

10.31653/smf46.2023. 17-32

Богомолов Е.П.; Опарін А.В.; Смажило Б.В.

Одеський національний морський університет

## **РОЗВИТОК ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНОГО СИНТЕЗУ ЩО САМОПОШИРЮЄТЬСЯ, ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ЗНОШЕНИХ МЕХАНІЗМІВ**

В цієї статті проведено обґрунтування теоретичних і практичних досліджень використання термітного способу утворення металів з метою зменшення енергетичних і технологічних затрат та коштовних матеріалів.

У техніці прийнято називати термітами порошкоподібні суміші металів з оксидами металів, при згорянні яких виділяється велика кількість тепла та досягається висока температура нагріву, що утворюється на основі взаємо заміщення розплавленого металу. Тип реакції за якою відбувається виділення великої кількості теплоти має назву екзотермічна.

Основне призначення термітів при їх розробці є виробництво металів за рахунок перебігу реакцій, внаслідок яких з оксидів виділяється необхідний метал.

У технічній літературі висвітлено застосування екзотермічного відтворення металів при :

а) виробництві великогабаритних деталей, що складаються з декількох елементів: колінчастих валів, рульових рам суден, приварювання лопотів до гребних валів суден тощо;

б) відновлення циліндрів пресів, поршневих штоків, колон ковальських пресів, роторних валів, валків, а також провідних реверсивних шестерень прокатних станів, всіляких станин-клітин прокатних станів, станин пресів і головних станин кувально-висадкових машин тощо;

в) утворенні на діючих газопроводах, для запобігання їх від руйнування ґрунтовою корозією електро-дренажного захисту – виконується зварювання сталевих стрижнів, які підключаються до джерел постійного струму. Сталеві стрижні приварюють лише термітом.

д) зварюванні залізничних рейок методом проміжного лиття. Відомий (GB, патент 1223977, опубл. 01.04.1971) алюмінотермітна реакційна суміш, що містить у стехіометричному співвідношенні оксиди заліза у вигляді промислових відходів металів, сталевий наповнювач, при цьому для скорочення часу реакції, суміш містить оксид заліза та оксиди інших металів у вигляді пудри.

Для протікання екзотермічної реакції необхідно застосування металів з великою теплою утворення оксидів, наприклад алюмінію, титану, кремнію та ін. Джерелом кисню при проходженні екзотермічної реакції є оксиди металів з низькою теплою утворення, такі як оксиди заліза, марганцю та ін.

Процес проходження екзотермічної реакції можливий при нагріванні термітної суміші до температури горіння. Реакція, що почалася, протікає швидко і проходить по всьому об'єму суміші, незалежно від точки її нагрівання. На час згоряння термітної суміші впливає грануляція частинок, що взаємодіють, їх питома поверхня. Чим менше частинки, що становлять термітну суміш, тим швидше закінчується процес їхньої взаємодії. Насправді термітний склад складається з частинок до 1 мм. Протікання екзотермічної реакції можливе при певному співвідношенні складових суміш компонентів. В процесі згоряння термітної суміші виникає реакція відновлення а на швидкість процесу впливає не тільки грануляція компонентів і їх густина, а також тиск газової фази.

Зазвичай метало термічні процеси мають високу швидкість протікання, тому можна припустити, що вони проходять в умовах, близьких до адіабатичних. Але в такому випадку всі компоненти шихти повинні бути однакової фракції і чисті, без шкідливих домішок. Але на практиці, термічна реакція відбувається з викидом шлаків в результаті теплового удару, що може привести до непередбачених обставин. Складність синтезу металу з його оксидів полягає в тому, що екзотермічна реакція згоряння шихти(суміші) може утворити ударну хвилю розплавленого шлаку з тиском до 6 атм. при температурі до 3000°C, і розрізати захисну частину тигля, в якому відбувається екзотермічна реакція. Геометрія фронту горіння шихти повинна забезпечити безпеку процесу. Для виконання такого завдання, використовуючи відновлення фторидів металів, кальцієм або іншими відновниками шляхом взаємного погашення спрямованої енергії, можна запобігти виникненню реактивного розплавленого струменя шлаку, перпендикулярного фронту горіння.

Для виявлення джерела газової фази при згорянні залізо-алюмінієвого терміту і розробки методики запобіганню викидів металу при згорянні існують декілька досліджень російських авторів В.В. Яценко, А.П. Амосова і А.Р. Самборук [3]. Автори роботи провели термодинамічне дослідження горіння термітної суміші яка гранульована на базі піроксиліну. Головне питання стосується до розбі-

жності температури згоряння сумішей на базі  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , де вона вище ніж на базі  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  і  $\text{FeO}$ . Метою рішення для авторів стало дослідження впливу температури реакції і методики керування процесом, для зменшення реактивної енергії розплавленого шлаку.

Для визначення температури реакції при сталому значенні тиску використовують відношення:

$$Q_p = \Delta H = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (1)$$

Де  $Q_p$  – тепловий ефект реакції;

$\Delta H$  – зміна ентальпії системи;

$C_p$  – ізобарна теплоємність продукту реакції;

$T_1$  і  $T_2$  – відповідно початкова і кінцева температура продукту реакції,

Прийнявши  $T_1 = 298,15$  К провели розрахунок  $T_2$ , яке й буде дорівнювати адіабатичної температури реакції.

Але тут не врахована кількість теплоти яка витрачена на фазові переходи при плавленні і випаруванні. Також не врахована зміна теплоємностей продуктів реакції при зміні температури, тому температурну залежність ізобарній теплоємності речовини, можна розрахувати за формулою:

$$C_p = \sum_{\substack{j=-2 \\ j \neq -1}}^3 b_j T^j \quad (2)$$

де  $b_j$  – коефіцієнти, які визначають експериментально,

$T$  – температура речовини яка утворилася.

Оглянувши роботу доктора технічних наук Власова Анатолія Федоровича, котрий у своїй дисертації «Развитие научных и технологических основ повышения эффективности применения экзотермических смесей при электродуговой сварке и электрошлаковых процессах»[1] . Провів дослідження з використанням технології екзотермічного відновлення металу і отримав методику подальшого розвитку наукової основи застосування екзотермічної суміші, як енергозберігаючого джерела в електродних покриттях і у флюсах при електрошлакових процесах. Ця методика дозволяє найбільш ефективно використовувати додаткове тепло (до 25% від теплоти, що витрачається на плавлення електроду) і відновленого металу (20-25%

від маси окалини в покритті електродів), що виділяються при протіканні екзотермічної реакції і яке призвело до збільшення масової швидкості плавлення покриття електродів на 30-35% і підвищення продуктивності ручного дугового зварювання в 1,3-1,7 рази. З використанням методу математичного моделювання запропоновані склади флюсів з екзотермічною сумішшю стосовно електрошлакового переплаву сталей 35, 9ХФ, 60Х2СМФ і 9Х2МФ, що містять залізну окалину, алюмінієвий порошок і легуючий елемент, які забезпечать: додаткове легування та збільшення виходу придатного металу на 2-10% за рахунок відновленого металу та усунення часткових втрат застосованого електрода, та отримувати метал, що відповідає хіміко-фізичним та механічним властивостям марочного материнського складу даної сталі.

Іншим прикладом з використанням СВС (само розповсюджений високотемпературний синтез) технологій є розробка авторів проекту А. П. Мухачов, Є. А. Харитоновна (Дніпродзержинський державний технічний університет). У своїй роботі авторами проведено аналіз областей застосування рідкісноземельних металів (РЗМ) для отримання високоміцного чавуну та конструкційних сталей. Розроблено фізико-хімічні основи промислової технології та обладнання для отримання сплавів РЗМ на основі СВС-процесу методом позапічної металотермії [8].

Метою їх роботи є дослідження процесу одержання сплавів РЗМ із залізом, нікелем та алюмінієм методом СВС. Отримати високий питомий тепловий ефект екзотермічної реакції, який дозволив би повністю розплавити металічну (Тпл 1300 К) і шлакову (Тпл 1800 К) фази і перегріти систему мінімум на 300оС для забезпечення достатнього часу відстоювання розплавлених сплаву та шлаку з метою їх повного розділення, яке досягається за рахунок значної різниці у питомих терезах;

- забезпечити в процесі реакції утворення сплаву або інтерметалевої сполуки;

- забезпечити безпечну та оптимальну швидкість горіння шихти, щоб не допустити її викиду внаслідок теплового удару.

В ході відновлювальних плавок суміші фторидів РЗМ легкої групи (церій, лантан, неодим, празеодим) з фторидами алюмінію та нікелю, було отримано компактні виливки потрібного сплаву РЗМ-Al-Ni з рівномірним розподілом компонентів. Сплав може бути використаний для отримання виробів із високоміцного чавуну.

Вага злитків коливалася в межах 10-11,5 кг, вага шлаку змінювався в межах 25,0-27,0 кг. З використанням результатів експериментів було розроблено технологічну схему отримання багатоконпонентних сплавів РЗМ.

Аналізуючи публікації, де висвітлено застосування технології СВС, можна зробити висновок, що цей спосіб є перспективним і раціональним для застосування у виробництві судноремонту при виконанні робіт пов'язаних з відновленні геометрії деталі в пошкодженій конструкції, а також зміцнення відновленої поверхні деталей машин і механізмів. Прикладом з відновлення дефектів виливки є наукова праця Кувшиникової Н.Н., яка сформувала можливість усунення поверхневих дефектів сталевого лиття типу відкритих раковин, об'ємом  $(10...25) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$  шляхом екзотермічного наплавлення за допомогою термітної шихти, укладеною у форму, що встановлюється на поверхні оброблюваної деталі. Метою поставленого завдання була розробка технології екзотермічного заварювання малих дефектів та оснащення для його здійснення [4].

Принцип отримання термітного металу досить простий, мобільний і набагато дешевше, ніж при стандартних методах синтезу металу. Тому застосувавши технологію СВС для генерації металу зі складів термітних сумішей, що протікає без впровадження енергоємних технологій, дозволить нам економити витрати на електроенергію та дефіцитні матеріали. Склад термітних сумішей повинен бути підібраний таким чином, щоб кінцевий продукт синтезу був максимально близький за хімічним складом з материнським металом і мав ті ж механічні властивості, а можливо навіть перевершував їх. Розглянувши склади термітних сумішей, це суміші, що застосовуються для легування металу, задіяних у тих чи інших процесах отримання сплавів, можна підібрати необхідний склад для без енергоємного отримання шару наплавленого металу з необхідними механічними та фізичними характеристиками.

Метод отримання заданого складу сплаву на поверхні дефектного металу складається з кількох етапів. По-перше, необхідно сформувати реактор з вогнетривкого матеріалу, де проходитиме реакція СВС відновлення металу. Межа реактора повинна повторювати поверхню деталі для запобігання протіканню розплаву для збереження необхідного обсягу синтезованого сплаву. Цього можна досягти, якщо застосувати напіввідку суміш, що герметизує, виготовлену з діатоміту шлакової вати, вермикуліту і вогнетривкої хромомagneзи-

тової обмазки, здатної витримати температуру 2700оС. Товщина стінок тигелю-реактора, повинні бути не менше 10 мм. Потім завантажують у реактор ущільнену термітну суміш відповідної кількості і в газовому середовищі проводять локальне ініціювання процесу (запалювання). Або застосовуються щільно запаковані стрижні, шашки або таблетки. Все залежить від геометрії дефектної деталі та обсягу пошкоджень. Запал суміші призводить до екзотермічної реакції та мимовільного поширення хвилі горіння, що охоплює всю суміш, завершення реакції та охолодження синтезованого продукту горіння. Однією з переваг процесу СВС є ефект самоочищення - термодесорбція летючих домішок при температурі синтезу. Тому якість шару наплавленого сплаву, що вийшов, може бути чистішим, ніж материнський сплав.

У цій статті спробуємо обґрунтувати можливості застосування СВС наплавлення при ремонті дефектів у вигляді тріщин, дрібних отворів, геометричної не відповідності в деталях, виготовлених з ковкого ливарного чавуну, а також поверхневого зміцнення контактних пар деталей для поліпшення захисних, антифрикційних, стійких до стирання поверхонь т.п. недоліків. Умови протікання дифузії елементів при екзотермічному зміцненні значно відрізняються від нагріву ТВЧ, тому необхідно дотримуватись оптимального співвідношення компонентів, визначених експериментальним шляхом. Необхідно буде визначати товщину шару та рівномірність розподілу дифузійно-активної речовини на поверхні деталі.

Також потрібно застосувати сполучну речовину, яка повинна забезпечувати гарний розподіл та міцне закріплення компонентів дифузійно-активної суміші на поверхні деталі. Компоненти повинні знаходитись у досить близькому контакті з поверхнею деталі для повноти здійснення реакції.

Для вирішення цих завдань необхідно підібрати склад суміші, компоненти якої повинні мати дрібнодисперсну фракцію, а їх кількість і хімічний склад відповідно до марки металу деталі і виконати ряд розрахунків, для визначення їх пайової кількості, і необхідної температури реакції процесу.

Пошкодження поверхні, такі як тріщин, сколи чи абразивне стирання в деталях мають різну форму, глибину і обсяг порожнини представляють додаткові складності для розрахунку розмірів форми реактора як тигель. Оскільки форма поверхневого дефекту може мати різний контур за розмірами, то в такому випадку внутрішня по-

рожнина форми – тигеля в якому синтезуватиметься розплав, який заповнить поверхню дефекту, необхідно робити циліндричною, а внутрішній розмір рівним діаметру кола який межує з контуром дефекту. Висоту форми - тигеля можна визначити за формулою:

$$H = \frac{\rho_{\text{Ме}}^2 \cdot V_{\text{деф}}}{\pi \cdot R^2 \cdot n \cdot \rho_{\text{С}}} \cdot 100, \text{ м}, (3)$$

де  $R$  – радіус кола, описаного навколо контуру дефекту, м;

$\rho_{\text{Ме}}$  - питома густина придатного металу, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{СМ}}$  - питома густина суміші термітної шихти, кг/м<sup>3</sup>;

$n$  – вихід металу із термітної суміші 0,6 $\rho_{\text{СМ}}$ , кг.

При поверхневому зміцненні екзотермічний склад повинен відповідати таким основним вимогам:

- він повинен забезпечувати температуру нагрівання деталі від 600 до 1500° С ;

- характер горіння суміші має бути плавним при найменшому газозвиділенні, не повинен бути вибухонебезпечним;

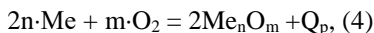
- продукти екзотермічних реакцій не повинні бути щільними, щоб легко відокремлюватися від поверхні деталі, при цьому якість поверхні не повинна погіршуватися;

- процес екзотермічного зміцнення має тривати від 5 до 15 хв;

- компоненти повинні бути недорогими та недефіцитними, підготовка їх до використання не повинна бути трудомісткою.

Основною перевагою такого методу є те, що підбираючи компоненти термітного складу – окислювачі, відновники, каталізатори або інгібітори та легуючі добавки, можна досягти того, що в результаті термохімічної реакції здійснюється утворення металу, з необхідними характеристиками; зокрема з наплавних екзотермічних засобів, повинен виділятися розплав системи Cu-Ni або системи Fe-Cu. Крім того, необхідно, щоб у розплаві була присутня деяка кількість Si для поліпшення процесу графітизації. Цього можна досягти, якщо термохімічна суміш міститиме як окиснювачі CuO, Ni<sub>2</sub> O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а як відновників такі речовини як Al, B, CaSi<sub>2</sub>. Такий склад дозволяє отримувати легкоплавкі шлаки, які залишаються рідкими після кристалізації основного металу, що підвищує щільність та чистоту наплавленого металу. Особливу увагу слід звернути на утворення газового середовища під час термітної реакції (випаровування заліза в результаті його кипіння). Поряд з випаровуванням заліза при термітній реакції, можливе утворення газоподібних субоксидів та CO.

У загальному вигляді реакції екзотермічного процесу можуть бути виражені наступним рівнянням:



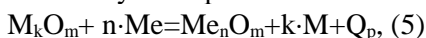
де  $Q_p$  – тепловий ефект екзотермічної реакції;

Me – активний метал;

$m, n$  – кількість атомів.

Величина  $Q_p$  визначається як різниця тепломісткості вхідних та кінцевих продуктів реакції. Для переважної більшості металів величина  $Q_p$  позитивна, що відповідає екзотермічності реакції окислення та утворення стійкої хімічної сполуки.

Інтенсивні екзотермічні реакції можуть протікати не лише за рівнянням (4). У тих випадках коли окислювач ( $\text{O}_2$ ) знаходиться в поєднанні з іншим елементом (Me), екзотермічні реакції можуть бути описані наступним рівнянням:



де Me активний метал;

M – неактивний метал;

$m, n, k$  – кількість атомів.

Слід зазначити, що тепловий ефект реакції (5) у більшості випадків нижче за тепловий ефект реакції (4).

Для протікання реакції необхідно, щоб ізобарний потенціал оксиду активного металу, віднесений до одного молю  $\text{O}_2$ , був значно більшим за ізобарний потенціал оксиду металу, що відновлюється. У цьому випадку тепловміст системи  $\text{M}_k\text{O}_m + n\text{Me}$  у процесі реакції буде зменшуватися, відновлювально-окислювальний процес піде з виділенням тепла, викликаючи розігрів продуктів реакції.

Інтенсивне протікання метало-термічної реакції буде спостерігатися тільки в тому випадку, коли тепло, що виділяється, здатне значно підвищити температуру початку реакції і перевищити критичну температуру початку реакції. Так, реакція між порошком оксиду заліза та порошком Al дуже екзотермічна; теплота, що виділяється при цьому, цілком достатня, щоб надалі перевищити критичну температуру  $600^\circ\text{C}$ ) та забезпечити нормальний перебіг реакції.

У разі застосування системи  $\text{SiO}_2 + \text{Al}$  теплота утворення  $\text{Al}_2\text{O}_3$  більше теплоти утворення  $\text{SiO}_2$ , але оскільки теплота реакції цієї системи значно менше, ніж теплота реакції системи  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}$ , нормальний перебіг реакції з відділенням металевого кремнію не спостеріга-



ється. Отже, оксид кремнію можна застосовувати як сповільнювану добавку в складі енерговиділення при термодифузійному зміцненні.

Для оцінки хімічного термічного складу, замість ізобарного потенціалу використовується тепловий ефект реакції, визначений як різниця тепломісткості вихідних та кінцевих продуктів реакції. Оскільки зміна ентропії, суттєвого впливу на процес не надає, тому для оцінки метало термічних процесів може бути використаний тепловий ефект реакції.

При підвищенні температури горіння металів та їх оксидів, що розглядаються, в останніх можуть відбуватися разові перетворення, що супроводжуються зміною їх теплоємності і тепловими ефектами перетворень. Тому теплота утворення оксиду за різних температур буде змінюватися в різних систем залежно від властивостей компонентів.

Тому для того щоб досягти певного результату, важливо виконати усі умови для протікання термодинамічних процесів реакції. І не слід сподіватися на отримання бажаного продукту, високої якості, тому що процес екзотермічного високотемпературного синтезу (ЕВС) є дуже складним фізико-хімічним процесом, та його якісне протікання залежить від багатьох факторів: теплового ефекту реакції, складу та структури вихідної суміші порошків, розміру їх частинок, щільності, розміру та температури зразків, складу та тиску навколишнього газу та інше. Щоб отримати бажаний продукт високої якості, необхідно глибоко знати процес ЕВС і вміти керувати ним. Для цього потрібно знати теорію процесів ЕВС, розуміти механізм їх протікання, вплив різних параметрів. Необхідно вміти підбирати оптимальні технологічні режими, користуватись прийомами регулювання швидкості, температури та повноти горіння, а також складу та структури продуктів горіння. Необхідно знати та правильно вибирати устаткування реалізації процесу ЕВС. Ми повинні знати види та особливості матеріалів, одержуваних методом ЕВС, вміти правильно визначати їх властивості, атестувати кінцеві ЕВС – продукти. Нарешті, ми повинні правильно оцінити технічну та економічну ефективність конкретної технології, щоб прийняти правильне рішення для створення виробництва на основі цієї технології, яке було б рентабельним в умовах ринкової економіки.

В нашому випадку для відновлення пошкодженої поверхні деталі, яка виготовлена з ливарного ковкого чавуна, крім звичайної термічної суміші потрібно додати присадку з значною кількістю крем-

нію. Високий склад кремнію в термітному металі впливає на утворення графіту у зонах переходу і забезпечує отримання міцного з'єднання. Зокрема із відновленого металу шляхом процесу ЕВС, має виділятися розплав системи Cu – Ni або системи Fe – Cu. Крім того, необхідно, щоб у розплаві була присутня деяка кількість Si для поліпшення процесу графітизації. Цього можна досягти, якщо термохімічна суміш міститиме в собі як окиснювачі CuO, Ni<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а в якості відновників такі речовини як Al, B, CaSi<sub>2</sub>. Такий склад дозволяє отримувати легкоплавкі шлаки, які залишаються рідкими після кристалізації основного металу, що підвищує щільність та чистоту наплавленого металу.

Особливу увагу слід звернути на вихід газового середовища під час термітної реакції (випаровування заліза в результаті його кипіння). Поряд з випаровуванням заліза при термітній реакції, можливе утворення газоподібних субоксидів та CO. Однак обсяги цих газів значно менше обсягу заліза, що випаровується. З виконаних розрахунків можуть бути розроблені заходи, створені задля зменшення обсягу газової фази і зменшення викидів при реакції термітного процесу. До них можна віднести: розведення вихідної суміші інертними добавками, зокрема порошком заліза; збільшення вмісту в окалині FeO; гранулювання суміші на основі нітрату целюлози, під нітратом целюлози розуміється піроксиліновий порошок (піроксилін №1 (13,0 - 13,5% азоту)) із загальною формулою C<sub>24</sub> H<sub>29</sub> O<sub>42</sub> N<sub>11</sub>.

Всі ці методи забезпечують зниження калорійності термітної суміші та, як наслідок, зниження кількості теплоти, що витрачається на випаровування заліза. Необхідна потужність термохімічної суміші може бути отримана з класичних уявлень зварювання-наплавлення розповсюдженим джерелом тепла, що найбільш повно відповідає випадку наплавлення на ділянці малих розмірів.

Відповідно до цих уявлень, необхідна потужність може бути визначена таким виразом:

$$Q = \frac{41.3 \cdot 10^{-3} \cdot v_{\text{CB}} \cdot C \cdot S \cdot \gamma \cdot \eta}{1 - (5 \cdot 10^{-5} \cdot b / 2a)} \quad (6)$$

де :  $v_{\text{CB}}$  – швидкість розповсюдження джерела тепла, м/с;

$C$  – теплоємність наплавленого металу, Дж/кг К;

$\gamma$  – щільність наплавленого металу, кг/м<sup>3</sup> ;

$b$  – коефіцієнт температури віддачі деталі, с<sup>-1</sup>, який дорівнює:

$$b = \frac{2\alpha}{c \cdot \gamma \cdot S} \quad (7)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м<sup>2</sup> К;

$S$  – Площа перерізу наплавляємої деталі, мм<sup>2</sup>;

$\eta$  – к.к.д. термітного реактора, визначаємо за вхідними роботи, як;

$$\eta = \frac{\sqrt{\varepsilon_m}}{\sqrt{\varepsilon_m} + \sqrt{\varepsilon_m}} \quad (8)$$

де  $\varepsilon_m$  и  $\varepsilon_m$  – відповідно коефіцієнти теплової активності матеріалу деталі та матеріалу який синтезується в результаті термохімічної реакції в Дж/м<sup>2</sup>Кс<sup>0,5</sup>.

Для визначення умов якісного формування наплавленого металу у сплаві з ковким ливарним чавуном необхідно врахувати температуру попереднього підігріву зони наплавлення. Використавши попередні дослідження по нагріву дефектного металу за яким утворюється сплавлення (90-100%) наплавленого металу з материнським, отримали температуру попереднього нагріву 600-700°C. За цією температурою зменшується не провар в центральній частині дефекту і одночасно збільшується якість сплавлення. Однак цілком позбутися від не провару і зниження пористості не вдається. За головну причину утворення не провару можна враховувати нерівномірність динамічного впливу на зону реакції газової фази яка утворюється в процесі екзотермічної реакції і збільшення тиску газів в центрі дефекту. В такому разі, слід рівномірно об'ємно вирізати дефект для запобігання утворення не однакового тиску газової фази по всій ділянці відновлення.

Для умов зниження пористості наплавленого металу можна розрахувати мінімальний допустимий час, коли газові пори вийдуть на поверхню за межу зварної ванни. За основу визначення мінімального часу  $t_{min}$  приймаємо вираз Стокса, який визначає швидкість руху кульки у в'язкому середовищі.

$$v = \frac{2R^2(\rho_{me} - \rho_n)}{9\eta} g \quad (9)$$

Для  $\rho_{me}=6,7 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_n=0,00028$  кг/м<sup>3</sup>,  $g=9.8$  м/с<sup>2</sup>,  $\eta=0,0029$  кг/м·с  
Швидкість виходу пори на поверхню дорівнює  $v=4.82 \cdot R^2$

Вираз для визначення сили опору середовища, в якому рухається кулька, вперше була отримана також Стоксом і має такий вигляд:

$$F = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v \quad (10)$$

Де  $\eta$  - в'язкість рідини в якій рухається кулька;

$r$  – радіус кульки

$v$  – швидкість руху

Радіус кульки (газова пора) яка рухається у в'язкому середовищі має об'єм:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (11)$$

На неї діє виштовхуюча сила Архімеда:

$$F_A = \rho_p V g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_p g \quad (12)$$

Коефіцієнт в'язкості рідини якщо виміряна швидкість усталеного руху кульки можна обчислити за виразом:

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 g}{v} (\rho_p - \rho_n); \quad (13)$$

Де  $r$  - радіус кульки;

$v$  – швидкість рівномірного руху кульки в рідині;

$\rho_p$  - густина рідкого синтезованого металу  $\text{кг/м}^3$ ;

$\rho_n$  - густина кульки (матеріалу пори)  $\text{кг/м}^3$ ;

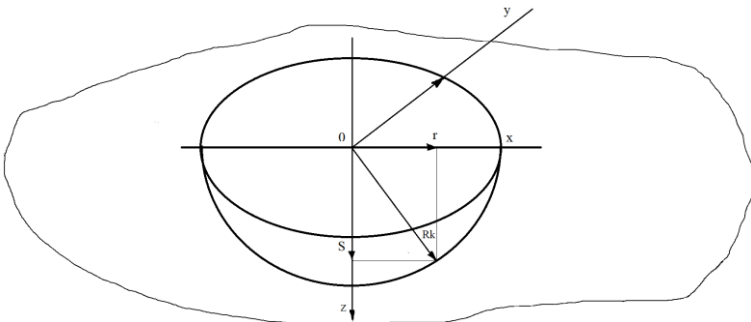


Рис.1 Схема до розрахунку часу виходу кульки газової бульбашки.

Відстань яку пройде газова пора визначимо, як :

$$S_k = \sqrt{R_k^2 - r^2} = R_k \sqrt{1 - \left(\frac{r}{R_k}\right)^2} \quad (14)$$

Мін час виходу кульки газової пори на поверхню, розрахуємо, нехтуючи впливом різностей густини під впливом збільшення температури:

$$t_{min} = S_k/v \quad (15)$$

Підставивши показники відстані  $S_k$ , та швидкості  $v$  вираз набуде такий вигляд:

$$t_{min} = \frac{R_k}{4.82 \times R^2} \sqrt{1 - \left(\frac{r}{R_k}\right)^2} \quad (16)$$

Поверхневий шар рідкого металу який синтезувався після реакції відновлення має температурне поле яке складається з значень температури підігріву та температури джерела горіння термітної суміші. Час горіння шихти дуже мале ( $\leq 25$  с), але якщо використовується закис заліза  $Fe_3O_4$ , тепловий ефект якого складає приблизно 3345,2 кДж/моль, може збільшити час перебування металу в рідкому стані і підвищити технологічні характеристики металургійних процесів в режимі плавлення. Як можна підвищити час за яким температурне поле від розповсюдженого джерела буде впливати на час перебування металу в рідкому стані. Першочергово можна підігріти зону по всій площині дефекту, а за час підігріву  $t_{п}$ , потужне джерело тепла потужністю  $Q_{під}$  утворить температурне поле:

Температура рідкого сплаву  $T_{спл}$ , яка розповсюджена у сфері радіуса  $R_k$ , у будь який час буде дорівнюватися суми температур підігріву та температури плавлення від розповсюдженого джерела екзотермічної реакції. За довідковими даними температура розплавленого термітного металу, який утворився за екзотермічної реакції  $T_{т.м.} = 2700^\circ C$ . далі температура буде зменшуватися і через деякий час досягне температури плавлення (для ковкого чавуна  $T_{пл} = 1250^\circ C$ ). Виконавши розрахунки часу перебування металу в рідкому стані, відносно  $T_{т.м.} > T_{пл}$  виявили що в центральній частині зварної ванни  $t_{рід} = 21,43$  с., а на її межі  $t_{рід} = 9,27$  с., тоді як час виходу газової буль-

башки  $\varnothing 0,1$  мм складає 1,66 с. й 0,11 с відповідно. Отже часу перебування синтезованого металу в рідкому стані достатньо щоб практично всі газові бульбашки вийшли за межі поверхні зварної ванни. Але в складі синтезованого термітного металу є окремі пори  $\varnothing 0,1 \dots 0,2$  мм, які утворилися завдяки нестабільному характеру процесу, завдяки перемішуючим бурхливим рідким металом, який може захоплювати гази.

$$T_{\text{п}} = \frac{T_{\text{під}}}{\operatorname{erfc}\left(\frac{R_k}{\sqrt{4at}}\right)} \int_{\frac{R_k}{\sqrt{4at}}}^{\infty} \operatorname{erfc}\left(r \cdot \sqrt{\frac{t}{t_{\text{н}}}}\right) \cdot \left[ \exp\left[-\left(r - \frac{z}{\sqrt{4at}}\right)^2\right] - \exp\left[-\left(r + \frac{z}{\sqrt{4at}}\right)^2\right] \right] dr \quad (17)$$

Слід враховувати, що при стабільному перебігу процесу екзотермічної реакції наплавлений метал може бути вільним від газових пор. Робимо висновок, що технологічні умови по зниженню утворення газових пор повинні бути спрямовані на стабілізацію екзотермічної реакції.

Істотне збільшення продуктивності розплавлення досягається при введенні до складу шихти термітної суміші, феробору та феротитану (ПЛ-2 та ПЛ-3). Використання феробору та феротитану в термітній суміші дозволяє збільшувати кількість заліза в металі шва. Крім того, під час екзотермічної реакції залізо відновлюється з гематиту, що у поєднанні із залізом, що переходить з феросплавів, забезпечує збільшення  $\alpha_{\text{н}}$  (коефіцієнта наплавлення). Для збільшення якості синтезованого металу у термітну суміш необхідно ввести чавунну стружку і значну кількість кремнію (феросиліцій) і вуглецю, високий вміст кремнію у термітному металі сприяє утворенню графіту в зварної і перехідній зонах. Експериментально встановлено, що середній вихід металу до маси термітної суміші становить 50,5 %, спостерігається при використанні як вхідних компонентів термітних композицій окислювача і відновника з фракцією 0,2-1,5 мм, що мають середню насипну щільність 1500 кг/м<sup>3</sup>.

Хімічний склад синтезованого металу в якості відновника відповідає материнському складу, має мікроструктуру на феритній основі

з розміром зерна меншим на 4-20%, ніж у традиційному випадку. Глибина плавлення основного металу склала 0,5...0,8 мм і після повної кристалізації виявилось що межа міцності термітного металу вища ніж материнського. На підвищення твердості впливають два фактора. Перший полягає в термодинамічному процесі протікання екзотермічної реакції за якою відбувається відносно повільне охолодження під товстим шаром шлаку на поверхні, яке сприяє утворенню феритно-цементитної структури що володіє більшою твердістю і міцністю. Другий фактор пов'язаний з наявністю великої кількості алюмінію в наплавленому металі в вигляді інтерметалевих вкраплень типу  $Fe_nAl_m$ , мікротвердість яких в два рази більша ніж мікротвердість феритної основи 947,8...1030 кгс/мм<sup>2</sup> проти 412...458 кгс/мм<sup>2</sup>.

Таким чином наплавлення технологією СВС дефектів чавунних деталей забезпечує достатню міцність утвореного термітного металу і металу зони термічного впливу. При цьому СВС технологія екзотермічного наплавлення забезпечує можливість виходу на поверхню зварювальної ванни бульбашок газу діаметром понад 0,02 мм. Пористість наплавленого металу не перевищує регламентних норм, що забезпечує його щільність у межах допуску на лиття. Технологічні заходи щодо зменшення пористості мають бути спрямовані на підвищення стабільності екзотермічної реакції.

#### ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА:

1. Власов А. Ф. Развитие научных и технологических основ повышения эффективности применения экзотермических смесей при электродуговой сварке и электрошлаковых процессах /Диссертация. – 2016. – с. 172–214.
2. Амосов А. П., Боровинская И. П., Мержанов А. Г. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов. М.: Машиностроение-1, 2007. 568 с. [Amosov A. P., Borovinskaya I. P., Merzhanov A. G. Powder technology of the self-propagating high-temperature synthesis of materials. Moscow: Mashinostroenie-1, 2007. 568 .]
3. В.В Яценко, А.П. Амосов, А.Р. Самборук. Термодинамические исследования горения железо-алюминиевого термита. Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки», 2011, выпуск 2(23).- с.123-128

4. Кувшинова Н. Н. Технология устранения дефектов стального литья экзотермической наплавкой: Автореф. дисертации канд. техн. наук. Тольятти: ТолГУ, 2004. 17 с. [Kuvshinova N. N. Defect removal technology for exothermic welding of steel castings: Ph. D. (Techn.) Thesis. Togliatti: TolGU, 2004. 17 pp.]
5. Медовар Б. И. Электрошлаковая технология на пороге XXI века // Современное материаловедение XXI век. — Киев: Наук, думка, 1999. — с.656.
6. [М.Д. Костюк, В.В. Козак, В.О. Яковлев та ін.] Будівництво та реконструкція залізничної мережі України для збільшення пропускної спроможності та запровадження швидкісного руху поїздів /– К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2010. – с. 216.
7. Лебедев Б.В. Анализ возможности и целесообразности использования экзотермических смесей для разработки новых перспективных технологий восстановления сопряжений деталей СТС // Матеріали Міжнародної науково- методичної конференції "Сучасні проблеми суднової енергетики 2005". - Одеса: ОНМА. 2005. с. 53-54.
8. А. П. Мухачев, Е. А. Харитоновна. Физико-химические основы СВС-процесса получения сплавов на основе редкоземельных металлов. *Металлофизические новейшие технологии.* / Metallofiz. Noveishie Tekhnol. 2017, т. 39, № 10, с. 1395–1409
9. Лебедев Б. В., Богомолов Э. П. Аналитическое определение количества теплоты, необходимого для сварки стальных конструкций на воздухе экзотермическими стержнями / Проблемы техники. – 2017. – С. 21–29.
10. Е. П. Богомолов. Підвищення ефективності ремонту та зміцнення дизельної газовипускної системи, застосувавши високо розповсюджуваний високотемпературний синтез отримання сплавів. IV Міжнародна науково-практична морська конференція кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації (СЕУ та ТЕ) Одеського національного морського університету (МРР&О-2022). – с. 94-102.