

УДК: 620.22: 669.017

Ю.Ю. Жигуц<sup>1</sup>, В.Д. Рудь<sup>2</sup>, М.М. Кляп<sup>1</sup>  
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»<sup>1</sup>  
Луцький національний технічний університет<sup>2</sup>

## ОСОБЛИВОСТІ ТЕРМІТНОГО ЗВАРЮВАННЯ ВИСОКОХРОМОВАНИХ СТАЛЕЙ

*У роботі описується синтез високолегованих термітних сталей на основі порошкових матеріалів. Розглянуто вплив порошкових інгредієнтів шихти на властивості синтезованих матеріалів і особливості їх хімічного складу. Компоновання металотермічної шихти дозволило синтезувати високохромовані сталі типу X17T, X25T і X28. Для більш повного розгляду аспектів синтезу наведено розрахункові склади шихт і дані про вихід синтезованого сплаву з шихти. Отримані результати дослідження способу синтезу та зварювання, а також механічних властивостей синтезованих матеріалів та термітних швів дозволяють встановити можливі області їх використання.*

*Ключові слова:* порошкові інгредієнти, шихта, термітні сталі, властивості, термітне зварювання.

## Ю.Ю. Жигуц, В.Д. Рудь, М.М. Кляп ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИТНОГО СВАРИВАНИЯ ВЫСОКОХРОМИСТЫХ СТАЛЕЙ

*В работе описывается синтез высоколегированных термитных сталей на основе порошковых материалов. Рассмотрено влияние порошковых ингредиентов шихты на свойства синтезированных материалов и особенности их химического состава. Компоновка металлотермической шихты позволила синтезировать высокохромистые стали типа X17T, X25T и X28. Для более полного рассмотрения аспектов синтеза приведены расчетные составы шихт и данные про выход синтезированного сплава из шихты. Полученные результаты исследования способа синтеза и сваривания, а также механические свойства синтезированных материалов и термитных швов позволяют определить возможные области их использования.*

*Ключевые слова:* порошковые ингредиенты, шихта, термитные стали, свойства, термитное сваривание.

## Yu. Zhiguts, V. Rudj, M. Kljap THE FEATURES THERMITE WELDING OF HIGHCHROMIUM STEELS

*In this work the syntheses high alloys thermite steel on base powdered material is described. The considered influence powdered components of compound on characteristic synthesized material and particularities their chemical composition. The metaltermic arrangement of composition has allowed synthesizing highchromium steels become type X17T, X25T and X28. For more detail discussing of the aspects of synthesis calculating compositions of the burdens and summary data of output of synthesized alloy out of the burden are given. The results obtained during investigation of a way of synthesizing and welding, and also the mechanical characteristics of the synthesized materials and thermite weld allow discussing on their possible branches of using.*

*Keywords:* powdered compound, composition, thermite steels, properties, thermite welding.

**Постановка проблеми.** Актуальною проблемою сьогодення у техніці є не тільки створення нових матеріалів і покращення властивостей традиційних, але і удосконалення технологій їх з'єднання при виготовленні деталей різноманітної форми. Детальне вивчення вказаної проблеми дозволяє стверджувати, що вона може бути успішно вирішена за допомогою використання спеціально синтезованих сплавів, отриманих за допомогою термітних [1] і комбінованих (самопоширюваний високотемпературний синтез [2] і металотермія) технологій зварювання, заснованих на горінні екзотермічних порошкових сумішей. Такі технології відрізняються від традиційних цілою низкою очевидних переваг: відсутність потреби у потужних джерелах електроенергії; можливість застосування простого, дешевого обладнання; високою продуктивністю процесу (час синтезу сплаву може тривати всього декілька хвилин); можливість використання вторинних відходів виробництва, а саме млива графітових електродів, алюмінієвої або магнієвої стружки, залізної окалини [3] та ін. Зварювання термітом на основі алюмінію застосовується для з'єднання сталевих, чавунних деталей і деяких кольорових сплавів при стикуванні рейок, труб, дротів, кабелів, зварюванні тріщин, наплавленні поверхонь при ремонті. Незважаючи на вказані переваги суттєвим обмеженням для використання вказаних технологій є відсутність розроблених складів шихт для термітного зварювання високолегованих неіржавіючих сплавів та недослідженість синтезованих матеріалів. Все це викликало нагальну потребу у проведенні низки досліджень.

**Мета дослідження.** Метою дослідження було встановлення складів металотермічних сумішей для проведення термітного зварювання, дослідження та аналіз властивостей отриманих зварних швів та розроблення технології металотермічного зварювання високохромованих сталей.

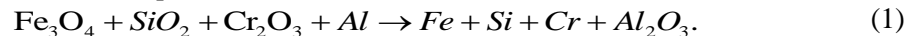
**Матеріали і методика проведення експерименту.** При виконанні роботи були використані матеріали: сажа (технічний вуглець ТУ 14-7-24-80), порошок алюмінієвий ПА-3–ПА-4 ГОСТ 6058-73, залізна окалина із середнім хімічним складом (у мас. %): 0,05 С;  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  – 36,4;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  та  $\text{FeO}$  – 19,9 (при співвідношенні 50%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  на 50%  $\text{FeO}$ );  $\text{CaO}$  – 5,4; 0,10–0,35 Si; 0,10–0,35 Mn; 0,01–0,03 S; 0,01–0,03 P; інші невідомі сполуки – решта.

Порошкова металотермічна шихта просушувалася, перемішувалася, ущільнювалася і після цього розміщувалася у металотермічному тиглі. Шліфи для металографічного аналізу виготовлялися із використаних зразків для випробовування на розтяг.

У розробленій технології синтезу у металотермічний реактор засипалися порошкоподібні інгредієнти шихти, які підпалювали спеціальним запалом. Після завершення горіння в нижній частині реактора формувалася зливка, а у верхній частині в результаті значної різниці у питомій масі продуктів реакції, збирався шлак.

Для визначення маси зливка і виходу сплаву з шихти на першому етапі дослідження були проведені мікроплавлення при масі шихти 100–150 г у металевому тиглі. Ініціювання процесу горіння проводилося спеціальним титановим запалом виготовленим з порошку титанового хімічного ПХ-2 ТУ 48-10-78-83.

Отримання високохромованих сталей металотермією із використанням порошкових інгредієнтів для компонування шихти проводили за схемою:



Після встановлення складу шихти за стехіометричними коефіцієнтами хімічної реакції та корекції її коефіцієнтами засвоєння компонентів [4,5], проводили розрахунок адіабатичної температури горіння металотермічної реакції. Одна із найголовніших умов синтезу – необхідність отримувати реальну температуру горіння шихти вище температури плавлення шлаку (для  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 2400 К).

Зрозуміло, що з причин відсутності повної таблиці даних залежностей теплоємності продукту горіння від температури при високих температурах, проводилася екстраполяція значень у відповідності із запропонованими даними з роботи [4]:

$$C_{m6}(T_{nl}) = 7k \cdot n \text{ (Дж/моль} \cdot \text{град)}, \quad (2)$$

де  $C_{m6}(T_{nl})$  – теплоємність продукту при температурі плавлення;  $k$  – перехідний коефіцієнт від кал до Дж;  $n$  – кількість атомів у молекулі утвореного продукту.

При встановлених значеннях ентальпії продукту горіння адіабатична температура ( $T_a$ ) розраховувалася за формулою (3):

$$T_a = T_{nl} + \frac{Q - L - \Delta H(T_{nl})}{C_{рідк}}, \quad (3)$$

де  $T_{nl}$  – температура плавлення продукту;  $Q$  – тепловий ефект реакції;  $L$  – теплота плавлення продукту реакції;  $C_{рідк}$  – теплоємність рідкого розплаву;  $\Delta H$  – різниця ентальпії вихідних і кінцевих продуктів.

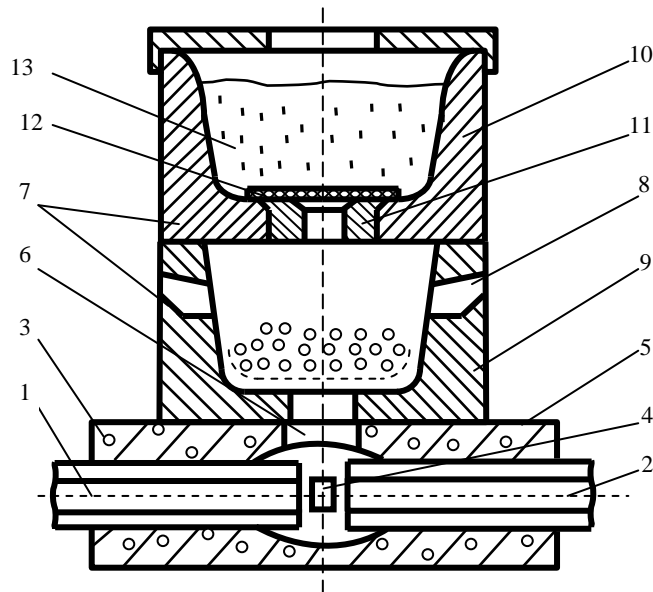
Помилку, пов'язану із екстраполяцією значень оцінювали у 100-150 градусів.

Для зменшення впливу на термітний метал високої температури і для усунення пов'язаної із цим високою пористістю і усадкою у виливках, у склад шихти вводили інертні домішки – мливі стружки відповідного сплаву і феросплави. Із метою підвищення стабільності горіння і покращення кінетичних характеристик протікання реакції, у склад шихти також вводилося 1–2% (від маси шихти) плавикового шпату  $\text{CaF}_2$ , який не тільки знижує температуру запалення екзотермічної порошкової суміші, але і підвищує вихід сталі з неї.

*Контроль якості зварних з'єднань.* Оскільки в даний час немає повної інформації з працездатності зварених алюмініотермічною технологією заготовок і статистики розвитку внутрішніх дефектів, то контроль якості алюмініотермічних зварних швів виконували після чистового шліфування. Він полягав у візуально-вимірювальному контролі, при якому виявляли зовнішні дефекти, а також можливі відхилення в геометрії термітного шва, і подальшого ультразвукового контролю для визначення внутрішніх дефектів. Також виконувалися випробування зварених зразків на міцність і пластичність та вимірювали твердість сплаву в зоні стику.

**Технологія термітного зварювання.** При нагріванні термітної суміші до 1150-1200 °С за допомогою спеціальних запальних сумішей або термітних сірників терміт запалюється. Реакція за декілька секунд поширюється на весь об'єм суміші. З 1 кг терміту утворюється ~ 550 г заліза та 450 г оксиду алюмінію і виділяється близько 3000 кДж тепла. Температура реакції досягає 3000°С.

При проведенні експериментальних досліджень синтез легованих сталей виконувався у металотермічному реакторі з економною системою використання легуючих елементів [6], який працює таким чином (див. рис. 1) – у верхній камері 10 проходить металотермічна реакція горіння залізоалюмінієвого терміту і розчинення у термітній сталі графітового порошку, а також розділення рідких продуктів реакції на металічну і шлакову фази. В результаті шлакова фаза спливає, а рідкий розплав сталі збирається у нижній частині камери і пропалює тонку пластинку 12.



**Рис. 1. - Конструкція металотермічного реактора для зварювання: де 1, 2 – плити з високохромованої сталі товщиною 30 мм, 3 – формувальна суміш, 4 – пінополіуретанова вставка у порожнині зварювання, 5 – опока, 6 – вертикальний ливарний канал, 7 – двокамерний реактор, 8 – отвір, 9 – нижня камера, 10 – верхня камера, 11 – стержень з отвором, 12 – пластинка, 13 – суміш терміту та графітового порошку**

У камері легування та модифікування 9 відбувалася взаємодія, утвореного розплаву сталі, з лігатурою під час перетікання її у порожнину термітного зварювання 4. При цій взаємодії проходило насичення сталі феродомішками та іншими легуючими елементами.

Плити 1 і 2 заформовували у піщано-глиняну суміш 3, при цьому щілина між ними шириною 10 мм заповнювалася пінополіуретаном 4. Плити 1, 2 та поліуретановий прошарок 4 прикривалися опокою з формувальною сумішшю 5, яка мала рівні лади. На верхню напівформу з каналом 6 встановлювали двокамерний реактор 7. У формувальній суміші передбачався тимчасовий отвір 8, через який подавали полум'я газового пальника для випалювання пінополіуретанової вставки 4. Полум'я розжарювало торці плит 1 і 2 та прогрівало порожнину термітного зварювання, а одночасно і канал 6, нижню 9 та верхню 10 камери реактора. Після завершення операції прожарювання у камеру 9 закладали лігатуру і стержень 11 з отвором, який перекривали тонкою пластиною зі сталі. У камеру 10 засипали суміш терміту і графітового порошку 13. Розігрів плит 1 і 2 пальником проводили до ~ 300°С. Суміш підпалювалася термітним сірником або запалом з порошку титану, який, у свою чергу, підпалювали звичайним сірником. Приблизно через 20–25 секунд після початку технологічної операції горіння пластинка 12 пропалювалася термітною сталлю, яка виливалася у камеру 9, розчиняючи на своєму шляху лігатуру, а далі стікала у канал 6 і у порожнину зварювання. Плити приварювалися одна до одної у процесі їх оплавлення перегрітою леговою сталлю і її твердіння.

На підготовчому етапі проводили розрахунок металотермічної суміші за стехіометричними коефіцієнтами взаємодії основних інгредієнтів реакції. У подальшому встановлювали вплив легуючих домішок на властивості термітних легованих сталей та досліджували властивості

синтезованої сталі. Третій етап дослідної роботи полягав у здійсненні металотермічного зварювання і дослідженні властивостей отриманих швів.

**Теоретична частина і експериментальні дослідження.** Адіабатична розрахункова температура горіння вказаної суміші складала 2920–3110 °С [6,7]. При вмісті у суміші менше 21% домішок (крім залізоалюмінієвого терміту) адіабатична температура горіння підвищується, але вміст хрому знижується. Це вимагало застосування замість частини залізної окалини – подрібненого ферохрому (ФХ100А). При вмісті ж у суміші понад 25% домішок адіабатична температура горіння знижувалася нижче допустимої і процес горіння проходив у нестабільному режимі. Якщо залізна окалина має недостатній вміст оксидів хрому, її тим не менше можна використовувати, поєднуючи у необхідних пропорціях запропоновану суміш із звичайною екзотермічною легованою сумішшю, залізоалюмінієвим термітом і ферохромом.

Залежність швидкості проплавлення шихти від способу ведення плавлення і дисперсності використаного порошку алюмінію показана в табл. 1.

Таблиця 1.

### Швидкість проплавлення шихти

Вид запалу	Швидкість проплавлення шихти при певній дисперсності алюмінієвого порошку (г/м <sup>2</sup> ·хв), ×10 <sup>-4</sup>			
	(0,6–0,8) мм	(0,4–0,5) мм	(0,3–0,4) мм	(0,1–0,25) мм
Верхній запал	19	20	–	24
Нижній запал	9	12	15	–

Швидкість процесу проплавлення зменшується із зростанням ущільнення шихти і суттєво зростає при застосуванні брикетування (за рахунок зменшення втрат пилових матеріалів). Одночасно швидкість проплавлення шихти зростає і при використанні більшої дисперсності порошку алюмінію та при збільшенні його кількості.

Важливим фактором є співвідношення між дисперсністю оксидів заліза (залізної окалини) і алюмінію. Оптимальне співвідношення між ними встановлюється при застосуванні частинок однакової дисперсності. Якщо прийняти, що зерна компонентів мають сферичну форму, діаметр частинок алюмінію  $d_{Al}$  при стехіометричному співвідношенні реагентів повинен знаходитись у межах 0,8–0,9 діаметру зерна відновленого оксиду  $d_{ок}$ .

При співвідношенні оксидів заліза і алюмінію 1:0,8–0,9 та частинок дисперсністю 0,6–0,1 і, відповідно, 0,5–0,4 мм відновлення проходить при розрахунковій питомій теплоті процесу, а утворена сталь за хімічним складом відповідає розрахунковій. Це особливо важливо при присутності у шихті різних домішок і флюсів. В цьому випадку нерівномірність розшарування шихти за окремими компонентами зростає.

Границі вмісту алюмінієвого порошку (млива стружки) обумовлені терохімічними розрахунками, виходячи із необхідності відновлення залізної окалини. Для використаної залізної окалини вміст сірки і фосфору незначний, що в цілому позитивно впливає на властивості синтезованих сплавів. Необхідну частку алюмінієвої стружки (чистотою 93–95% за металічним алюмінієм) на 1 кг окалини визначали спочатку за стехіометричними складом реакцій (4) і (5) з подальшою корекцією за результатами дослідних мікроплавлень.



Відомо, що вихід термітної сталі зі стандартного терміту ( $Fe_2O_3 + Al$ ) складає приблизно 50%. Тоді, щоб провести науглецьовування сталі необхідно ввести у склад метало термічної шихти 1,2% вуглецю (у вигляді «сріблястого» графіту) з врахуванням випалу вуглецю 7%.

У ливарній лабораторії Ужгородського національного університету були проведені термітні плавлення сталі Х17Т, Х25Т та Х28 на основі металотермічної шихти розрахованого вище складу та використано високоперегрітий розплав для зварювання. Отриманий зварюваний термітний шов з високохромованої сталі був підданий хімічному аналізу, який дав результати, зведені у табл. 2. Як видно, отримані високохромовані термітні сталі у межах хімічного складу регламентованого стандартом з механічними властивостями (табл. 3) не гіршими, ніж у сталей виготовлених промисловими методами. Дослідженні властивості зварюваного шва, отриманого металотермічним способом, показані в табл. 3 свідчать, що металотермічний зварюваний шов практично не відрізняється від ординарних промислових зварюваних швів.

Таблиця 2.

## Хімічний склад термітних сталей (% за масою)

№ з/п	Марка сталі типу	Вміст елементів						
		C	Mn	Si	Cr	Ti	S	P
1	X17T	0,08	0,45	0,60	16,9	0,55	0,03	0,05
2	X25T	0,07	0,51	0,75	24,4	0,61	0,03	0,05
3	X28	0,06	0,42	0,61	27,2	–	0,02	0,04

Таблиця 3.

## Механічні властивості термітних швів синтезованих термітних сталей

№ з/п	Марка сталі типу	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$	$\Psi$	$a_n$ , МДж/м <sup>2</sup>	Бал зерна
			%			
1	X17T	520	21,0	46,0	9,8	4–5
2	X25T	530	12	40	7,4	4–5
3	X28	550	18	43	1,1	3–4

<sup>1</sup>Механічні властивості визначено на стандартних зразках діаметром 10 мм.

Особливістю даного типу термітних сталей є крупнокристалічна будова виливків, що призводить до підвищеної крихкості синтезованих сплавів, яка усувається термічною обробкою.

В результаті проведених досліджень вдалося отримати високохромовані термітні сталі типу X17T, X25T, X28, із використанням відходів ковальського, термічного і металорізального виробництва.

Проведена експериментальна робота говорить про значні перспективи застосування металотермічних способів для синтезу і зварювання матеріалів. Враховуючи, що спосіб виготовлення цих сплавів має повну автономність, а саме, не вимагає джерел електроенергії, складного обладнання (пристроїв для синтезу, в яких підтримується необхідна температура, тиск і співвідношення реагуючих компонентів), він може знайти широке використання в умовах майстерень та інших виробничих приміщень не пристосованих для звичайних методів плавлення та зварювання сталі.

*Особливості зварювання термітних високолегованих сталей.* Як свідчать проведені експерименти найкращі властивості після термітного зварювання мають леговані сталі феритного та феритоаустенітного класу. До цього класу належать і хромонікелеві сталі [7]. Особливістю зварного сплаву є те, що гартвані структури утворюються одразу у матричному сплаві після твердіння, а це призводить до необхідності проведення додаткової термічної обробки. За рахунок значного градієнта температур у зварному шві утворюється гартвана на твердий розчин структура. Для зменшення імовірності утворення зварювальні тріщини в основному сплаві, напрямлених вздовж шва і поперечних – у зоні термічного впливу, потрібно виконувати дворазове старіння з метою додаткового зміцнення сплаву. Старіння виконується при температурах 300–400<sup>0</sup>С. Поверхні для проведення процесу термітного зварювання обов'язково попередньо зачищають і хімічно травлять. Сталі перед зварюванням для знежирення обробляють дихлоретаном.

**Обговорення результатів дослідження.** Термітне зварювання легованих сталей у 2–3 рази дорожче за традиційну технологію зварювання деталей. Економічний ефект досягається тільки в тому випадку, коли деталі необхідно зварювати в умовах відсутності звичайного зварювального обладнання, зовнішніх джерел енергії. У процесі зварювання досягається висока якість з'єднання за рахунок введення легуючих домішок і спеціальних інгредієнтів шихти, які регулюють швидкість охолодження зварюваного шва і зони термічного впливу. В результаті зварювання шов набуває структури і властивостей легованої сталі, про що свідчать результати експериментальних досліджень показані у табл. 3.

**Висновки.** 1. Теоретично й експериментально показана принципова можливість металотермічного виплавлення спеціальних високохромованих сталей з порошкових інгредієнтів. 2. Металотермічним способом отримано високохромовані термітні сталі аналоги промислових марок X17T, X25T і X28, при цьому у складі екзотермічної шихти для її синтезу застосовано залізна окалину (вторинний продукт термічного виробництва) та мливу алюмінієвої стружки (металорізального виробництва). 3. Встановлено механічні властивості синтезованих високохромованих сталей. Виявлено, що ці сталі мають міцність, навіть кращу, ніж сталі

виготовлені ординарними методами. 4. Розглянуті особливості проведення металотермічного виплавлення сталей, а саме вплив дисперсності порошкових елементів на процес горіння. 5. Досліджено можливості застосування термітного сплаву для зварювання легованих сталей, а також проведено аналіз властивостей отриманих зварних швів та вплив умов термітного зварювання на якість шва.

#### **Список використаних джерел:**

1. Фасонное литье из термитной стали [Текст] / Золковер М.З., Гридунов А.С., Быльницкий-Бируля С.О. и др. – М.: Дориздат. – 1950. – 48 с.
2. Жигуц, Ю.Ю. Технології отримання та особливості сплавів синтезованих комбінованими процесами [Текст] / Ю.Ю. Жигуц, В.Ф. Лазар. — Ужгород : Видавництво «Інватор», 2014. — 388 с.
3. Жигуц Ю.Ю. Патент №2001106813. Екзотермічна суміш для живлення виливків з високолегованих сталей. – Бюл. – №9, – 2002.
4. Жигуц, Ю. Ю. Методика розрахунку складу екзотермічних шихт на основі термохімічного аналізу [Текст] / Ю. Жигуц, В. Широков // Машинознавство. — 2005. — № 4. — С. 48 - 50.
5. Жигуц, Ю.Ю. Использование термитных высоколегированных сталей для питания оливок / Ю.Ю. Жигуц, В.Ф. Лазар // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій : збірник наук. праць. — 2009. — № 8. — С. 173 - 178.
6. Пат. 20045 Україна, МПК В22С9/00. Металотермічний реактор / Жигуц Ю.Ю., Скиба Ю. Ю., Крайній І. І. заявник і патентовласник Ужгородський національний університет. — № у 2006 06530 ; заявл. 13.06.2006 ; опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1.
7. Жигуц Ю. Ю. Вплив легування нікелем та хромом на структуру і властивості термітних сталей / Ю. Ю.Жигуц, Д. Ф. Чернега, В. В. Ковач // Збірник матеріалів XII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра», Київ, 15 квітня 2014 р. / [редкол.: В. С. Богушевський та ін.]. — К. : НТУУ «КПІ», 2014. — С. 406 - 414 с. — Режим доступу до збірн. : <http://www.fhotm.kpi.ua/labours/labours-2014.pdf>.

#### **Рецензент:**

**Козубовський Володимир Ростиславович**, проф., док. техн. наук, провідний науковий співробітник науково-дослідного інституту засобів аналітичної техніки ДВНЗ «Ужгородський національний університет», лауреат державної премії у галузі науки і техніки

Стаття надійшла до редакції 19.04.2017