

## UNTERSUCHUNGEN ZUM ELEKTRONENSTRAHLSCHWEIßEN MIT KOMBINIERTER MEHRPROZESSTECHNIK VON DUPLEX-STAHL 1.4462

---

*Товстостінні деталі з аустенітно-феритних сталей широко застосовуються при виготовленні повздожньо-зварних труб, а також при виготовленні деталей апаратів хімічної та харчової промисловості. З точки зору економічності, а також для забезпечення необхідних механічних та антикорозійних властивостей зварних з'єднань, для виготовлення даних деталей застосовується електронно-променево зварювання (ЕПЗ) з використанням присадкового матеріалу та/або післязварювальної термообробки. В даній роботі представлені результати розробки технології ЕПЗ з програмованим режимом пучка для виготовлення якісних зварних з'єднань без використання присадкового матеріалу та післязварювальної термообробки. Один з головних факторів при розробці технології ЕПЗ з програмованим режимом пучка, що впливає на механічні та антикорозійні властивості зварних швів, є час охолодження. Тому для економії матеріалів при розробці такої технології зварювання інших сталей аустенітно-феритного класу та для оптимізації параметрів зварювання поряд із експериментальними дослідженнями має бути розроблена математична модель для розрахунку температурних полів зварювання. Результати розрахунку температурних полів зварювання та часу охолодження також представлені в даній роботі.*

*Dickwandige Bauteile aus Duplexstählen werden bei der Halbzeugherstellung sowie im Maschinen-, Apparate- und Anlagenbau eingesetzt. Zum Schweißen dieser Bauteile kann aus wirtschaftlichen und qualitativen Gründen das Elektronenstrahlschweißen verwendet werden. Um die geforderten Austenit-Ferritverhältnisse und die daraus resultierenden mechanisch-technologischen Eigenschaften und die Korrosionsbeständigkeit zu gewährleisten, müssen die Duplexstähle mit Zusatzwerkstoff und/oder aufwendiger anschließender Wärmenachbehandlung geschweißt werden. Die vorliegende Arbeit stellt Zwischenergebnisse zur Entwicklung einer EB-Mehrprozessstechnologie zum qualitativen Schweißen dieser Stähle ohne Schweißzusatz und Wärmenachbehandlung dar. Da beim Schweißen der Duplexstähle neben der chemischen Zusammensetzung die Abkühlzeiten einen maßgebenden Einfluss auf das Austenit-Ferrit-Verhältnis haben, wird über die experimentellen Untersuchungen hinausgehend auch eine FEM-Simulation der Temperaturfelder zur zukünftigen Entwicklung von EB-Mehrprozessstechniken für weitere Duplexwerkstoffe durchgeführt und im Beitrag vorgestellt.*

---

### Вступ

Аустенітно-феритні сталі мають двофазну структуру та об'єднують у собі механічні властивості, характерні як для феритних, так і для аустенітних хромнікелевих сталей. Оптимальні механіко-технологічні властивості досягаються, коли структура даного типу сталей складається з 40-60 % фериту та залишку аустеніту [1]. В цьому випадку вони мають високу міцність, гарну стійкість проти МКК та ножевої корозії, а також гарну ударну в'язкість при низьких температурах.

При електронно-променевому зварюванні використовується присадковий матеріал у вигляді стрічки або дроту для досягнення структури та властивостей основного матеріалу [2]. Рідше з цією ж метою проводиться термообробка зварних виробів (отжиг при температурі 1080°C з послідовним охолодженням у воді). Максимально допустима кількість δ-фериту в зварному шві становить 65 % [3]. При більш високих кількостях δ-фериту відбувається зниження ударної в'язкості, а при наявності водню в шві зростає можливість утворення холодних тріщин [4]. Наряду з цим можливе погіршення антикорозійних властивостей металу шва [5].

За результатами досліджень [6, 7] було встановлено, що ЕПЗ може бути успішно застосоване для зварювання повздожnjih швів товстостінних труб з аустенітно-феритних сталей. Електронний промінь – дуже концентроване джерело нагрівання, що, на відміну від конвенціональних методів зварювання, дозволяє з'єднувати товстостінні деталі за один прохід і значно економити час на їх виготовлення. Головним завданням даної роботи є розробка універсальної технології ЕПЗ для виготовлення широкого спектру деталей із аустенітно-феритних сталей без використання дорого присадкового матеріалу та післязварювальної термообробки.

За допомогою конвенціонального ЕПЗ ще не було розроблено технології зварювання товстостінних деталей з аустенітно-феритних сталей, що забезпечувала б необхідні механічні та механіко-технологічні властивості зварних з'єднань без використання присадкового матеріалу або після зварювальної термообробки.

За даними попередніх досліджень [8, 9, 10] при конвенціональному ЕПЗ аустенітно-феритних сталей відбувається сильна феритизація зварного шва, спричинена його швидким охолодженням (Рис. 1). Інша проблема, що призводить до небажаної феритизації зварного шва – ефузія азоту із зварювальної ванни. ЕПЗ відбувається у вакуумній камері при тиску порядку  $10^{-3}$  мбар. Отже, через низький тиск навколишньої середовища під час зварювання, а також через низьку розчинність азоту відбувається його істотне зниження у металі шва після кристалізації зварювальної ванни. Як відомо, азот є аустенізатором і його низька кількість під час охолодження спричинює утворення більшої кількості феритної фази, що має в свою чергу негативний вплив на механічні, а також на антикорозійні властивості зварного з'єднання.

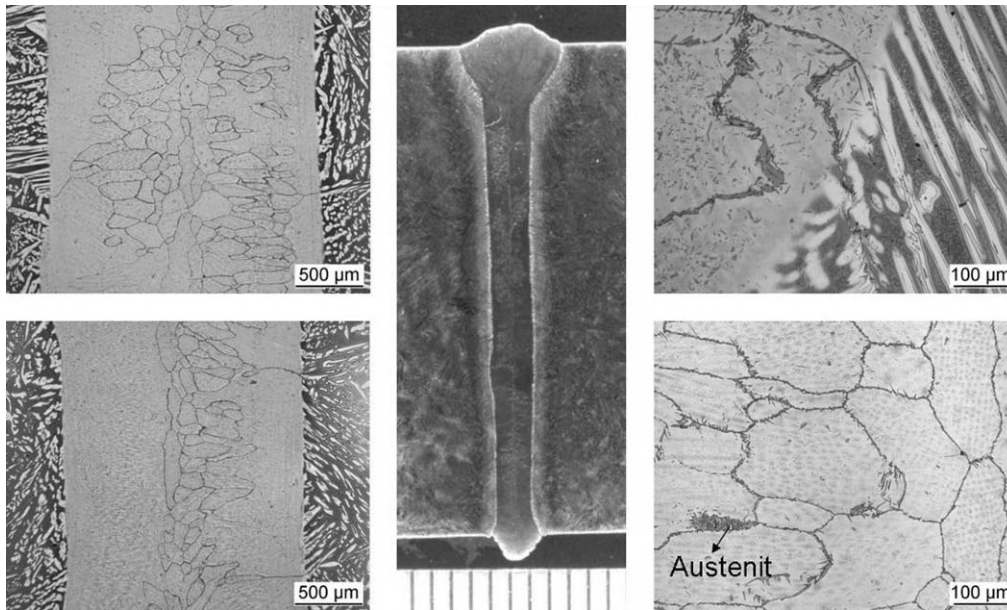


Рис. 1. Зварний шов, утворений за допомогою конвенціонального ЕПЗ на зразку із аустенітно-феритної сталі GX2CrNiMoN22-5-3 товщиною 25 мм. Кількість δ-фериту 97 %

Досить перспективною з точки зору розробки технології ЕПЗ товстостінних деталей з аустенітно-феритних сталей без використання присадки та термообробки є винайдена в останні роки технологія ЕПЗ з програмованим

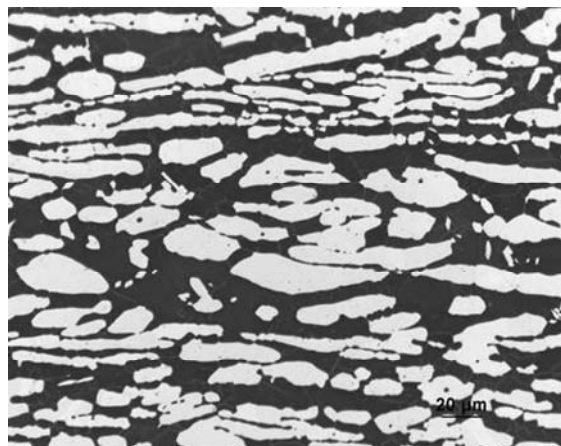


Рис. 2. Структура сталі X2CrNiMoN22-5-3 (аустеніт: білий)

режимом пучка. При використанні даної технології під час процесу зварювання за допомогою одного електронного променя може бути створена одночасно велика кількість плям нагрівання. Це є можливим завдяки дуже швидкому змінню фокусу та просторового положення електронного променя. При цьому швидкість зміни просторового положення є настільки високою, що рідкий метал зварювальної ванни не встигає кристалізуватися за час, протягом якого електронний промінь не діє на неї [12]. За допомогою даної технології є можливим не тільки утворення великої кількості зварювальних ванн за один прохід, а і комбінація різних процесів, тобто за один прохід може бути виконано попереднє підігрівання, зварювання та накладання косметичного шва. Таким чином є можливість значного впливу на термічний цикл зварювання.

Досліджуваний матеріал

В даній роботі представлені результати дослідження сталі аустенітно-феритного класу GX2CrNiMoN22-5-3 (1.4462). Хімічний склад та механічні властивості досліджуваного матеріалу

представлені в таблицях 1 і 2. Вміст δ-фериту в основному матеріалі вимірювався металографічним способом і становив 35 % (Рисунок 2).

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваного матеріалу [%]

Матеріал	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
1.4462	0,018	0.560	1.40	0,022	0,001	22,4	5,66	3,10	0,19

Таблиця 2

Механічні властивості досліджуваного матеріалу

Матеріал	$R_m$ [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	$A_5$ [%]	KV (-40 °C) [Дж]
1.4462	774	535	35	158

## Програма дослідження

Для розробки необхідної технології ЕПЗ товстостінних деталей з аустенітно-феритних сталей з програмованим режимом пучка спочатку необхідно експериментально встановити необхідний час охолодження  $t_{12/8}$ , при якому досягаються необхідні механічні та антикорозійні властивості. Дані дослідження проводилися на конвенціональній установці ЕПЗ з максимальним напруженням на катоді 150 кВ та максимальною потужністю 15 кВт. Тиск у вакуумній камері складав порядку  $10^{-3}$  мБар, а в генераторі порядку  $10^{-5}$  мБар. Параметри зварювання підбиралися таким чином, щоб забезпечити достатню, для нормального з'єднання встик, ширину шва. Також встановлені параметри зварювання мають забезпечувати гарне формування зварного шва.

Вплив на час охолодження  $t_{12/8}$  здійснювався за допомогою збільшення температури попереднього підігріву, яка в свою чергу змінювалася в залежності від кількості проходів електронного променя повздовж лінії зварного шва. Тобто, зразки були зварені декілька разів (від 1 до 6) повздовж однієї лінії шва (Таблиця 3). Таким чином, наряду із визначенням часу охолодження і залежного від нього співвідношення аустеніту та фериту, було визначено кількість азоту в зварному шві в залежності від кількості його проплавлень. Дані дослідження встановили співвідношення між кількістю  $\delta$ -фериту, часом охолодження  $t_{12/8}$  та кількістю азоту в зварному шві.

Таблиця 3

## Експериментальна програма та відповідні параметри зварювання

№	Мат.	Прис. мат.	Товщ. [мм]	Підігрів [°C]	U [кВ]	I [мА]	v [м/хв]	$t_{12/8}$ [с]	К-сть проходів ел. променя
Е-1	1.4462	-	16,8	395	150	42	0,5	4,5	1
Е-2	1.4462	-	16,8	340	150	43	0,5	7,4	2
Е-3	1.4462	-	16,8	435	150	40	0,5	17,7	3
Е-4	1.4462	-	16,8	370	150	35	0,5	30,3	4
Е-5	1.4462	-	16,8	370	150	35	0,5	46,6	5
Е-6	1.4462	-	16,8	370	150	34	0,5	48,7	6

Для вимірювання часу охолодження  $t_{12/8}$  використовувалися NiCr-Ni-термоелементи товщиною 0,3 мм, що були закріплені на поверхні зразку за допомогою контактного зварювання. Оскільки ЗТВ при ЕПЗ є дуже вузькою, для нормального вимірювання часу охолодження  $t_{12/8}$  термоелементи мали бути закріплені на відстані не більше 1 мм від лінії сплавлення.

Вимірювання кількості  $\delta$ -фериту в зварному шві відбувалося на поперечних шліфах зварних зразків за допомогою металографічних досліджень. Визначення кількості  $\delta$ -фериту шляхом вимірювання частки магнітної фази в металі шва є неможливим через його недостатню ширину.

На кожному зразку було проведено приблизно 10 вимірювань частки  $\delta$ -фериту в різних областях зварного шва (корінь шва, середина та верхня частина шва) і визначено середні значення кількості  $\delta$ -фериту для кожної з вище зазначених областей.

Вимірювання кількості азоту відбувалося на вирізаних із зварного шва зразках за допомогою газового хроматографа, оснащеного детектором теплопровідності.

Поряд із дослідженням структури шва в залежності від часу охолодження та кількості азоту в ньому, були виведені вимірювання ударної в'язкості при низькій температурі, а також дослідження антикорозійних властивостей. Вимоги по даним критеріям були взяті з специфікації по зварюванню аустенітно-феритних труб для нафтопереробної промисловості [13,14,15].

Вимірювання ударної в'язкості матеріалу шва проводилося на вирізаних із його середини зразках перпендикулярно напрямку зварювання за DIN EN 10045 при температурі  $-40$  °C, що становить найнижчу експлуатаційну температуру аустенітно-феритних сталей. Ударна в'язкість також була виміряна на зразку з досліджуваного матеріалу 1.4462, виготовленого за допомогою ручного дугового зварювання. Параметри зварювання наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

## Параметри ручного дугового зварювання

Метод зварювання.	Осн. мат.	Присадковий мат.	Товщ. [мм]	Підігрів [°C]	U [В]	I [А]	v [м/хв]	$t_{12/8}$ [с]	К-сть зв. швів
РДЗ	1.4462	Е 22 9 3 N L R 32(AROSTA 4462)	16,8	100-120	-	160-210	-	-	8

Як було зазначено раніше, один з головних факторів впливу на механічні та антикорозійні властивості зварних швів з досліджуваного матеріалу, є час охолодження  $t_{12/8}$ . Тому для економії матеріалів при розробці технології ЕПЗ з програмованим режимом пучка для зварювання сталей аустенітно-феритного класу та для оптимізації параметрів зварювання, поряд із експериментальними дослідженнями має бути розроблена математична модель для розрахунку температурних полів зварювання.

Розрахунок температурних полів зварювання проводився за допомогою програми Ansys, що оснований на методі скінченних елементів. Метод скінченних елементів (МСЕ) — це числова техніка знаходження розв'язків інтегральних та часткових диференціальних рівнянь (ЧДР). Процес розв'язання побудований або на повному усуненні диференціального рівняння для стаціонарних задач, або на розкладі ЧДР в апроксимуючу систему звичайних диференціальних рівнянь, які потім розв'язуються використанням якої-небудь стандартної техніки, такої як метод Ейлера.

Існує три основні області моделювання зварювання за допомогою МСЕ: моделювання процесу зварювання (обчислення температурного поля зварювання та часу охолодження), моделювання напружено-деформованого стану зварного зразка (визначення напружень та деформацій зразка після процесу зварювання), моделювання структури зварного шва (розрахунок фазового складу зварного шва). В даній роботі було проведено моделювання процесу ЕПЗ та визначено час охолодження  $t_{12/8}$  в зварному шві.

Досліджуваний матеріал має нелінійні теплофізичні властивості внаслідок фазового перетворення, що відбувається під час розплавлення та подальшої кристалізації металу зварного шва [16]. Дана особливість була врахована при обчисленні ТПЗ досліджуваного матеріалу.

Тривимірний скінченно-елементний модель представлена на рисунку 3. Для скорочення розрахункового часу СЕ-модель досліджуваного зразка була побудована з градієнтною сіткою із більшою кількістю кінцевих елементів в області зварного шва та ЗТВ. СЕ-модель складається з 11848 вузлів та 194634 скінченних елементів. Тип СЕ – SOLID70. Обчислення температурного поля зварювання проводилося для зварного шва, виконаного за допомогою конвенціонального ЕПЗ без поперечних коливань електронного променя.

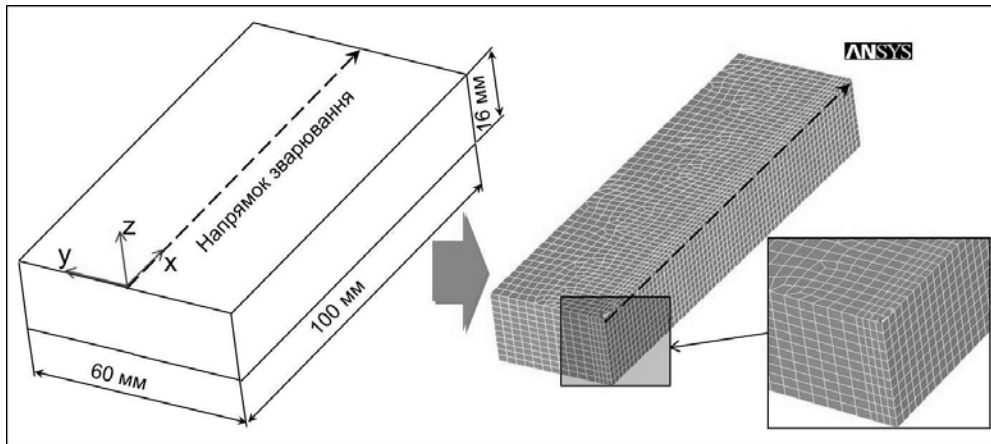


Рис. 3. СЕ-модель досліджуваного зразка

#### Результати досліджень

Після дослідження зразків, виготовлених при різних параметрах зварювання, були встановлені оптимальні параметри зварювання, що забезпечували гарне формування зварного шва та відсутність в ньому внутрішніх дефектів.

Час охолодження  $t_{12/8}$  становив в залежності від кількості пропалень від 4 до 50 с (див. Таблицю 3).

Для аустенітно-феритних сталей є характерним феритний тип первинної кристалізації. В розплавленому стані даний матеріал має феритну структуру, а в інтервалі температур від 1200 до 800 °С відбувається утворення аустеніту. Кількість утвореного аустеніту залежить від часу охолодження від 1200 до 800 °С, а також від наявності частки елементів-аустенізаторів. Було визначено, що при часі охолодження 4,5 та 7,4 с структура зварного шва складалася переважно з феритної фази, частка якої становила 86 та 82 % відповідно (Рис. 4).

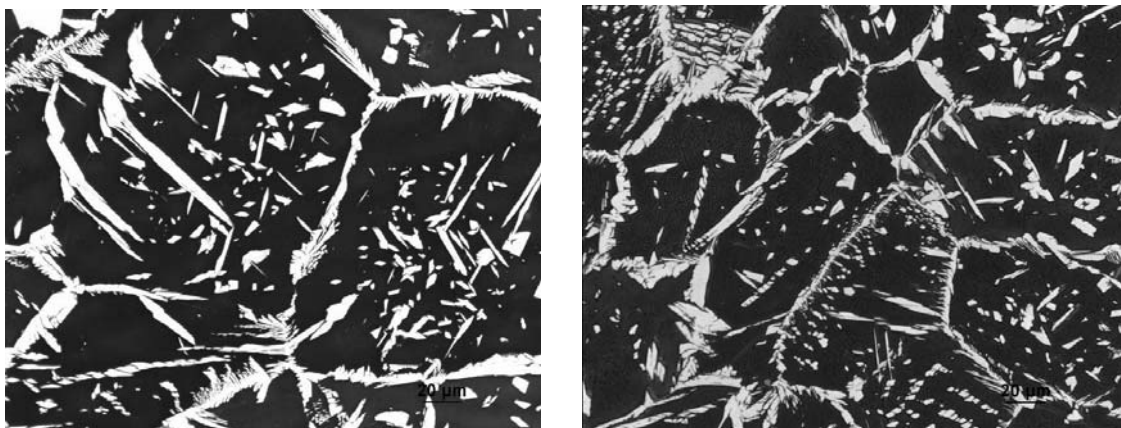


Рис. 4. Мікрошліфи зразка Е-1 (зліва) та Е-2 (справа); Аустеніт – білий

Найоптимальніше співвідношення аустенітної та феритної фаз в металі шва було досягнуто при зварюванні зразка Е-3. Кількість  $\delta$ -фериту складала приблизно 70 % при часі охолодження  $t_{12/8} = 17,7$  с (Рис.5).

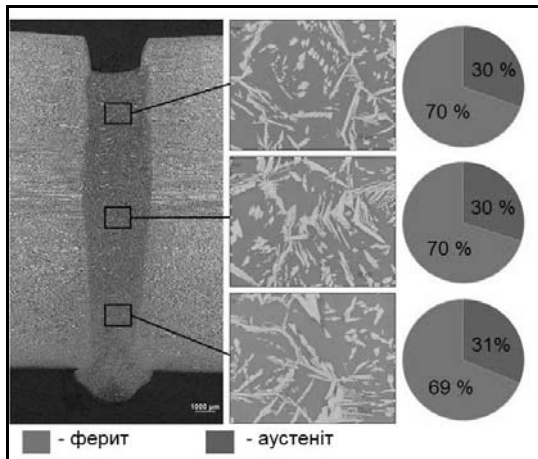
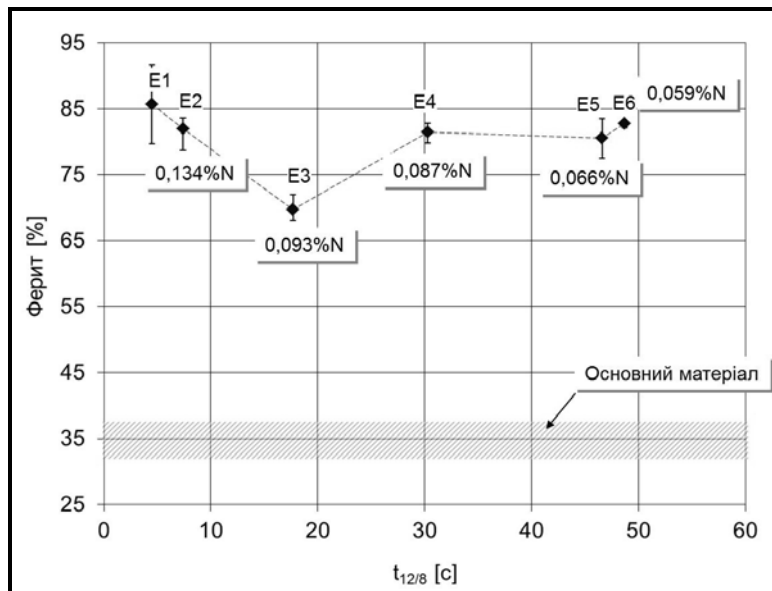
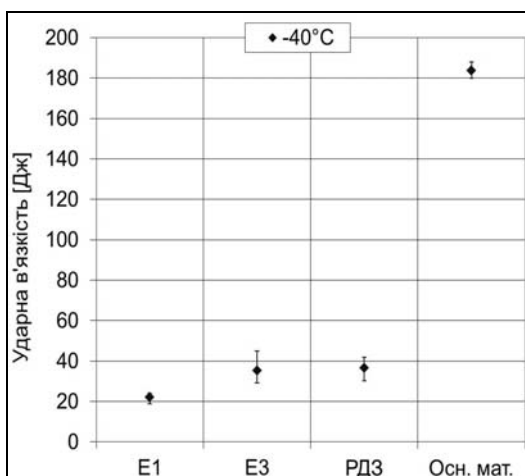


Рис. 5. Мікροструктура зразка ЕВ-3; аустеніт – білий

необхідна для утворення достатньої кількості аустеніту частка азоту. При збільшенні кількості проплавлень частка азоту в металі шва знижується до рівня, що є недостатнім для утворення необхідної кількості аустеніту, навіть при істотно вищому часі охолодження.

При подальшому підвищенні часу охолодження  $t_{12/8}$  за допомогою збільшення проходів електронного променя повздовж лінії шва (від 4 до 6), кількість  $\delta$ -фериту знову збільшилася і становила від 80 до 85 % відповідно. Отримані результати пояснюються зниженням кількості азоту в металі зварного шва через його часткову ефузію у вакуумну камеру при кожному проплавленні металу електронним променем. Дана тенденція була підтверджена вимірюванням кількості азоту в шві в залежності від кількості проходів електронного променя, тобто кількості проплавлень металу зварного шва. Було встановлено, що при 6 проплавленнях кількість азоту в шві зменшується втричі і становить близько 0,06 %. Для досягнення нижчої частки  $\delta$ -фериту в зварному шві при такій кількості азоту необхідний значно довший час охолодження  $t_{12/8}$  [11]. З рисунку 6 чітко видно, що оптимальне співвідношення аустенітної та феритної фаз було досягнуто при 3 проплавленнях металу шва (зразок Е-3). Даний результат пояснюється тим, що при досить високому часі охолодження  $t_{12/8} = 17,7$  с в металі шва була присутня

Рис. 6. Залежність кількості утвореного  $\delta$ -фериту від часу охолодження та кількості азоту в зварному швіРис. 7. Ударна в'язкість зварного шва та основного матеріалу при  $-40$  °C

Визначення ударної в'язкості проводилося на зварному зразку з найнижчим часом охолодження, найкращим співвідношенням аустенітної та феритної фаз, на зразку, що був зварений за допомогою РДЗ (Таблиця 3), а також на зразку з основного матеріалу. Результати представлені на рисунку 7.

Через високу кількість  $\delta$ -фериту в зварному шві зразок Е1 мав найнижче значення ударної в'язкості серед всіх досліджених зразків. Е3 та РДЗ з використанням електроду Е 22 9 3 N L R 32 показали майже однакові значення ударної в'язкості приблизно 40 Дж, що задовольняє вимогам багатьох виробників деталей із аустенітно-феритних сталей [13, 14, 15].

Обчислені за допомогою програми Ansys температурні поля зварювання та час охолодження  $t_{12/8}$  було порівняно з результатами експериментальних досліджень. З рисунку 8 видно, що обчислена за допомогою МКС ширина зварного шва, що описується ізотермою температури плавлення досліджуваного матеріалу, є більшою від реальної. Розраховані та отримані за допомогою термоелементів криві охолодження також відрізняються між собою, особливо на

стадії нагрівання. Представлені вище результати показали, що розрахункова модель на даній стадії є не досить точною і має бути дорацьована. Джерело нагрівання при розрахунку ТПЗ та  $t_{1/8}$  описувалося кривою Гаусса, а розповсюдження тепла в середину зварювального зразка рівнянням теплопровідності від його поверхні.

#### Висновок

Результати перших досліджень показали, що час охолодження  $t_{1/8}$  може бути істотно підвищений за допомогою багаторазового проплавлення зварного шва електронним променем. Негативним наслідком є ефузія азоту з кожним наступним проплавленням металу шва. Внаслідок цього, при високій кількості проплавлень, відбувається значна феритизація зварного шва під час його кристалізації, незважаючи на довгий час охолодження  $t_{1/8}$ . За даними досліджень, найкращі властивості має зварний шов із 70 % фериту та 0,093 % азоту, що був утворений при триразовому проходженні електронного променя по одній лінії зварювання. Значення ударної вязкості, утвореного за допомогою ЕПЗ зразка, є рівним значенню ударної вязкості зразка, утвореного за допомогою РДЗ з використанням присадкового дроту E 22 9 3 N L R 32, та становить близько 40 Дж. Даний результат можна розцінювати як позитивний, оскільки він задовольняє вимогам багатьох виробників деталей з аустенітно-феритних сталей [13, 14, 15].

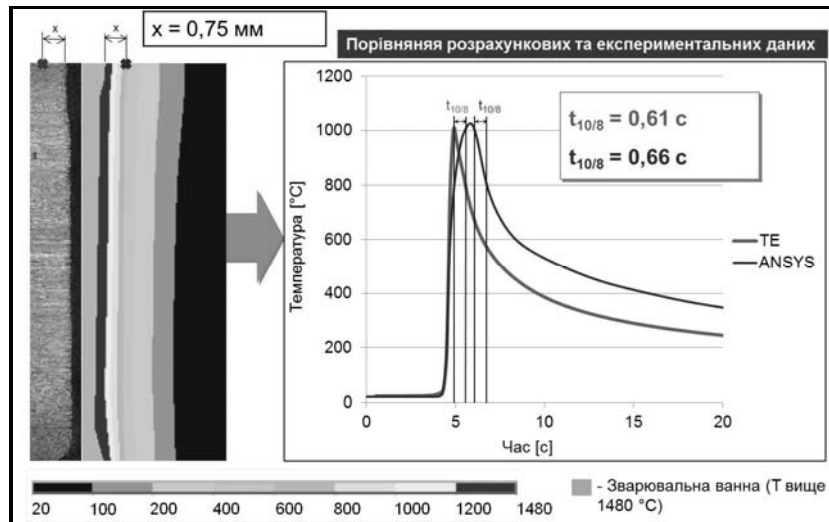


Рис. 8. Розрахунок ТПЗ та кривих охолодження за допомогою Ansys

Розрахункова модель для обчислення температурних полів зварювання та часу охолодження  $t_{1/8}$  має бути дорацьована. А саме, утворення капіляру та плазми в результаті дуже концентрованого тепловкладення в зварювальний зразок електронним променем має бути врахована в даній моделі.

Вище представлені результати досліджень будуть використані при розробці технології ЕПЗ з програмованим режимом пучка для виготовлення високоякісних зварних швів з аустенітно-феритних сталей без використання присадкового матеріалу.

#### Список літератури

- Gunn, R.: Duplex Stainless Steels; Microstructure properties and applications. Abington Publishing, Cambridge (1997)
- Hoffmann, R.; Schüller, T.; Sölch, R.: Elektronenstrahlschweißen eines Duplexstahls mit bandförmigem Zusatzwerkstoff. Schweißen und Schneiden, Band 53 (2001) Heft 3, Seite 148,150-155.
- MESC Specification Document: Duplex and Superduplex Stainless Steel Pipe (Amendments/Supplements to ASTM A 928). 2007
- Gooch, T. G.; Leonard, A. J.: Hydrogen cracking of ferritic-austenitic stainless steel weld metal. Konferenz-Einzelbericht Duplex American 2000 Conference, Houston, USA, 29.02 – 10.03.2000, KCI-Publishing BV, vol. 1, S. 345-357
- Leitfaden zur Spezifikation von Ferrit in Schweißgut aus nichtrostendem Stahl.
- Sölch, R.: Herstellung längsnahtgeschweißter Edelstahlrohre mit größerer Wanddicke. DVS-Berichte, Band 216 (2001) Seite 121-128.
- Sölch, R.: Elektronenstrahlschweißen beim Herstellen von längsnahtgeschweißten Rohren. DVS-Berichte, Band 232 (2004) Seite 104-109.
- Steffens, H. D.; Hartung, F.; Buchmann, C.: Elektronenstrahlschweißen des Duplex stahls X2CrNiMoN2253. DVS-Berichte, Band 155 (1993) Seite 81-85.
- Cvijovic, Z.; Knezevic, V.; Mihajovic, D.; Radenkovic, G.: Effect of welding process on the microstructure of duplex stainless steel. Paper 20. Welding Science and Technology, Japan-Slovak Welding Symposium, 1996 (1996) Seite 109-114.
- Muthupandi, V.; Bala Srinivasan, P.; Seshadri, S.K.; Sundaresan, S.: Effect of weld metal chemistry and heat input on the structure and properties of duplex stainless steel welds. Materials Science and Engineering A, Volume 358, Issues 1-2, 15 October 2003, Pages 9-16.
- Mundt, R. Hoffmeister H.: Effect of chemical composition and weld thermal cycles on phase transformation and microstructures of ferritic-austenitic steels, Conference Proceedings Stainless Steels '84, The Institute of Metals (1985)
- Dobeneck, D. von; Löwer, T.; Adam, V.: Elektronenstrahlschweißen: das Verfahren und seine industrielle Anwendung für höchste Produktivität. Verl. moderne Industrie, Landsberg/Lech (2001).
- MESC SPE 74/022 (Ergänzung zu ASTM A 928), Shell, Juni 2007
- NORSOK Standard MDS D42.
- Petroleum Development Oman L.L.C., Specification for Welding of Duplex Stainless Steel Pipelines
- Hildebrand, J.: Numerische Schweißsimulation; Bestimmung von Temperatur, Gefüge und Eigenspannung an Schweißverbindungen aus Stahl- und Glaswerkstoffen; Dissertation; Weimar 2008.