

Методика оцінки відокремлення шлакової корки при наплавленні низько- та середньовуглецевих сталей

Н.М. Стреленко¹ • В.Л.Коваленко¹ • Р.В. Мастенко¹

Received: 23 February 2023 / Revised 17 March 2023 / Accepted: 20 March 2023

Анотація. Показана актуальність використання, при розробленні нових зварювальних матеріалів, методик оцінки віддільності шлакової корки, що характеризуються легкою віддільністю і базуються на термодформаційних процесах в зразку. Розроблений спосіб оцінки відділення шлаку на основі теоретичного розрахунку термодформаційних процесів в основному металі пройшов етапи експериментального дослідження. Експериментальна апробація запропонованої методики оцінки відокремлення шлакового покриття з поверхні наплавлених швів на зразки із сталі Сталь 3сп, 40Х під дослідними флюсами на основі шлакової системи $TiO_2-MnO-SiO_2-MgO-CaO-FeO-Al_2O_3$ дротами 30ХГСА та Св – 08ГІНМА проведена для різних режимів наплавлення. Критерій оцінки високотемпературного відокремлення шлакового покриття враховує: співвідношення геометричних параметрів дослідного зразка, кількість вкладеного тепла в процесі наплавлення та фактор наявності шпінелюутворюючих компонентів на міжфазній границі шлак-метал. Обрані параметри оцінювання відокремлення шлакової корки в балах, де гарантована віддільність шлакового покриття зраховується при самовільній віддільності шлаку при його руйнуванні або самовільній віддільності шлаку монолітним шаром.

Практична цінність запропонованої методики полягає в можливості кількісного оцінювання вірогідності високотемпературного відокремлення шлакового покриття для широкої номенклатури флюсів для наплавлення.

Результати проведених експериментів показують працездатність розробленої методики оцінки високотемпературного відокремлення шлакового покриття з поверхні металу шва.

Ключові слова: шлакова корка, електродугове наплавлення, флюси, методика оцінки високотемпературного відділення шлакової корки, шлакова система, шпінелі.

Вступ

Процеси відділення шлакової корки при наплавленні та зварюванні мають надзвичайно важливу роль. Зумовлено це тим, що наявність шлаку на поверхні металу шва робить неможливим наступне продовження процесу при багатошаровому зварюванні чи наплавленні з частковим перекриттям попереднього шва. Данна технологія широко використовується для відновлення поверхні деталей в таких галузях промисловості, як деталі сільськогосподарських машин, автомобіль-

ного транспорту, пресово-змшувального, машинобудівельного, гірничодобувного обладнання спостерігається збільшення застосування ремонтного наплавлення зношених поверхонь з вуглецевих та низьколегованих сталей.

Весь широкий діапазон факторів, які визначають процес відокремлення шлакової корки з поверхні металу, проявляється саме в хвостовій частині зварювальної ванни на міжфазній границі взаємодії рідкий шлак-метал. Флюс у реакційній зоні зварювання перетворюється в рідкий шлак, який вкриває поверхню металу і може залишатися рідким ще деякий час після того як метал вже затвердів. Відповідно це впливає на формування перехідного шару між металом і шлаком в результаті чого зростає імовірність утворення шпінелей. Отже, з точки зору відділення шлакової корки найбільш важливим наслідком особливостей механізму кристалізації рідкого шлаку є його вплив на віддільність шлакової корки. Існуючі уявлення про хорошу

✉ Н.М. Стреленко
strelenkon@gmail.com

¹ Інститут матеріалознавства та зварювання
ім. Є.О. Патона, Київ, Україна

віддільність шлакової корки пов'язані перш за все з підвищенням різниці коефіцієнта термічного розширення основного металу і шлакової корки при їх охолодженні, а також відсутністю зчеплення між шлаком і поверхнею металу шва.

Проведений аналіз фізико-хімічних особливостей взаємодії шлаку та металу показує, що віддільність шлакової корки залежить від великої кількості взаємопов'язаних факторів: фізико-хімічних властивостей флюсу, режимів зварювання, хімічного складу зварювальних матеріалів та основного металу [1–10]. Для можливості прогнозування віддільності шлакової корки створена нова методика (спосіб) яка ґрунтується на існуючих методиках оцінки відокремлення шлакової корки з поверхні металу шва з урахуванням особливостей умов взаємодії шлаку і металу [11].

Аналіз вихідних даних та постановка проблеми

На даний час не існує комплексної кількісної оцінки відокремлення шлакової корки, що регламентується Держстандартом України. У більшості випадків віддільність шлакової корки, що проставляється у балах, носить суб'єктивний характер і залежить від тієї технологічної проби, яка використовується при заданих технологічних параметрах зразка та режиму зварювання (наплавлення). Це пов'язане з відсутністю класифікації методик (способів) для оцінки відділення шлакової корки з поверхні металу в залежності від фізико-хімічних процесів на границі шлак-метал. Існуючі методики оцінки доцільно розділити на два типи враховуючи фактор високотемпературного відокремлення шлакового покриття (500–600 °С): із утрудненою та легкою віддільністю. Критерієм оцінки способу є характер прикладання зовнішньої сили до зразка із зварним швом для відокремлення шлакової корки. Способи, де зразок із зварним (наплавленим) швом піддається навантаженню згинання, класифікуємо як способи із затрудненим відокремленням. Легке відокремлення шлакової корки характерне для способів, де відбувається самовільне відділення або за умови прикладання до зразка зовнішньої сили короткочасної дії – удару, або на основі термодформаційних процесів.

Основна частина існуючих способів оцінки з легкою віддільністю шлакової корки базується на прикладанні до зразка зовнішньої сили – удару, що не відображає реального впливу режимів зварювання на процес віддільності. Прогнозування відділення шлакової корки від поверхні металу шва слід проводити при врахуванні впливу таких факторів, як: режими зварювання, геометричні параметри зразка, враховуючи при цьому об'єм та умови поширення тепла, розвитку пластичних і пружних деформацій.

В більшості випадків оцінку віддільності шлакового покриття від металу шва проводять візуально за трьох бальною шкалою [1]:

- хороша віддільність: відділення шлакової корки відбувається самовільно;
- задовільна віддільність: шлакова корка повністю відділяється при постукуванні молотком по зразку після наплавлення;
- незадовільна віддільність: шлакова корка міцно зчеплена з металом і відділення можливе лише при використанні зубила і молотка.

На даний час існує значна кількість літературних даних відносно оцінки віддільності шлакової корки отриманих експериментально з використанням різних методик [1–11]. В роботі [5] було запропоновано розділити методики оцінки віддільності шлакової корки на якісну та кількісну. Така класифікація не дає можливості прогнозувати гарантовану віддільність шлакової корки. На основі цього нами встановлена необхідність розділити існуючі методики на два типи: із затрудненою та легкою віддільністю. Критерієм оцінки способу є характер прикладання зовнішньої сили до зразка із зварним швом для відділення шлакової корки. Способи де зразок із зварним (наплавленим) швом піддається навантаженню згинання класифікуємо як способи із затрудненою віддільністю. Легка віддільність шлакової корки характерна для способів де відбувається самовільне відділення та за умови прикладання до зразка зовнішньої сили – удару або на основі термодформаційних процесів.

Способи та методи оцінки затрудненої віддільності шлакової корки

До способів відділення шлакової корки, які характеризуються затрудненою віддільністю слід віднести способи де зразок із зварним (наплавленим) швом піддається навантаженню згинання в поперечному перерізі до осі шва, а критерієм віддільності є кут згину зразка. Найбільш відомим є метод визначення віддільності шлакової корки, що запропонований в роботі [2]. При цьому способі шов виконується в V-подібну розробку (рис. 1, а) так, щоб поверхня шлакової корки на 2–3 мм не досягала верхнього краю розробки. Далі зразок із зварним швом піддається згину на кут ϕ , при якому відбувається відокремлення шлакової корки (рис. 1, б).

Зразок поміщують у машину для прикладання навантаження по осі шва з протилежної його сторони і згинають вздовж лінії виконання процесу зварювання. На думку авторів даного способу пластичні деформації металу шва, що виникають при цьому по лінії сплавлення металу і шлаку, приводять до зсуву металу відносно шлаку. Чим сильніше зчеплення між шлаковою коркою і металом, тим при більшому куті згину відбувається відокремлення шлакової корки. Кількісним параметром віддільності є кут згину зразка, при якому відділилася шлакова корка. Реалізується цей спосіб так: в пластині достатньої товщини виконується заглиблення, глибиною достатньою для того, щоб в нього можливо було наплавити зварний шов таким чином, щоб він разом зі шлаковим покриттям не виходив по

висоті за межі заглиблення. Зразок зі швом і шлаковим покриттям піддається вигину, при якому в покритті з'являються відколи, але оцінку віддільності проводять по куту, при якому відділяється шлак. При реалізації цього способу в ряді випадків спостерігається досить велика дистанція між кутом появи відколів і кутом, при якому шлакове покриття можна вважати таким, що відділилось. При цьому, здебільшого, навіть при максимально можливих кутах вигину не все шлакове покриття відділюється, а тільки деяка його частина, в кожному випадку різна, що не дає можливості об'єктивно судити про віддільність шлаку. При зварюванні мають місце значні кутові деформації вздовж осі шва. Це викликає явище заклинювання шлакового покриття в заглибленні. Таким чином, при визначенні віддільності ефект заклинювання компенсується збільшенням кута вигину пластини. Але частка кута загины, яка компенсує явище заклинювання залишається невідомою. Слід відзначити, що співвідношення сили зчеплення шлакового покриття з металом і сили заклинювання шлаку внаслідок кутової деформації теж невідоме: воно може бути різним в залежності від хімічного складу матеріалів, режиму зварювання. Тобто, в ряді випадків сила, що заклинює шлакове покриття в заглибленні може бути значно більша за силу, яка утримує його на поверхні зварного шва. Таким чином, визначений за наведеним способом показник віддільності шлаку, в результаті може характеризувати не стільки силу зчеплення металу зі шлаком скільки силу заклинювання шлаку в заглибленні внаслідок кутової деформації.

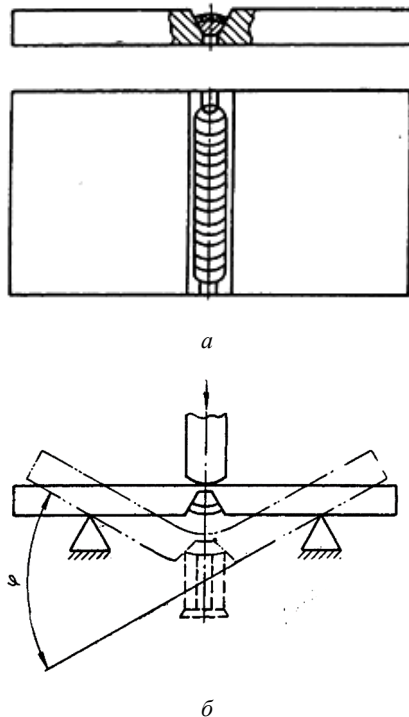


Рис. 1. Зразок із зварним швом (а) та схема його навантаження вздовж осі шва (б) [2]

В роботі [3] викладений спосіб оцінки віддільності шлакового покриття від поверхні металу, аналогом якого є вище зазначений спосіб, при якому зразок з шлаковим покриттям після зварювання піддають випробуванню на кут згины вздовж осі шва. Геометричні параметри зразка відповідають вимогам, де товщина зразка b задається не менше ширини шва c (рис. 2, а), а з протилежного боку від шва в зразку виконують заглиблення півкруглої форми на глибину не менше 10% товщини зразка (рис. 2, б). Глибину провару h виконують не менше 60 % від товщини зразка, а оцінку відокремлення роблять по величині кута ψ , при якому відбувається відокремлення першого фрагменту шлаку.

Виконання зварного шва не в заглиблення, а паралельно йому з протилежної сторони пластини забезпечує таку схему навантаження пластини, при якій саме вздовж поверхні з'єднання шлак - метал розвиваються дотичні напруження, які при деякому куті загины приводять до відокремлення шлаку. Це дозволяє підвищити точність виміру показника віддільності.

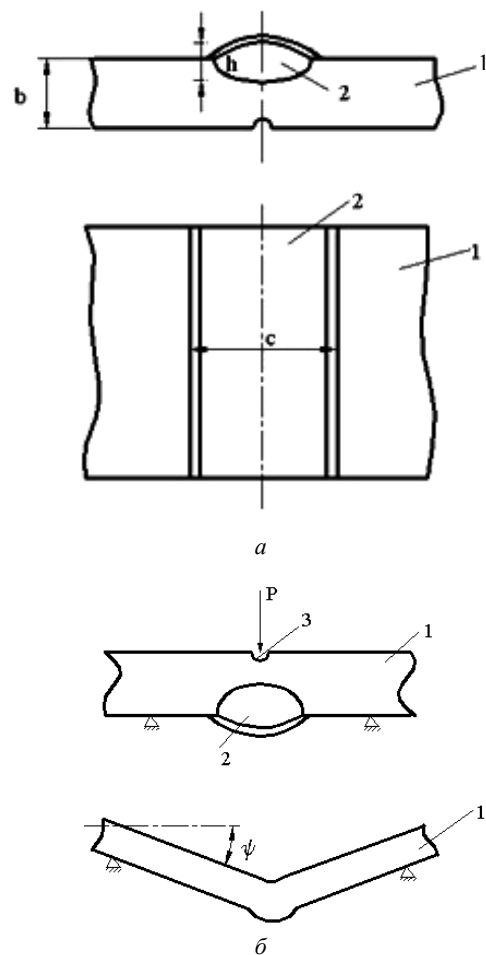


Рис. 2. Зразок у вигляді пластини зі зварним швом (а) та схема навантаження вздовж осі шва з вигином (б), де 1 – зразок у вигляді пластини, 2 – зварний шов, 3 – заглиблення півкруглої форми з протилежної до шва сторони глибиною не менше 10 % товщини пластини [3]

Після виконання контрольного шва і його охолодження в повітрі зразок піддають згинанню. Величина кута загину зразка, при якому відокремлюється перший фрагмент шлаку, служить показником при порівняльних випробуваннях різних зварювальних матеріалів. Даний спосіб може бути застосований для шлаків, які дають затруднену відокремленість, тобто, коли шлак міцно зчеплений з поверхнею металу шва. Інший випадок, коли шлакова корка відокремлюється без особливих зусиль, вимагає інших підходів.

Способи та методи оцінки легкої віддільності шлакової корки

Легка віддільність шлакової корки від поверхні металу шва характерна для способів де відбувається самовільне відділення та за умови прикладання до зразка зовнішньої сили – удару [4] або на основі термомодеформаційних процесів.

Особливість динамічного методу полягає в тому, що зварювання виконується в П-подібну розробку крайок з бічною гранню розробки по дотичній лінії сплавлення металу шва зі шлаковою коркою. Навантаженням служить удар з дозованою енергією. Кількісним показником віддільності в цьому випадку є відношення енергії удару до площі поверхні шва, що звільнилася від шлакової корки. Метод характеризується недостатньою точністю кількісного показника і трудомісткістю виконання.

В роботі [4] напрям прикладання на зразки навантаження удару співпадає з напрямком сил зчеплення шлаку з металом шва, що в основному діють по нормалі до поверхні шва. Це здійснюється за допомогою прибору маятникового типу, а оцінку віддільності проводять по величині енергії, яка витрачається на відділення шлаку.

Удосконаленням цього способу стало введення в розрахункову схему визначення кількісної оцінки віддільності коефіцієнта, який враховує співвідношення площі поверхні шлаку, що залишився на металі при відокремленні шлакового покриття до площі наплавленого валика. Легкою віддільністю шлакового покриття також характеризуються способи, які ґрунтуються на термічних напруженнях при зварюванні.

Такий підхід може бути реалізований за допомогою того, що у процесі охолодження після зварювання (наплавлення) у зразку виникають зсувні деформації на границі шлак - метал за рахунок яких і відбувається відокремлення. Навантаження, якому піддається зразок, виникає виключено за рахунок залишкових пружних деформацій, що виникають у основному металі, тобто у зразку, в результаті впливу термічного циклу, що супроводжує процес наплавлення (зварювання). При цьому пружні деформації, що виникають у металі зразка, повинні трансформуватися у лінійні деформації вигину зразка. Показником віддільності шлакового покриття є довжина зразка на який проводиться наплавлення. В даному способі оцінки відокремлення ширина

зразка задається менше ширини зони пластичних деформацій, які утворюються внаслідок термічного циклу зварювання і призводять до зменшення і навіть відсутності зони пружних деформацій, які є необхідною умовою деформації зразка. В результаті, у деяких випадках, навіть при максимально можливій довжині зразка процес відокремлення не відбувається.

Забезпечення якісного з'єднання при безперервному процесі зварювання під флюсом з частковим перекриттям шва або багат шаровому наплавленні під флюсом потребує створення способу оцінки відокремлення шлакової корки від поверхні металу шва з урахуванням таких факторів процесу зварювання, як: режими зварювання, геометричні параметри зразка, об'єм та умови поширення тепла, розвиток пластичних і пружних деформацій.

Мета роботи

Основною задачею при розробці вдосконаленої методики було не лише наближення до реальних умов виконання зварного шва та підвищення точності виміру показника відокремленості, а створенні наглядної моделі, яка б дала можливість при заданих параметрах прогнозувати можливість відокремлення шлакової корки.

Виникає потреба у визначенні процесу взаємодії шлакової корки з металом зварного шва, створенні розрахункової схеми, яка дозволить прогнозувати гарантовану віддільність шлакової корки, враховуючи при цьому взаємозв'язок параметрів, які впливають на процес відділення. Основною метою роботи є експериментальна апробація розробленої методики оцінки відокремлення шлакової корки, яка враховує термомодеформаційні процеси при наплавленні.

Матеріали та методи дослідження

Спосіб оцінки відокремлення шлакової корки від поверхні металу шва полягає в проведенні наплавлення зварювальними матеріалами, що досліджують, на зразок у вигляді пластини. В корисній моделі [12] новим є те, що перед наплавленням визначають співвідношення товщини і ширини зразка, яке забезпечує зміну величини його деформації, враховуючи енергетичні параметри режиму зварювання, умови розповсюдження тепла та розвитку пластичних і пружних деформацій, яке забезпечує максимальну величину його деформації при заданій довжині. Критерієм відділення є довжина зразка, при якій відбувається гарантована самовільна віддільність шлакового покриття.

Перед наплавленням визначають співвідношення товщини і ширини зразка, враховуючи енергетичні параметри режиму зварювання [13, 14], умови розповсюдження тепла, розвитку пластичних і пружних деформацій, яке забезпечує максимальну величину його

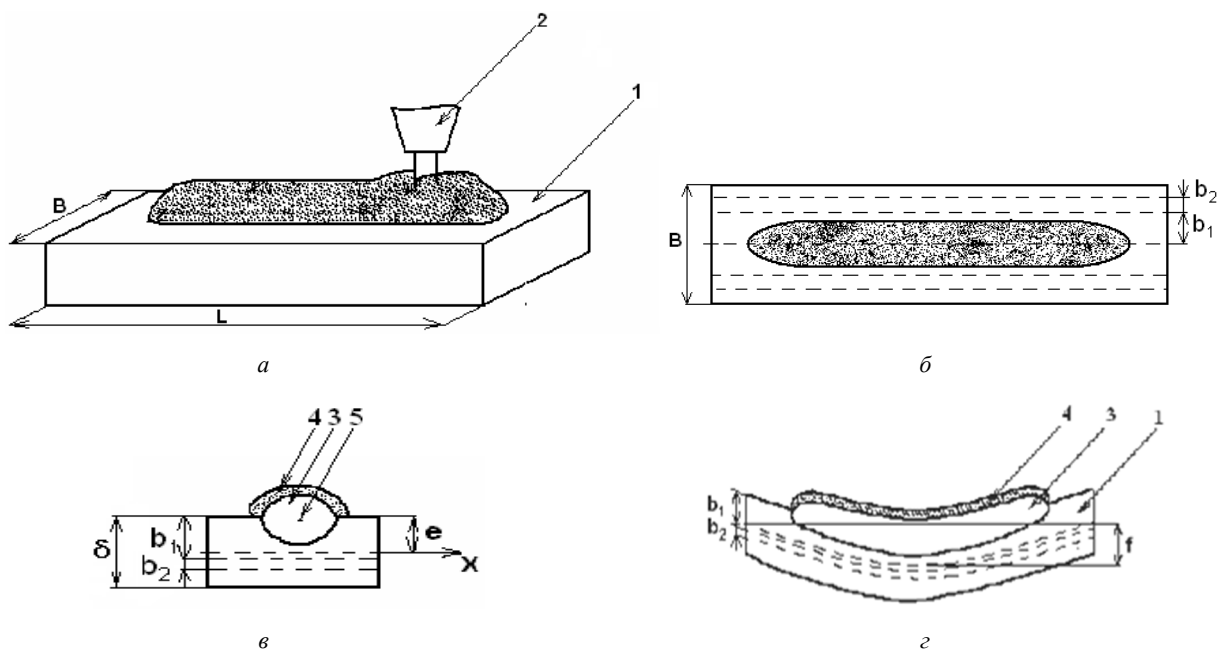


Рис. 3. Дослідний зразок у вигляді пластини в процесі зварювання (а), вигляд пластини зверху (б), поперечний переріз пластини із зварним швом та шлаковою коркою (в) та пластини із швом та шлаковою коркою після зварювання та деформації (г), де: 1 – пластини, 2 – зварювальна головка, 3 – зварний шов, 4 – шлакова корка, 5 – точка дії усадочної сили; δ – товщина пластини, e – відстань від точки дії усадочної сили до центра ваги поперечного перерізу пластини, B – ширина пластини, L – довжина пластини, b_1 – ширина зони пластичних деформацій скорочення на стадії нагріву, b_2 – ширина зони пружно-пластичних деформацій скорочення на стадії нагріву, f – величина вигину поздовжньої осі пластини

деформації при заданій довжині. Наплавлення для отримання вигину поздовжньої осі пластини виконують у вільному стані. При заданому режимі зварювання і довжині зразка визначають співвідношення розмірів товщини і ширини зразка, яке забезпечує його максимальну деформацію. Для цього на основі розрахункового методу визначають ширину зони пластичних деформацій:

$$b_{II} = b_1 + b_2 \quad (1)$$

де b_1 – це ширина зони тільки пластичних деформацій скорочення на стадії нагрівання, що визначається за формулою:

$$b_1 = \frac{0.484U \cdot I \cdot \eta}{2\delta v_{зв} \cdot T_{**} \cdot c_p} \quad (2)$$

де U – напруга на дузі, В; $I_{зв}$ – струм, А; $v_{зв}$ – швидкість зварювання, м/с; η – коефіцієнт корисної дії дуги; c_p – об’ємна теплоємність Дж/см³·°С; T_{**} – температура, при якій метал втратив пружні властивості (для конструкційних сталей $T_{**} = 600^\circ\text{C}$); δ – товщина пластини, мм.

b_2 – це ширина зони пружно-пластичних деформацій скорочення на стадії нагрівання:

$$b_2 = k_2 (B - b_1) \quad (3)$$

де B – ширина пластини; k_2 – це коефіцієнт, який залежить від σ_T і питомої енергії нагріву q_o (Дж/мм²):

$$k_2 = \left(3.218 \cdot 10^{-8} q_o^3 - 1.579 \cdot 10^{-5} q_o^2 + 3.153 \cdot 10^{-3} q_o + 0.36 \right) \frac{240}{\sigma_T} \quad (4)$$

Далі розраховують максимальну деформацію зразка, що визначається як величина вигину пластини:

$$f = \frac{M_{зв} \cdot L^2}{8EJ_x} \quad (5)$$

де E – модуль пружності, Па; момент від зварювання $M_{зв} = P_{yc} \cdot e$ (де e – відстань від точки прикладання усадочної сили до центра ваги поперечного перерізу пластини); P_{yc} – усадочна сила, Н:

$$P_{yc} = \sigma_p \cdot F \quad (6)$$

$$\sigma_p = -\sigma_T \frac{F_a}{F - F_a} \quad (7)$$

площа поперечного перерізу зони пластичних деформацій:

$$F_a = 2b_{II} \cdot \delta \quad (8)$$

Момент інерції поперечного перерізу відносно осі X:

$$J = \frac{\delta^3 \cdot B}{12} \quad (9)$$

Пластина з певним співвідношенням розмірів товщини і ширини та заданою довжиною в процесі наплавлення та охолодження зазнає вигину поздовжньої осі, і в результаті відбувається або не відбувається відокремлення шлакової корки. Проведені розрахунки та аналіз впливу таких факторів на відокремлення шлакової корки, як: режими зварювання, геометричні параметри зразка, умови розповсюдження тепла та розвитку пластичних і пружних деформацій, дають можливість пояснити деякі загальноприйняті уявлення.

Існуючі уявлення про вплив режиму зварювання на відокремлення шлакової корки полягають в зменшенні погонної енергії, що розплавляє флюс, на одиницю довжини шва та зменшенні часу перебування металу шва та шлаку в зоні високих температур, при яких протікають окислювально-відновлювальні реакції, завдяки зниженню напруги на дузі та збільшенню швидкості [1, 3]. Для таких режимів (табл. 1) на основі нашого методу проведені розрахунки та аналіз, який показав, що зменшення напруги і збільшення швидкості зварювання [6, 7] призводить до зменшення розміру зони пластичних деформацій і значного збільшення зони пружно-пластичних деформацій.

Таблиця 1. Залежність відокремлення шлакової корки від питомої енергії зварювання [11, 13, 14]

№ експерименту	$I_{зв}$, А	$U_{д}$, В	$V_{зв}$, м/год	Віддільність шлакової корки
1	750	36	20	погана
2	750	30	20	задовільна
3	750	25	20	добра
4	750	30	30	добра
5	750	30	40	добра

Збільшення останньої призводить до більш значної усадки основного металу і, як наслідок, покращення віддільності. Це пояснює самочинне відділення шлакової корки при невеликих швах на товстих деталях. Запропонована розрахункова схема оцінки відокремлення шлакової корки від поверхні металу шва дає можливість визначити максимальну деформацію зразка, при якій можливе відокремлення.

Наступним важливим фактором, що впливає на вигин пластини і, як наслідок, на процес відокремлення шлакової корки, є довжина зразка. При цьому важливо врахувати оптимальне співвідношення інших геометричних розмірів пластини (товщини та ширини).

Результати експериментального випробування розробленої методики та їх обговорення

Запропонована нами розрахункова схема оцінки відокремлення шлакової корки від поверхні металу шва дозволяє визначити величину деформації зразка, при якій відбувається відокремлення шлакового покриття з металу шва.

З метою апробації розрахункової методики оцінки відокремлення проведено наплавлення зразків із сталі Сталь 3сп та 40Х під флюсами АН-348А та АН-47, дослідними флюсами (ДФК-1, ДФК-2) на основі шлакової системи $TiO_2-MnO-SiO_2-MgO-CaO-FeO-Al_2O_3$ дротами 30ХГСА, Св – 08Г1НМА діаметром 3 мм при різних режимах наплавлення на оберненій полярності із застосуванням джерела живлення ВДУ 506 на установці УД-209.

Перед наплавленням для кожного режиму встановлюється співвідношення товщини і ширини зразка, яке забезпечує максимальну деформацію при заданій довжині пластини. Параметри оцінювання високотемпературної віддільності оснований на визначення необхідних засобів для відокремлення шлакової корки (табл. 2).

На основі запропонованої розрахункової схеми проведено визначення необхідного співвідношення товщини і ширини зразка (δ/B) для вибраних діаметрів зварювальних дротів в залежності від енергетичних параметрів режиму наплавлення.

Розроблена методика, що враховує термодинамічні процеси при наплавленні, оцінює не лише віддільність при забезпеченні максимальної деформації зразка, а і металургійний вплив шлаку на процес відокремлення. Особливо це є важливим саме при високотемпературній віддільності, що може характеризуватися наявністю шпінелей. Наявність червоного світіння поверхні шлакового покриття свідчить про високотемпературну віддільність, але при розробці нових зварювальних матеріалів особливу роль має співвідношення компонентів металевої та шлакової фази, тобто хімічні реакції на границі шлак-метал, в результаті яких і утворюються з'єднання, що називаються "шпінелями" які є комплексними з'єднаннями оксидів та *d*-перехідних металів. Відповідно до запропонованої методики нами були проведені дослідження при використанні флюсів загального призначення, а також спеціально виготовлених агломерованих флюсів на основі оксидів титану, кремнію, магнію, алюмінію, марганцю, заліза при різному співвідношенні оксидів титану та магнію. Саме ці оксиди, згідно літературних даних, впливають на процес відділення шлаку з металу зварного шва. Проведені експерименти показали, що є прямий зв'язок між вигином зразка (рис. 4.) та віддільністю шлаку з металу шва. На нашу думку це пояснюється впливом комплексних з'єднань (шпінелей), які утворюються на границі шлак-метал. Результати проведених експериментів (табл. 3 та рис. 4.) показують працездат-

Таблиця 2. Параметри оцінювання відокремлення шлакової корки в балах

Відокремлення шлаку, бали	0	1	2	3	4	5
Відокремлення шлаку, оцінка	незадовільно	достатньо	задовільно	добре	дуже добре	відмінно
Характеристика оцінювання відокремлення шлакової корки	відсутність відокремлення при застосуванні удару по шлаку	часткове відокремлення при застосуванні удару по шлаку	часткове відокремлення при прикладанні зовнішнього зусилля до зразка	відокремлення великими ділянками при прикладанні зовнішнього зусилля до зразка	часткове самовільне відокремлення шлаку	самовільне відокремлення шлаку монолітним шаром
Використаний тип інструменту	ударний (молоток, зубило)	ударний (молоток, зубило)	пасивний (плоска викрутка)	пасивний (плоска викрутка)	–	–
Конфігурація відокремленої шлакової корки	дрібні осколки	дрібні секції	дрібні секції	довгі, монолітні секції	дрібні секції	довгі, монолітні секції

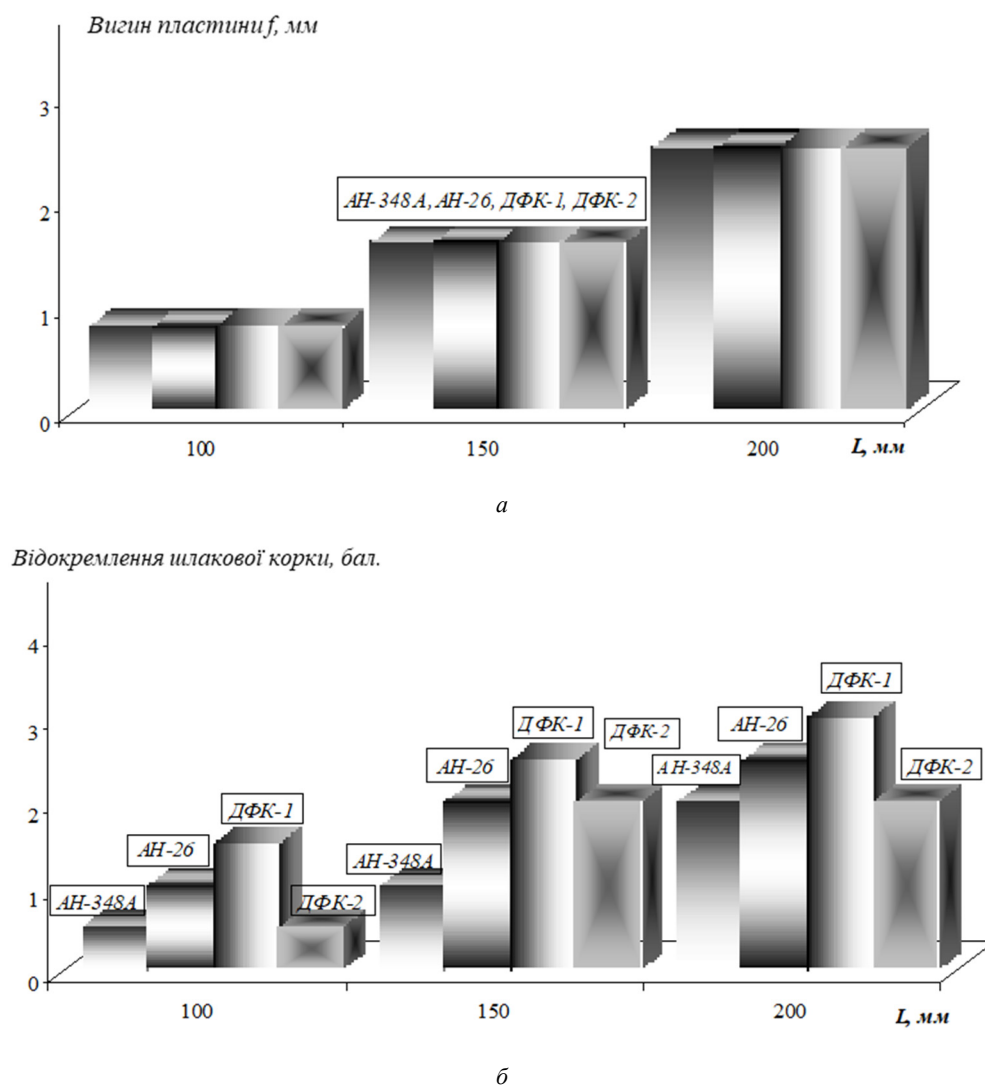


Рис. 4. Залежність розрахункового вигину пластини (а) та відокремлення шлакової корки при застосуванні різних флюсів (б)

Таблиця 3. Залежність відокремлення шлакової корки від питомої енергії зварювання та довжини дослідного зразка на основі критеріїв оцінювання в балах згідно табл. 2

№ дослідю	I, A	U, B	$V_{зв}, м/год$	Дріт	Флюс	δ/B	Бали	L, мм	Відокремлення шлакової корки
1.1	220–230	26	32	30ХГСА	АН-348А	0,05	0	100	незадовільне
1.2							1	150	достатнє
1.3							3	200	добре
2.1	225–240	28	32	30ХГСА	АН-47	0,05	1	100	достатнє
2.2							2	150	задовільне
2.3							4	200	дуже добре
3.1	210–220	28–30	32	30ХГСА	ДФК-2	0,05	2	100	задовільне
3.2							2	150	задовільне
3.3							3	200	добре
4.1	210–220	28–30	32	30ХГСА	ДФК-3	0,05	1	100	достатнє
4.2							2	150	задовільне
4.3							3	200	добре
5.1	220–215	26	32	Св–08Г1НМА	АН-348А	0,1	0	100	незадовільне
5.2							2	150	задовільне
5.3							4	200	дуже добре
6.1	220–230	27	32	Св–08Г1НМА	АН-47	0,1	2	100	задовільне
6.2							3	150	добре
6.3							4	200	дуже добре
7.1	225–230	34	32	Св–08Г1НМА	ДФК-2	0,1	3	100	добре
7.2							5	150	відмінне
7.3							5	200	відмінне
8.1	240–245	32	32	Св–08Г1НМА	ДФК-3	0,1	3	100	добре
8.2							5	150	відмінне
8.3							5	200	відмінне

ність та кореляцію деформації зразка відповідно його довжини та можливість використання розробленої методики для різноманітних зварювальних матеріалів при зміні режимів наплавлення [13, 14].

Результати досліджень показують, що розроблена методика дозволяє визначити залежність вмісту компонентів у матеріалах шлаку та дроту на процес відділення шлакового покриття з поверхні металу шва.

В більшості дослідів отримали добре, дуже добре, достатнє та задовільне відокремлення шлакового покриття для флюсів АН-348А і АН-47 та відмінне, дуже добре, добре і задовільне відокремлення для ДФК-1 і ДФК-2 (табл. 3), що може бути пояснене особливістю механізму утворення шпінелей на поверхні металу наплавленого шва.

Встановлено, що відсутність самовільного відокремлення шлакового покриття особливо при підвищених температурах пов'язана з наявністю шпінелей на міжфазній границі шлак-метал, навіть при оптимальних умовах: значної різниці коефіцієнтів термічного розширення металу та шлаку, термодформації основного металу. Виходячи з цього, стає актуальною ідея регульованої зміни активності учасників реакцій на

границі шлак-метал, яка має мінімізувати процес утворення хімічних з'єднань на міжфазній границі.

Висновки

На основі проведеного аналізу існуючих способів оцінки віддільності шлакової корки при електродуговому зварюванні та наплавленні запропоновано розділення способів оцінки на два типи: із затрудненою та легкою віддільністю.

При розробленні нових зварювальних матеріалів найбільш актуальним є використання способів відокремлення шлакової корки, що характеризуються легкою віддільністю. Основна частина існуючих способів оцінки з легкою віддільністю шлакової корки базується на прикладанні до зразка зовнішньої сили – удару, що не відображає реального впливу дермодформаційних процесів в основному металі.

Розроблений спосіб оцінки відокремлення шлаку при електродуговому зварюванні/наплавленні під флюсом на основі теоретичного розрахунку термодформаційних процесів в основному металі, який враховує геометричні параметри технологічного зразка.

Визначений критерій оцінки відокремлення шлакової корки на основі теоретичного розрахунку, що враховує термодформаційні процеси, які виникають внаслідок тепловкладення в основний метал при електродуговому зварюванні/наплавленні з точки зору умов розповсюдження тепла, розвитку пластичних і пружних деформацій у зразку. Теоретичний розрахунок проводиться при врахуванні впливу таких факторів, як: режими зварювання та геометричні параметри зразка.

Встановлено, що на процес відокремлення шлако-

кової корки для флюсів системи $SiO_2-TiO_2-Al_2O_3-MnO-MgO-CaO-CaF_2$, впливає: наявність на границі шлак-метал комплексних з'єднань – шпінелей, які утримують шлак, фізичне зчеплення металу та шлаку, різниця коефіцієнтів термічного розширення металу та шлаку і термодформаційні процеси у металі шва. Розроблена методика дозволяє отримати дані по відокремленню шлакової корки з поверхні зварного шва в умовах самовільної віддільності.

References

- [1] S.B. Yakobashvili, *Surface properties of welding fluxes and slags*, Kyiv: Tehnika, 1970.
- [2] A. Shono, D.S. Kasov and V.M. Karpenko, "Evaluation of slag systems of flux-cored wire according to separability of slag crust", *Avtomaticheskaya svarka*, vol. 3, pp. 22–24, 1976.
- [3] V.N. Kopersak, A.M. Slivinskij and V.T. Kotik, "Method for assessing the slag coating", UA Patent 66003A, 15.04.2004.
- [4] V.N. Kopersak, A.M. Slivinskij and V.T. Kotik, "Method for assessing the slag coating", UA Patent 66004A, 15.04.2004.
- [4] A.G. Grin and A.A. Boguckij, "Method of separation of the slag crust", *Avtomaticheskaya svarka*, vol. 3, pp. 58–59, 1996.
- [5] V.E. Sokolskij, A.S. Roik and V.P. Kazimirov, "Influence of zirconium dioxide on the properties of slag during arc surfacing with low-alloyed flux-cored wire AN-348A", *Avtomaticheskakaya svarka*, vol. 37, pp. 24–29, 2008.
- [6] S.I. Moraveckij, "Separability of the slag crust in arc welding. Part 1: Mechanism of chemical adhesion of slag to weld metal", *Avtomaticheskaya svarka*, vol. 1, pp. 32–36, 2011.
- [7] S.I. Moraveckij, "Separability of the slag crust in arc welding. Part 2: The nature of the influence of the main factors on the separability of the slag crust", *Avtomaticheskaya svarka*, vol. 2, pp. 22–26, 2011.
- [8] Lochan Sharma, Rahul Chhibber, "Study of weld bead chemical, microhardness & microstructural analysis using submerged arc welding fluxes for linepipe steel applications", *Ceramics International*, vol. 46, 2020. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.06.250
- [9] Aman Singh, R.P. Singh, "A review of effect of welding parameters on the mechanical properties of weld in submerged arc welding process", *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, part 2, pp. 1714–1717, 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.361
- [10] L.A. Zhdanov *et al.*, "Physico-chemical features of the separation of slag crust from the surface of the weld metal and the methodological basis of evaluation methods", *Tehnologicheskie sistemy*, vol. 1, pp. 109–115, 2010.
- [11] L. Zhdanov *et al.*, "Method of evaluation of slag crust separation", UA Patent 40496, 04.2009.
- [12] L.A. Zhdanov, V.L. Kovalenko, N.M. Strelenko, and E.P. Chvertkon, "Peculiarities of thermal dissociation of oxides during submerged arc welding", *Soldagem & Inspecao*, vol. 18, pp. 314–321, 2013.
- [13] V.L. Kovalenko, R.V. Mastenko, N.M. Strelenko and K.O. Zvorikin. "Improvement of the criterion for assessing the stability of the existence of an arc discharge on direct current" *Tehnologicheskie sistemy*. vol. 80, pp. 56–58, 2017.

Methodology for evaluation of slag crust separation during surfacing of low- and medium-carbon steels

N. M. Strelenko, V. L. Kovalenko, R. V. Mastenko

E.O. Paton Institute of Materials Science and Welding

Abstract. The relevance of using slag crust separation methods, which are characterized by easy separation and are based on thermo-deformation processes in the sample, is shown in the development of new welding materials. The developed method of assessing slag separation based on the theoretical calculation of thermo-deformation processes in the base metal has passed the stages of experimental research. The experimental approbation of the proposed methodology for assessing the separation of the slag coating from the surface of welded joints under experimental fluxes based on the $TiO_2-MnO-SiO_2-MgO-CaO-FeO-Al_2O_3$ slag system was carried out for different welding regimes. The evaluation criterion for the high-temperature separation of the slag coating takes into account: the ratio of the geometric parameters of the test sample, the amount of heat input during the surfacing process, and the factor of the presence of spinel-forming components at the slag-metal interface. The selected parameters for evaluating the separation of the slag crust in points, where the guaranteed separation of the slag coating is counted for the arbitrary separation of the slag during its destruction or the arbitrary separation of the slag by a monolithic layer. The practical value of the proposed method lies in the possibility of quantitative assessment of the probability of high-temperature separation of the slag coating for a wide range of fluxes for surfacing. The results of the conducted experiments show the efficiency of the developed methodology for evaluating the high-temperature separation of the slag coating from the surface of the weld metal.

Keywords: slag crust, electric arc surfacing, fluxes, evaluation method of high-temperature separation of slag crust, slag system, spinels.