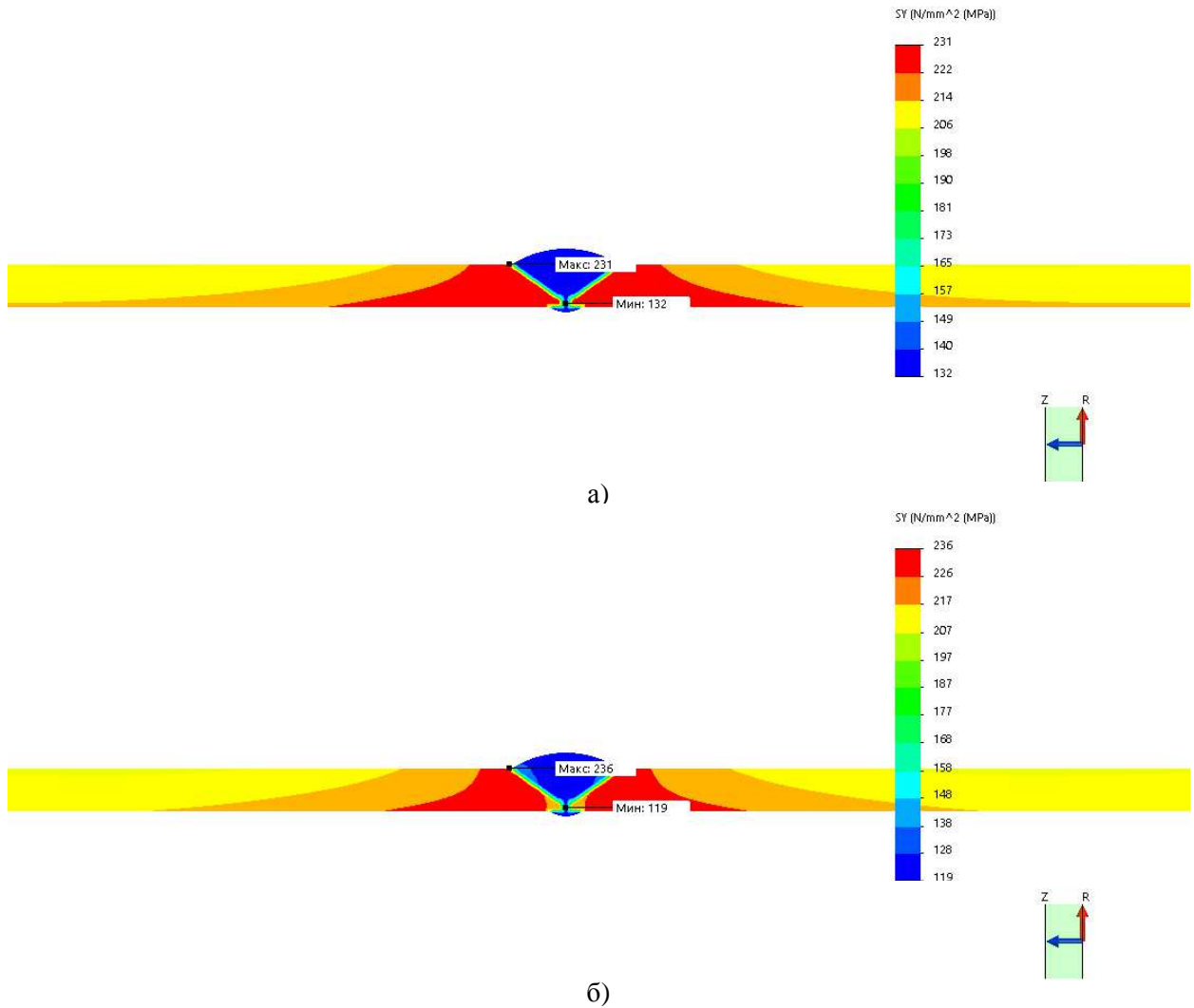


Рисунок 2 – Дія тиску на внутрішню поверхню елементів паяного з'єднання труб



а – матеріал шва – CuAl₈; б – матеріал шва – CuSi₃

Рисунок 4 – Епюри розподілу колових напружень в перерізі паяних з’єднань зі стандартною формою кромок

Результати досліджень та їх обговорення

При розрахунку на міцність тонкостінних оболонок визначальними напруженнями є колові, то для верифікації результатів, отриманих методом імітаційного моделювання та аналітичним методом, будемо оперувати коловими напруженнями. Максимальні колові напруження ділянки труби під дією розрахункового тиску за результатами кінцево-елементного моделювання становлять $\sigma_{\kappa} = 210$ МПа.

Для оцінки адекватності отриманої моделі порівняємо дані числового експерименту з аналітичним розрахунком. Колові напруження діють тангенціально поверхні трубопроводу та визначаються за формулою [12]

$$\sigma_{\kappa} = \frac{p \cdot D_{\text{вн}}}{2\delta}, \quad (2)$$

де p – тиск в трубопроводі, МПа;
 $D_{\text{вн}}$ – внутрішній діаметр труби, см;
 δ – товщина стінки труби, см.

Максимальне розрахункове значення колового напруження ($\sigma_{\kappa, p}$) у стінці труби становить 211 МПа. Визначимо похибку розрахунку

$$\Delta = \frac{\sigma_{\kappa, p} - \sigma_{\kappa}}{\sigma_{\kappa, p}} \cdot 100\% = \frac{211 - 210}{211} \cdot 100\% = 0,5\%.$$

Таким чином, розбіжність величини колового напруження прийнятої моделі та розрахованого аналітичним методом не перевищує 1%, що свідчить про високу точність моделювання та дозволяє у подальшому використовувати імітаційне моделювання для дослідження напружено-деформованого стану паяних з’єднань труб.

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

Розглянувши більш детально розподіл колових напружень (рис. 4) у зоні з’єднання шва з трубами, встановлено, що при використаних геометричних розмірах моделей відбувається



Рисунок 5 – Зруйноване з'єднання труб

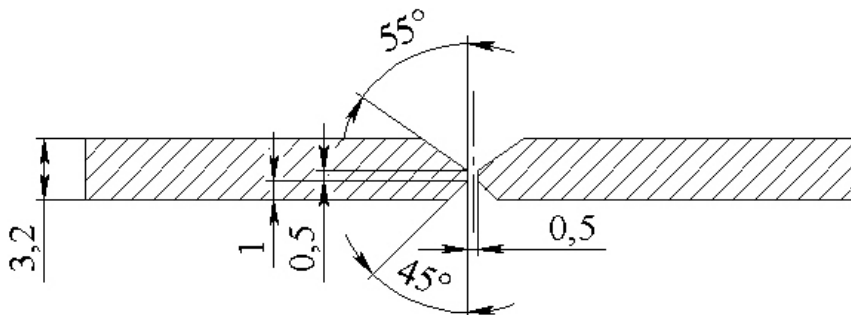


Рисунок 6 – Схема форми підготовки кромки за результатами оптимізації

локалізація максимальних величин напружень на переході між швом та трубою.

Максимальна величина колових напружень на верхній кромці стінки труби становить 231 та 236 МПа для з'єднань з матеріалом шва CuAl_8 та CuSi_3 відповідно. Як бачимо, величина максимальних напружень для даних матеріалів швів є майже однаковою, але розподіл напружень дещо відрізняється. Зокрема у з'єднанні з матеріалом шва CuSi_3 концентрація напружень на нижній кромці труб біля шва є меншою.

Відповідно, при такому розподілі колових напружень руйнування обох з'єднань відбувається в місці найбільшої їх концентрації, що також підтверджується експериментальними дослідженнями при руйнуванні зразків випробуванням на розтяг (рис. 5).

Результати проведених досліджень показали, що така геометрія швів не забезпечує відповідної міцності з'єднань. Для того, щоб зменшити максимальну величину колових напружень та позбутися їх концентрації поблизу шва, слід змінити геометрію шва та відповідно форму кромки труб. Це дасть змогу збільшити коефіцієнт запасу міцності паяних з'єднань та термін їх експлуатації.

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 згідно вимог СНиП 2.05.06-85).

Для оболонок під дією тиску концентрація напружень на зовнішній стороні стінки біля зварного шва є найбільш небезпечною, тому основним завданням оптимізації було змінити

місце концентрації максимальних напружень та зменшити їх величину.

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

Згідно з отриманими результатами дослідження елементів паяного з'єднання труб оптимальною є форма кромки з розмірами, вказаними на рис. 6.

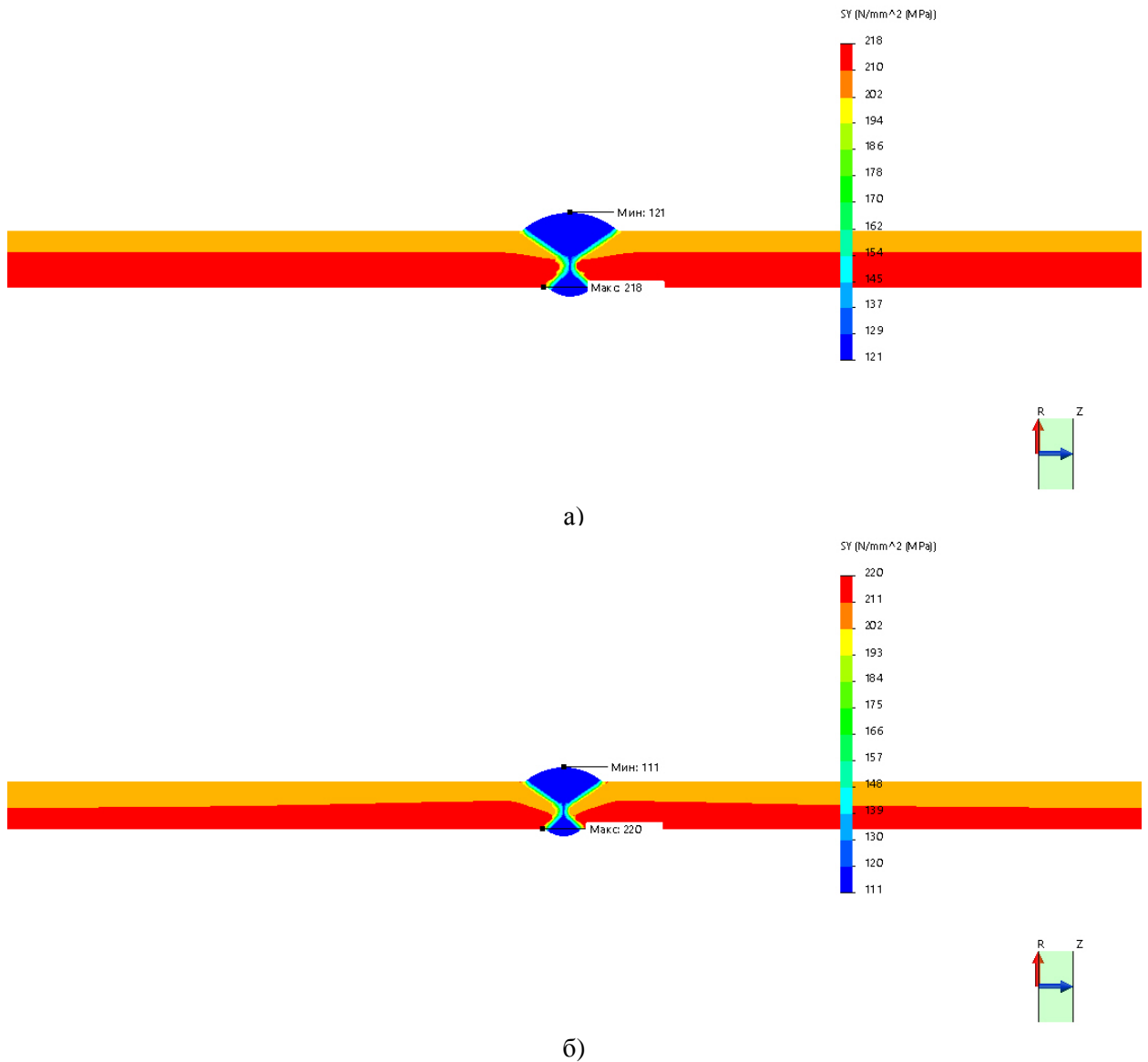
Для запропонованої форми кромки було проведено моделювання навантаження та розв'язання механічної задачі. За результатами моделювання побудовано епюри розподілу колових напружень в перерізі оптимізованих з'єднань (рис. 7).

Як бачимо з рис. 7, перерозподіл напружень в перерізі з'єднань змінився. А саме: максимальні колові напруження виникають вже по нижній кромці стінки труби на відстані близько 0,7 мм від шва, а їх величина зменшилась. Результати дослідження колових напружень перерізі з'єднань зі стандартною та оптимізованою формою кромки наведено в табл. 2.

За рахунок оптимізації форми кромки зменшилась величина колових та еквівалентних напружень за Мізесом, у перерізі паяних з'єднань труб, при їх навантаженні внутрішнім тиском.

Слід також відмітити, що в оптимізованому варіанті підготовки кромки вдалося зняти небезпечну концентрацію напружень на верхній кромці стінки труби між швом та основним металом, а розподіл напружень став більш рівномірним по довжині.

Розподіл колових напружень по верхній та нижній кромках перерізу з'єднань від центру шва показано на рисунку 8.



а – матеріал шва $CuAl_8$; б – матеріал шва $CuSi_3$

Рисунок 7 – Епюри розподілу колових напружень в перерізі паяних з'єднань з оптимізованою формою кромки

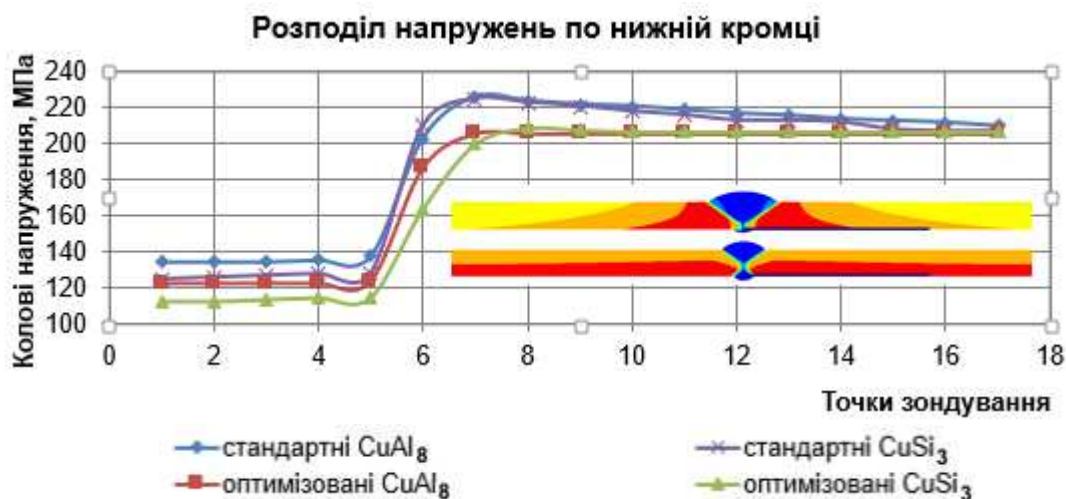
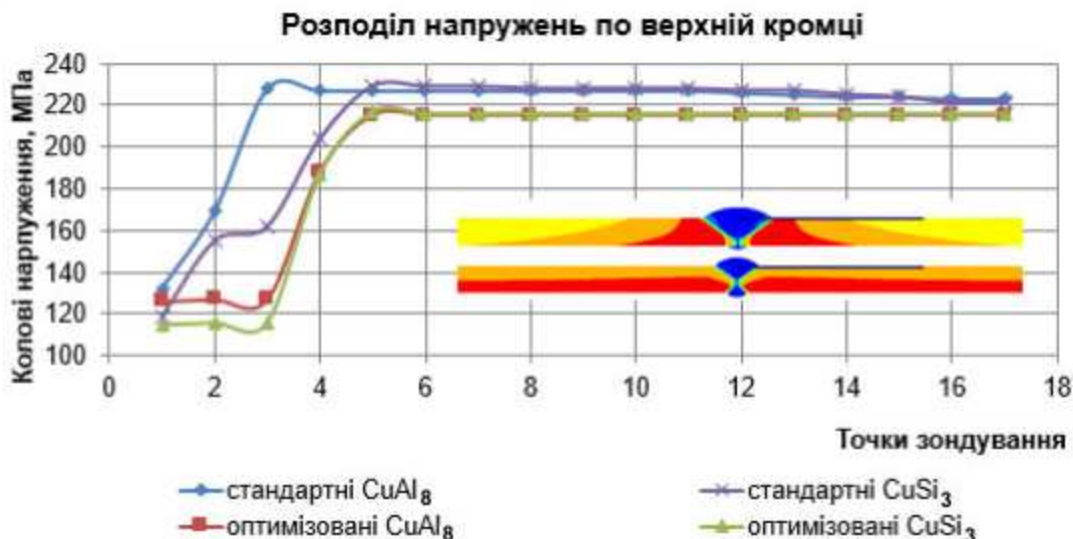
Таблиця 2 – Колові напруження в перерізі паяних з'єднань зі стандартною та оптимізованою формою кромки

Матеріал шва	Максимальні колові напруження, $\sigma_{кц}$, МПа		Різниця, %	Максимальні еквівалентні напруження за критерієм Мізеса, $\sigma_{екв}$, МПа		Різниця, %
	стандартні кромки	оптимізовані кромки		стандартні кромки	оптимізовані кромки	
$CuAl_8$	231	218	5,6	243	202	16,8
$CuSi_3$	236	220	6,7	247	217	12,1

За рахунок проведеної оптимізації зменшилась величина колових напружень не тільки в стінці труби, але і у самому шві. Також спостерігається (рис. 8) більш плавний розподіл напружень від шва до основного металу як по верхній, так і по нижній кромках.

Висновки

Результати дослідження напружено-деформованого стану з'єднань труб виконаних методом дугового паяння свідчать, що на розподіл та величину напружень у перерізі



а – по верхній кромці; б – по нижній кромці

Рисунок 8 – Розподіл колових напружень в перерізі з'єднань від центру шва

з'єднань суттєво впливає форма підготовки кромки. Імітаційне моделювання, методом кінцевих елементів показало, що найбільша концентрація напружень виникає на верхній кромці труб між швом та основним металом. Такий розподіл напружень є вкрай небезпечним, що і підтверджується результатами випробувань зразків на розтяг.

Запропоновано змінити форму підготовки кромки шляхом параметричної оптимізації, що дозволило зменшити величину максимальних колових напружень в паяних з'єднаннях, на 5,6% для шва CuAl₈ та 6,7% для CuSi₃. Також змінився перерозподіл напружень у перерізі з'єднань, а саме, концентрація максимальних колових напружень. В оптимізованому з'єднанні максимальні колові напруження є рівномірно розподіленими по нижній кромці труб, що дасть змогу підвищити їх міцність.

Отже, проведені дослідження дозволяють зробити висновки, що дугове паяння може за-

стосовуватись не тільки для з'єднання тонких листів, але і для з'єднання труб із цинковим покриттям, що експлуатуються під дією внутрішнього тиску. З'єднання оцинкованих труб дуговим паянням дозволить, крім корозійної стійкості шва та прилеглих ділянок труб, забезпечити також їх міцність при навантаженні внутрішнім тиском.

Для більш детального дослідження напружено-деформованого стану паяних з'єднань труб при навантаженні внутрішнім тиском потрібно провести експериментальні дослідження, що стане напрямком подальших досліджень.

Література

1 Хоруннов В. Ф. Дуговая пайка низкоуглеродистых сталей [Текст] / В. Ф. Хоруннов, И. В. Зволинский, С. В. Максимова // Автоматическая сварка. – 2013. – №4. – С. 23–27.

2 Лебедев В. А. Тенденции развития механизированной сварки с управляемым переносом электродного металла [Текст] / В. А. Лебедев // Автоматическая сварка. – 2010. – №10. – С. 45–53.

3 Rozalski M. MIG/MAG braze-welding of galvanised steel sheets and examples of difficult to weld systems [Text] / M. Rozalski, W. Gawrysiuk. // Welding International. – 2008. – Vol. 22, Issue 2. – P. 239–244.

4 Matviienkiv O. Development of the zinc coating pipe connection technology with arc soldering method using / O. Matviienkiv, P. Prsvazhnyuk, V. Myndiuk. // Eastern-European of Enterprise Technologies. – 2016. – №3. – P. 51–54.

5 Varol F. Influence of current intensity and heat input in Metal Inert Gas-brazed joints of TRIP 800 thin zinc coated steel plates [Text] / F. Varol, E. Ferik, U. Ozsarac, S. Aslanlar // Materials & Design. – 2013. – Vol. 52. – P. 1099–1105.

6 Iordachescu D. Influence of shielding gases and process parameters on metal transfer and bead shape in MIG brazed joints of the thin zinc coated steel plates. [Text] / D. Iordachescu, L. Quintino, R. Miranda, G. Pimenta // Materials & Design. – 2006. – Vol. 27, Issue 5. – P. 381–390.

7 Rykała J. Influence of the technological conditions of welding using the MIG/MAG method on metal transfer in the welding arc [Электронный ресурс] / J. Rykała, T. Pfeifer // Welding International. – 2013. Режим доступа до ресурсу: <http://dx.doi.org/10.1080/09507116.2012.753233>

8 Матвієнків О. М. Удосконалення технології виготовлення та ремонту збірно-розбірних трубопроводів / О. М. Матвієнків // Технологічний аудит и резервы производства. – 2016. – №4. – С. 4–8.

9 Optimization of arc brazing process parameters for exhaust system parts using box-behken design of experiment / Y. Kim, P. Park, K. Park, J. Ryu. // Journal of Welding and Joining. – 2015. – №2. – P. 129–137.

10 MIG Brazing of Galvanized Thin Sheet Joints for Automotive Industry / [L. Quintino, G. Pimenta, D. Iordachescu etc.] // Materials and Manufacturing Processes. – 2006. – No. 21. – P. 63–73.

11 Лейбо А. Н. Справочник механика нефтеперерабатывающего завода: справочное пособие / А. Н. Лейбо. – Москва: Наука, 1963. – 840 с.

12 Айбиндер А. Б. Расчет магистральных и промышленных трубопроводов на прочность и устойчивость / А. Б. Айбиндер. – М.: Недра, 1991. – 287 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
21.03.17*

*Рекомендована до друку
професором Райтером П.М.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором Фомічовим С.К.
(НТУУ «КПІ», м. Київ)*