

УДК 621.79.01

О.В. Поступайло, Д.В. Бакалець, В.І. Савуляк

## ЯКІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВАРЮВАННЯ РАМНО-ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

*У статті розглянуто метод, що дозволяє оцінити характеристики якості зварювання рамно-оболонкових конструкцій, за комплексом показників, які відображають їх технічні, економічні та інші властивості. Наведено приклад визначення характеристик якості таких конструкцій, зварених внапуск.*

*Ключові слова: зварювання, якість, оцінювання, рамно-оболонкові конструкції.*

*Форм. 1. Табл. 1. Рис. 5. Літ. 8.*

О.В. Поступайло, Д.В. Бакалець, В.И. Савуляк

## КАЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРКА РАМНО-ОБОЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*В статье рассмотрен метод, позволяющий оценить характеристики качества сварки рамно-оболочных конструкций, по комплексу показателей, отражающих их технические, экономические и другие свойства.*

*Приведен пример определения характеристик качества таких конструкций, сваренных внахлест.*

*Ключевые слова: сварка, качество, оценка, рамно-оболочные конструкции.*

O. Postupailo, D. Bakalets, V. Savulyak

## QUALITATIVE CHARACTERISTICS WELDING FRAME-SHELL STRUCTURES

*This article describes a method for assessing the characteristics of welding quality frame-shell structures, a range of indicators that reflect their technical, economic and other properties. An example of determining the quality characteristics of such structures, overlap welding.*

*Keywords: welding, quality, assessment, frame-shell structure.*

Рамно-оболонкові конструкції знайшли широке застосування для виробничих споруд, виготовлення громадського транспорту та у інших сферах. Тому підвищення їх якості і довговічності є актуальним завданням. Вони є гібридом рамних та оболонкових конструкцій, в яких рама виконує роль опор, а листовий метал створює відокремлене середовище та несе частину навантаження (рис. 1) [1].

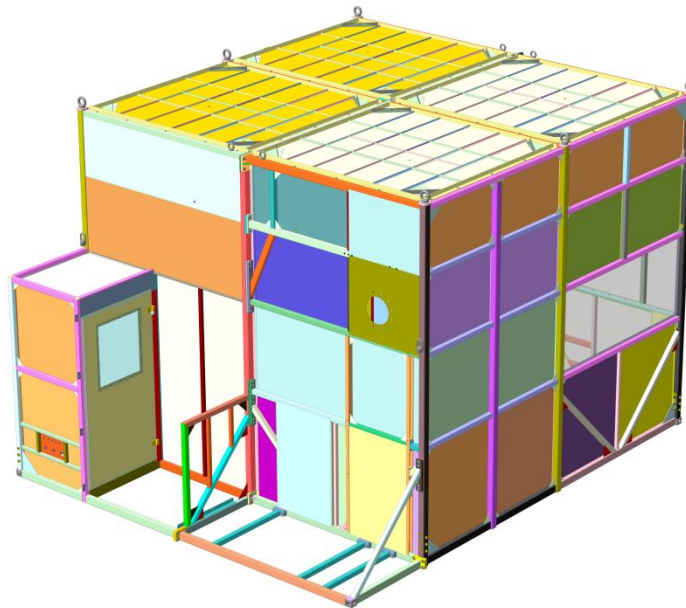


Рис. 1. Рамно-оболонкова конструкція(установка для вилучення твердих радіо активних відходів) [авторська розробка]

Перевагою використання таких конструкцій є низька матеріаломісткість у відношенні до корисного об'єму споруди, що є актуальним для всіх сфер машинобудування.

Найбільш вразливими місцями рамно-оболонкових конструкцій, з точки зору експлуатаційних властивостей, є зварні з'єднання [2-3]. Розглянемо можливий варіант комплексного оцінювання якості виготовлення такої споруди із застосуванням приварювання листів оболонки до рами внапуск.

З метою комплексної оцінки конструкції та способу її виготовлення нами запропоновано використати метод експертних оцінок [4]. Якість конструкцій, що розглядаються, визначається комплексом показників, які відображають їх технічні, економічні та інші властивості і відбираються спеціалістами на попередньому етапі дослідження. На другому етапі дослідження експерти встановлюють вагові коефіцієнти кожного показника. Найбільші вагові коефіцієнти надають показникам якості, що чинять найбільший вплив на результат вирішення поставленої комплексної задачі. Таким чином, всі показники якості для кожного конкретного випадку отримують певний ранг та відповідний коефіцієнт значущості. Зручно вагові коефіцієнти вибирати у рамках від 0 до 1.

На третьому етапі оцінюються всі показники почергово за найбільш зручною шкалою, наприклад від 10 до 1, або від 5 до 1 тощо. При цьому незалежно від значущості показника у загальній оцінці об'єкту найкращий випадок оцінюється максимальна, а інші меншими оцінками у порівнянні з ним. Може мати місце дві чи більше однакових оцінок для випадку, що розглядається, коли експерт не знаходить переваг між якісними характеристиками. Загальна оцінка об'єкту за окремим показником визначається як добуток вагового коефіцієнта показника та його оцінки у балах. Найкращим є варіант конструкції, технологічного процесу або виробу, який набирає у підсумку за усіма показниками з врахуванням вагових коефіцієнтів максимальну кількість балів.

Нижче розглянуто використання методу експертних оцінок на прикладі вибору варіанту виконання зварних з'єднань рамно-оболонкової конструкції. Досліджувалось три варіанти виконання зварних з'єднань внапуск листового матеріалу та рами. Варіанти 1 та 2 відрізняються марками присадних дрітків (1-й із звичайної сталі, 2 - високолегованої). Зразок 3 виконаний способом зварювання внапуск, який передбачає розміщення додаткового паяльного матеріалу на основі міді між деталями, що зварюються, в області температурного поля, де забезпечується його розплавлення від процесу зварювання (рис.2). Така технологія поєднує процеси зварювання та паяння і передбачає використання припоїв для підвищення міцності зварних з'єднань внапуск, а також підвищення корозійної стійкості навколошовної зони [5-6].

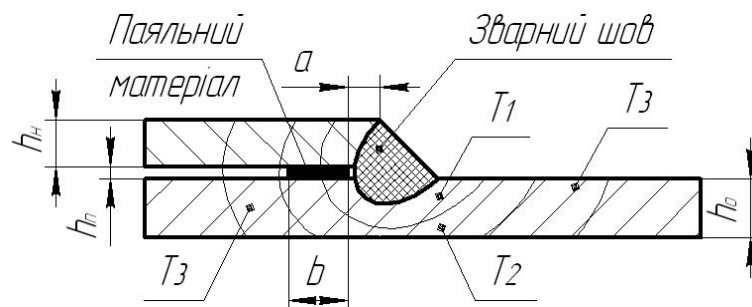


Рис. 2. Варіант зварювання внапуск [авторська розробка]

Оцінювання 1 та 2 варіантів виконання зварного з'єднання не викликає утруднень. Зупинимося більш детально на 3 варіанті та його якісних характеристиках.

Необхідною умовою реалізації описаного варіанту зварювання є обґрунтований вибір або розрахунок параметрів процесу зварювання-паяння, при яких відбудеться повне розплавлення припою, і утворяться якісне з'єднання деталей. Для цього необхідно визначити: режими зварювання, із врахуванням товщини профілю рами в зоні приварювання  $h_0$  та накладки  $h_n$ ; склад паяльного матеріалу; товщину  $h_n$  та ширину  $b$  смужки припою; її віддалі від зварного шва  $a$  в залежності від глибини проплавлення та геометрії шва в поперечному перетині.

Визначення оптимальних режимів комбінованого зварювання доцільно проводити методом моделювання процесу із використанням спеціалізованого програмного забезпечення на основі кінцево-елементного аналізу [7]. Модель (рис.3) дозволяє аналізувати в часі теплові поля під час зварювання та охолодження деталі, визначати зміни температур в різних точках об'єму матеріалу деталі та припою.

Розроблена комп'ютерна модель зразка (рис.3) у вигляді верхнього листа і нижнього більш масивного профілю та смужки припою  $5 \times 1$  мм і заданих режимів зварювання дозволила отримати термограми (рис.4) для вказаних точок. З графіка видно, що температура в точці  $T_1$  є мінімальною і досягає температури  $932^\circ\text{C}$  на третій секунді після початку зварювання. В якості припоїв для проведення експериментів використано сплави міді з цинком, марганцем та іншими елементами.

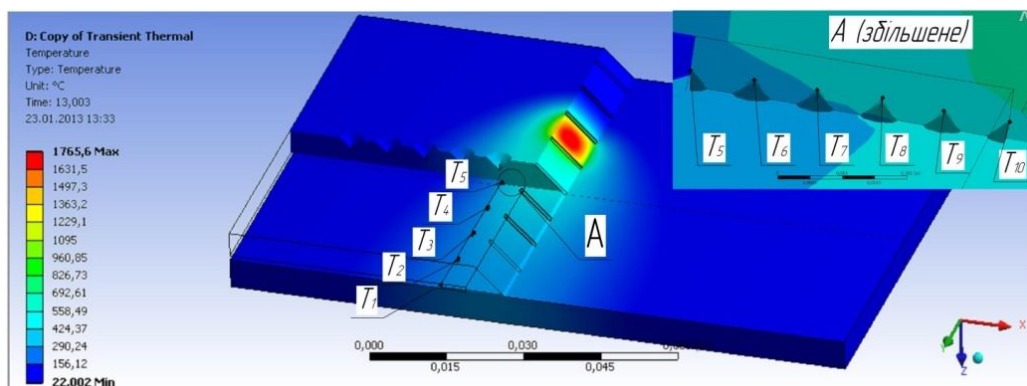


Рис. 3. Комп'ютерна модель третього варіанту зварювання [авторська розробка]

Припій доцільно обирати використовуючи діаграми стану. Обраний сплав окрім необхідних механічних характеристик повинен мати температуру плавлення, яка забезпечувала б його повне розплавлення, тобто була меншою мінімальною на графіку (рис. 4). Наприклад, при використанні мідно-цинкових припоїв концентрація елементів повинна відповідати області діаграми стану сплаву Cu-Zn, що розташована праворуч від лінії з концентрацією цинку у 27 %. У випадку використання припою на основі міді з марганцем слід обрати сплав в якому Mn знаходиться в межах 15 - 62% [8].

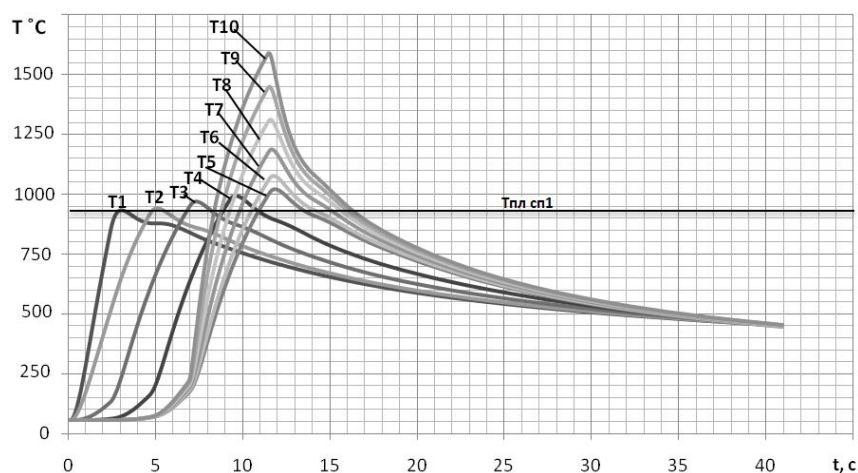


Рис. 4. Температури у точках навколошовної зони (модельні розрахунки) [авторська розробка]

Для забезпечення розплавлення припою із заданою концентрацією компонентів у відповідності до експлуатаційних вимог, змінювали режими зварювання (силу струму, швидкість, кут нахилу електроду). У випадках, коли повне розплавлення припою за рахунок тепла, що виділялось при зварюванні, стало неможливим, конструкція попередньо підігрівалась.



Рис. 5. Границі сплавлення між сталлю і міддю: а) із сторони зварного шва; б) із протилежної сторони від зварного шва [авторська розробка]

Для застосування методу експертних оцінок, кожній з якісних характеристик (показники А, В, С, D, E, F) експертно встановлено вагові коефіцієнти. Для зручності обрано шкалу від 0 до 1, де 1 найбільше значення.

Дослідження корозійної стійкості (показник А) проводилось ваговим методом. Метод дослідження передбачав вимірювання втрат маси зразків в результаті корозійного руйнування. Для пришвидшення процесу корозії зразки занурювались в 3% розчин NaCl у дистильованій воді при постійній температурі в 20<sup>0</sup>C, продукти корозії періодично видалялись. Фіксування зміни маси зразків відбувалось лише після видалення продуктів корозії.

В результаті випробувань встановлено, що корозійне руйнування зразка 1 було найбільшим, корозійне руйнування вразило весь зразок.

За рахунок легованого дроту зварний шов зразка 2 став корозійностійким і візуально чітко виділяється на фоні основного металу. На відміну від зварного шва метали листа та основи піддались корозійному руйнуванню тим сильніше, чим далі вони знаходяться від місця зварювання, але в межах зони термічного впливу (ЗТВ). Поза зоною термічного впливу корозійне руйнування стало меншим і носить ідентичний характер для всіх зразків.

На зразку 3 спостерігається зменшення корозійного руйнування в місцях присутності міді, на решті поверхні окислення ідентичне зразку 1. Втрати маси за рахунок окислення поверхні зразка 3 становить на 10-11% менше, ніж зразка 1.

Міський транспорт (тролейбуси, трамваї, автобуси) є різновидом використання рамно-оболонкових конструкцій. Поширеним заходом протидії утворенню на міських дорогах та небезпечних ділянках магістралей ожеледі їх посипають спеціальними сумішами з додаванням солей. Під впливом цього агресивного середовища конструкції інтенсивно вражаються корозією. В таких умовах важливою якісною характеристикою зварного з'єднання для рамно-оболонкових конструкцій є показник корозійної стійкості, тому цьому показникові надано ваговий коефіцієнт, що дорівнює 1.

Для визначення запасу міцності зразків (показник В), зварених за описаною вище технологією із застосуванням припоїв на основі міді, було проведено випробування на розривній машині. Використовувались відомі методи випробувань, що створюють навантаження, що подібні до навантажень зварних з'єднань у конструкції.

В результаті випробувань встановлено, що руйнування усіх зразків відбувалось поза зварним швом та зоною зварювання. Виявлено, що руйнування місця зпаювання зразка 3 має в'язкий характер, відбувається по криволінійній траєкторії і в деяких місцях проходить по основному металу деталі без руйнування припою, що свідчить про високу міцність такого з'єднання. Встановлено, що з'єднання, зварені за розробленою технологією, мають міцність на 20...25 % вищу, ніж з'єднання, що зварені без встановлення паяльного матеріалу за стандартною технологією зразків 1 та 2.

Ваговий коефіцієнт оцінки показника запасу міцності динамічно навантажених конструкцій, на думку експертів, є одним з вирішальних. Тому йому теж було присвоєно значення рівне 1.

Мікроструктурний аналіз (показник С) зони сплавлення між сталлю і міддю зразка 3 показав наявність чіткої границі без включень та інших дефектів. У деяких випадках виявлено взаємопроникнення металу зварного шва і припою (рис. 5а). Проте таке перемішування локальне, не поширюється у глиб зварного шва і в значній мірі не впливає на властивості з'єднання. Інший край мідного припою (рис. 5б) за рахунок високої рідкотекучості та сил поверхневого натягу розтікається на певну відстань по поверхні сталі, тим самим забезпечуючи її додатковий корозійний захист.

Мікроструктурний аналіз зразка 2, тобто виконаного з використанням високолегованого присадного дроту, показав чітку зону переходу між зварним швом та рештою металу, спостерігається значне насичення легувальними елементами шва.

Аналіз мікроструктури зразка 1 показав відсутність різкої зміни структури (границі) в зоні переходу від шва до основного металу. Спостерігалась більш дрібнозерниста структура у порівнянні з зразком 2.

Мікроструктура зварного з'єднання та ЗТВ мають значний вплив на міцність конструкції та стійкість до динамічних навантажень, тому ваговий коефіцієнт був визначений як 0,9.

Наступним показником оцінювання якості D, є герметичність зварних з'єднань. Він важливий при необхідності відокремлення внутрішнього об'єму рамно-оболонкових конструкцій від зовнішнього середовища. Це важливо як для випадків збереження теплової енергії так і для захисту внутрішнього об'єму рамно-оболонкових конструкцій та його вмісту від негативних

факторів зовнішнього середовища. Герметичність досліджувалась методом газової проби. Всі зразки дали задовільний результат. Ваговий коефіцієнт складатиме 0,8.

Ціновий показник Е часто є вирішальним при обранні технології виготовлення, але він нічого не вартий, якщо не досягається надійність зварних з'єднань. Найдорожчим рішенням (на час написання статті) було створення зварного з'єднання з використанням у якості присадного високолегованого дроту 12Х18Н10, а заміна дроту на Св-08Г2С зменшувало собівартість присадних матеріалів на 57%. Додавання мідного припою здорожує виробництво, але у порівнянні з найдорожчим варіантом дає економію у 24%. Ваговий коефіцієнт складатиме 0,6.

Останнім з обраних показників якості F, є стабільність процесу зварювання, який впливає на дефекти зварного шва. Стабільність процесу зварювання в першу чергу характеризує якість формування зварного шва. На зразках другого варіанту спостерігається краще формування валика, що зменшує ризик виникнення дефектів. Процес зварювання за варіантами 1 та 3 не виділявся нічим особливим. Надано цьому показникові ваговий коефіцієнт 0,4.

Результати оцінки варіантів зварювання рамно-оболонкової конструкції за варіантами 1-3 занесені в таблицю 1. Обрано шкалу від 1 до 10, де 10 найбільше значення.

Таблиця 1. Результати оцінювання варіантів зварювання рамно-оболонкової конструкції

Варіант	Корозійна стійкість (1), "А".	Запас міцності (1), "В".	Мікро-структура (0,9), "С".	Герметичність (0,8), "D".	Ціна (0,6), "Е".	Стабільність процесу зварювання (0,4), "F".
1	3	5	10	10	10	7
2	7	8	6	10	3	10
3	10	10	6	10	5	4

[авторська розробка]

Підсумковий вираз комплексного оцінювання якості варіанту зварювання рамно-оболонкової конструкції з використанням методу експертних оцінок має вигляд:

$$O = V_A \cdot B_A + V_B \cdot B_B + \dots + V_F \cdot B_F, \quad (1)$$

де: O – експертна оцінка (значення, яке використовується для співставлення досліджуваних варіантів між собою);

$V_i$  – ваговий коефіцієнт  $i$ -го показника;

$B_i$  – бальна оцінка експертів  $i$ -го показника.

Варіант, отримавши значення експертної оцінки, яке набирає у підсумку за усіма показниками з врахуванням вагових коефіцієнтів максимальну кількість балів, є кращим по сукупності всіх досліджуваних параметрів. Підставивши значення балів оцінки експертів з таблиці 1 в формулу 1 отримуємо значення експертної оцінки: варіант 1 – 33,8 балів, варіант 2 – 34,2 балів, а варіант 3 в свою чергу – 38 балів.

Не зважаючи на більшу ціну нержавіючого дроту варіант 2 обходить варіант 1 по сукупності всіх досліджуваних параметрів. При використанні другого варіанту процесу зварювання збільшується корозійна стійкість ЗТВ та зварного шва. Спостерігається більша стабільність процесу формування зварного шва, що зменшує жолоблення деталі та ризик виникнення дефектів, що в першу чергу вплине на герметичність конструкції. При способі зварювання внапуск, який передбачає розміщення паяльного матеріалу на основі міді між деталями, що зварюються, можна не лише зменшити вартість ремонтно-відновних робіт чи виготовлення, а і підвищити міцнісні характеристики зварних з'єднань.

**Висновки:** Розроблений метод експертних оцінок дозволяє оцінити якість конструкцій, за комплексом показників, які відображають їх технічні, економічні та інші властивості. Його перевага полягає у гнучкості використання та можливості адаптування до різних за призначенням конструкцій або технологічних процесів.

1. *Цыхановский В.К.* Несущая способность комбинированных оболочечных конструкций с учетом развития пластических деформаций / *В.К. Цыхановский, С.М. Козловец, Н.А. Костыра* // Промислове будівництво та інженерні споруди, № 3, 2008. – К.: С. 17 – 21

2. Троценко В.Т. Циклические деформации и усталость металлов. Т. 2. Долговечность металлов с учетом эксплуатационных и технологических факторов [Текст] / В. Т. Троценко, Л. А. Хамаза, В. В. Покровский [и др.] // К. : Наукова думка. 1985. – 222 с.
3. Петров А.В. Коробление кромок при сварке тонколистовых материалов / А.В. Петров, Г.А. Славин // Сварочное производство, 1966, № 5. –С. 18-19.
4. Анохин А.Н. Методы экспертных оценок. Уч. пособие. / А.Н. Анохин // Обнинск: издательство обнинского института атомной энергетики, 1996 г. – 148 с.
5. Бабаков А.А. Коррозионностойкие стали и сплавы / А.А. Бабаков, М.В. Приданцев // М.: Металлургия, 1971. – 319 с.
6. Кортес А.Р. Свака, резка, пайка металлов / А.Р. Кортес // М.: Аделант 2007 – 192 с.
7. Баженов В.А. Метод скінченних елементів у задачах нелінійного деформування тонких та м'яких оболонок / В.А. Баженов, В.К. Цихановський, В.М. Кислоокій // К.: КНУБА, 2000. – 386 с
8. Хансен, Н. Структура двойных сплавов; [пер. с англ.] / Н. Хансен, К. Андерко. – Т. 1, 2. // М.: Металлургиздат, 1962. – 1488 с.

Стаття надійшла до редакції 27.04.2013.