

Ю.Ю. Жигуц\*, Д.Ф. Чернега\*\*, В.В. Широков\*\*\*, В.Ю. Талабірчук\*,  
\*ДВНЗ «Ужгородський національний університет»  
\*\*Національний технічний університет України «КПІ»  
\*\*\*Українська академія друкарства

## ТЕХНОЛОГІЯ СИНТЕЗУ ТЕРМІТНИХ ЖАРОМІЦНИХ СТАЛЕЙ З КАРБІДНИМ ЗМІЦНЕННЯМ

© Юрій Жигуц, Дмитро Чернега, Володимир Широков, Віктор Талабірчук, 2017

**The possibility of synthesis of heat-resistant steels metallothermy are set as a result of theoretical and experimental work. The influence of the method of synthesis on metallothermic features of the microstructure and phase composition of the thermite steel was found. The mechanical and service properties and their dependence on temperature and the effect on the properties of the alloy grain thermite metal are set for thermite synthesized analogues of industrial heat-resistant steel grades “40X15H7Г7Ф2МС” and “37X12H8Г8МФБ”.**

**Keywords - metallothermy, termite, synthesis, properties, heat-resistant steel**

В результаті проведених теоретичних та експериментальних робіт встановлена можливість синтезу жароміцних сталей металотермією. Виявлено вплив металотермічного методу синтезу на особливості мікроструктури і фазового складу термітних сталей. Встановлені для синтезованих термітних аналогів промислових марок жароміцних сталей 40X15H7Г7Ф2МС та 37X12H8Г8МФБ механічні та службові властивості, їх залежність від температури та вплив зерна сплаву на властивості термітного матеріалу.

**Ключові слова - металотермія, терміт, синтез, властивості, жароміцні сталі**

### Вступ

На сучасному рівні розвитку машинобудівної продукції особливу увагу приділяють властивостям матеріалів, які задовольняють жорстким вимогам експлуатації деталей. Одним з прикладів такого матеріалу є жароміцні сталі 40X15H7Г7Ф2МС та 37X12H8Г8МФБ, які мають комплекс високих механічних та службових властивостей, можуть використовуватися для виготовлення корпусів газових турбін, малих турбінних дисків масою від 50 кг до 1 т, бандажних кілець, екранів та деталей для кріплення. Особливістю цих сплавів є вміст вуглецю у межах 0,3-0,6%, який взаємодіючи з Cr, W, V та Nb утворює зміцнювальну дисперсну карбідну фазу [1,2].

Одночасно, добре відомо, що використання металотермічних методів для синтезу матеріалів дозволяє отримувати практично будь-який литий сплав у технологіях, які мають безперечні переваги для особливих умов литва.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Синтез литих сплавів металотермічними методами можна проводити при відсутності потужних джерел електроенергії, складного обладнання для традиційного плавлення сплаву та його заливки, без застосування вакуумних пристроїв для проведення процесу синтезу, забезпечуючи високу продуктивність та швидкість технологічного циклу [2-5]. У найпростішому варіанті металотермією синтезують сплав у футерованому ливарному ковші.

Не в останню чергу перевагою металотермічного процесу є можливість використання відходів термічного, ливарного та металорізального виробництва (залізної окалини, млива алюмінієвої стружки, відсіву лігатур, пилу з повітряних фільтрів у ливарних цехах, млива недопалених частин графітових електродів та ін.). Важливо відмітити, що термітний сплав може використовуватися не тільки для отримання виливків, але і для проведення термітного зварювання, виконання екстрених ремонтних робіт тощо [6].

### Мета роботи

Дослідження механічних та службових властивостей жароміцних термітних сталей марок 40X15H7Г7Ф2МС та 37X12H8Г8МФБ з карбідним зміцненням методами металотермічного синтезу з використанням усіх переваг цього процесу.

### Завдання роботи

1. Встановити можливість синтезу термітних жароміцних сталей з карбідним зміцненням.
2. Виявити механічні властивості термітних сталей – аналогів промислових марок 40X15H7Г7Ф2МС та 37X12H8Г8МФБ та характер їх залежності від температури.
3. Встановити тривалу міцність синтезованих сплавів при температурах 600–700°C та вплив на неї різних типів середовищ.
4. Виявити вплив зернистості синтезованого термітного матеріалу на його властивості.

#### Вихідні матеріали і методика приготування екзотермічної суміші

Для компонування металотермічної шихти використані матеріали: порошок алюмінію марок ПА-3–ПА-4 ГОСТ 6058-73 (або просіяне мливо алюмінієвої стружки), хром металевий ГОСТ 5905-79; ферохром ФХ65-7А ГОСТ 47570-79; силікокальцій С40Л10 ГОСТ 4762-71; силікомарганець СМн26 ГОСТ 4756-77; феросиліцій ФС65Ал3,5 ГОСТ 1415-78; феромарганець ФМн70 ГОСТ 4761-80; сажа ацетиленова (технічний вуглець ТУ 14-7-24-80); порошок титановий хімічний ПТХ-1, ПТХ-2 ТУ 48-10-78-83; порошок хрому ПХ-1, ПХ-2 ТУ 14-1-14-77-75; залізна окалина (ковальського і прокатного виробництва) з середнім хімічним складом (% за масою): 0,05 С; 0,10–0,35 Si; 0,10–0,35 Mn; 0,01–0,03 S; 0,01–0,03 P; 40–50 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 50–60 FeO.

Порошкова шихта просушувалася при температурі 150–180°C, змішувалася, а після цього розмішувалася і ущільнювалася у металотермічному реакторі [7] діаметром 80 мм з різним процентним співвідношенням компонентів у суміші. Для визначення маси металевого зливка і виходу сплаву з шихти були проведені мікроплавлення. Ініціювання процесу горіння виконувалося спеціальним титановим запалом виготовленим з титанового порошку.

Для покращення шлаковідділення у шихту при отриманні залізвуглецевих сплавів додавався польовий шпат (CaF<sub>2</sub>).

У дослідженнях використовували порошоків інгредієнти металотермічних шихт, частка з яких виготовлялася з відходів ливарного, ковальського та металорізального виробництва (залізна окалина, просіяне мливо графітових електродів, мливо алюмінієвої стружки та ін.). Шихта попередньо розраховувалася за стехіометричним співвідношенням компонентів реакції [8], а у подальшому враховували засвоєння окремих компонентів реакції за допомогою відповідних коефіцієнтів.

Після процесу синтезу відділяли сплав від шлаку, оцінюючи структуру шлаку, і проводили контрольне зважування та встановлення величини виходу металу з шихти, досліджували синтезований злинок.

#### Теоретичні основи синтезу

Після встановлення складу шихти за стехіометричними коефіцієнтами хімічної реакції та корекції її коефіцієнтами засвоєння компонентів шихти проводили розрахунок адіабатичної температури горіння металотермічної реакції ( $T_a$ ) та теплового ефекту реакції ( $Q_p$ ) [8]. При проведенні розрахунків з встановлення адіабатичної температури горіння шихти за існуючими методиками не враховували сублімацію алюмінію, що дає незначну похибку встановлення  $T_a$  та  $Q_p$ . Температури реагування суміші повинні бути із врахуванням тепловідводу достатні для плавлення складових реакції і її продуктів ( $T_{пл(FeO)} = 1640 K$ ;  $T_{пл(Fe_3O_4)} = 1810 K$ ;  $T_{(Al)} = 830 K$ ;  $T_{пл(Fe)} = 1800 K$ ;  $T_{(Al_2O_3)} = 2320 K$ ).

Розрахунок  $T_a$  зрозуміло не враховує тепловтрати у процесі горіння, а також повноту перетворення реагентів у продукти реакції.

Враховуючи умову розрахунку, що все тепло витрачається на нагрівання шихти, тобто ентальпії вихідних і кінцевих продуктів однакові, знаходимо:

$$\sum_{i=1}^m (H(T_a) - H(T_o)) = Q, \quad (1)$$

де  $T_o$  – початкова температура шихти;  $Q$  – тепловий ефект реакції;  $H(T_a)$  та  $H(T_o)$  – ентальпії при температурах  $T_a$  і  $T_o$ ;  $m$  – кількість продуктів реакції.

У складніших рівняннях при утворенні більше ніж трьох продуктів реакції  $T_a$  знаходиться за формулою:

$$T_a = \frac{Q - \sum H_i(T_{плі}) - \sum L_i + \sum C_{ip} \cdot T_{плі}}{\sum C_{pi} \delta}, \quad (2)$$

де  $C_i$  та  $L_i$  – теплоємність і теплоти плавлення продуктів реакції відповідно.

Зрозуміло, що, з причин відсутності повної таблиці даних залежностей  $C$  від  $T$  при високих температурах [2,8], проводилася екстраполяція значень у відповідності до встановленої залежності:

$$C_{mв(T_{пл})} = 7n \cdot k \text{ (Дж/моль} \cdot \text{град)}, \quad (3)$$

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

Зазначимо, що у змодельованій задачі термодинамічна модель втрати тепла враховує макрокінетичну теорію горіння при якій

$$T_a = T_{nлt} + \frac{Q - L - \Delta H(T_{nлt})}{C_{pi} \delta}, \quad (4)$$

де  $Q$  та  $L$  – відповідно теплота утворення і теплота продукту;  $Q$  – тепловий ефект реакції;  $\Delta H(T_{пл})$  – різниця ентальпій вихідних і кінцевих продуктів;  $C_{pi} \delta$  – теплоємність рідкого продукту незалежно від температури.

Помилку, пов'язану із екстраполяцією, оцінюють в сто градусів.

#### Експериментальні роботи

У відповідності до мети та задач дослідження авторами було отримано зливки синтезованої термітної жароміцної сталі типу 40X15H7Г7Ф2МС та 37X12H8Г8МФБ. З виливків вирізано трєфи та встановлено механічні властивості сталей (див. табл. 1).

Таблиця 1.

#### Механічні властивості жароміцних термітних сталей з карбідним зміцненням

Марка термітної сталі	НВ	Механічні властивості				Тривала міцність			
		$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$	$a_{нл}$ , МПа	T, °C	$\sigma$ , МПа	Час до руйнування, год.
		МПа		%					
40X15H7Г7Ф2МС	255-330	910-980	640	14	15	-	600	145	80
37X12H8Г8МФБ	281-321	865	610	16	21	25	650	370-385	110

Результати дослідження механічних властивостей від температури, а саме границі міцності ( $\sigma_b$ ), умовної границі текучості при допуску на пластичну деформацію 0,2% ( $\sigma_{0,2}$ ), тривалої міцності ( $\sigma_{100}$ ) показані на рис. 1 (а та б), а відносних видовження ( $\delta$ ) та звуження ( $\psi$ ) – на рис. 1 (в та г).

Послідовне збільшення температури призводить до зменшення всіх вказаних показників міцності і збільшення  $\delta$  та  $\psi$  для термітних аналогів 40X15H7Г7Ф2МС та 37X12H8Г8МФБ. Виявлено, що найбільш інтенсивно зменшується  $\sigma_b$  для 40X15H7Г7Ф2МС в діапазоні температур від 500 до 800°C – на 450 МПа. В той же час зміна температури від 500 до 700°C призведе до зменшення  $\sigma_b$  для сталі 37X12H8Г8МФБ всього на 150 МПа.

Аналіз відносного звуження та видовження зразків термітних сталей показав, що зміна температури від 500 до 800°C збільшує  $\delta$  для термітної сталі 40X15H7Г7Ф2МС в два рази, а  $\psi$  – на 24%. Для термітної сталі 37X12H8Г8МФБ зміна  $\delta$  відбувається тільки на 3% в діапазоні температур 500-700°C, а відносне звуження коливається у межах 18-23% в діапазоні температур 500-750°C. Це пов'язане із специфічним розміщенням, величиною та типом карбідів Cr, W, V та Nb у сталі 37X12H8Г8МФБ, які відрізняються близькою до сферичної формою та рівномірним дрібнодисперсним їх розподілом у структурі сталі.

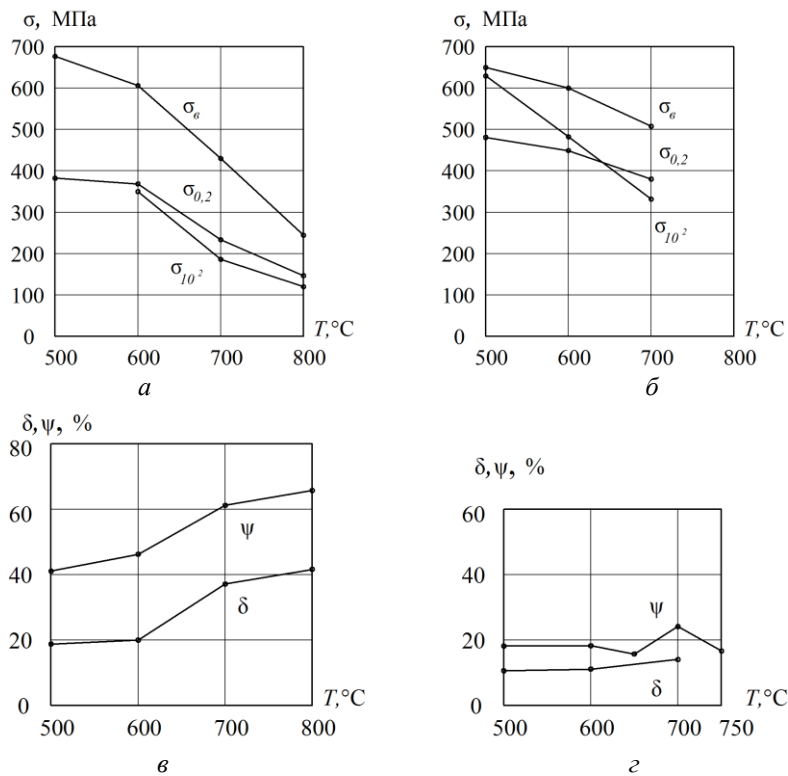


Рис. 1. Залежність механічних властивостей термітних сталей, аналогів 40X15H7Г7Ф2МС та 37X12H8Г8МФБ від температури: границя міцності ( $\sigma_{в}$ ), умовна границя текучості при допуску на пластичну деформацію 0,2% ( $\sigma_{0,2}$ ), тривала міцність ( $\sigma_{10^2}$ ) – а та б, відносні видовження ( $\delta$ ) та звуження ( $\psi$ ) – в та г

Дослідження тривалої міцності термітних сталей 40X15H7Г7Ф2МС та 37X12H8Г8МФБ, показана на рис. 2. Очікувано, що значення  $\sigma$  отримані у повітряному середовищі на 15-25% вищі, ніж у паровому середовищі.

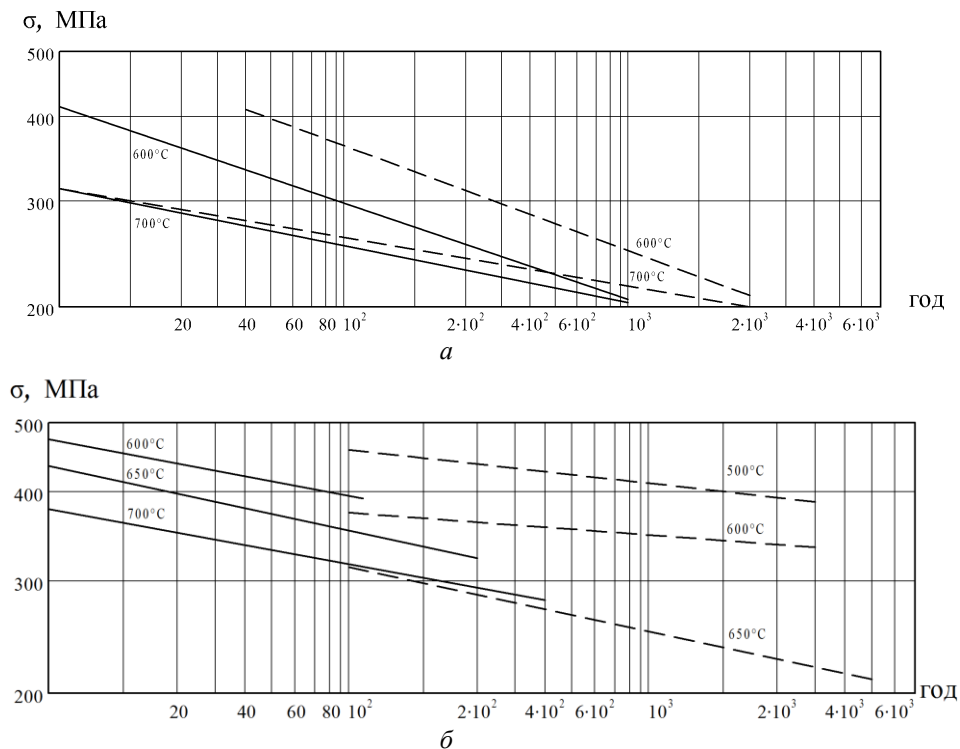


Рис. 2. Тривала міцність термітних сталей 40X15H7Г7Ф2МС (а) та 37X12H8Г8МФБ (б) при різних температурах (пунктиром показано залежності отримані у середовищі повітря, суцільна лінія – середовище пари)

Карбіди не суттєво міняють свої властивості для термітної сталі 37X12H8Г8МФБ у межах 500-800°C, а кількість їх у 4 рази більша ніж у термітній сталі 40X15H7Г7Ф2МС. Серед карбідів об'ємна частка, яких найбільше впливає на властивості термітної сталі слід звернути увагу на карбіди хрому ( $Cr_{23}C_6$ ) та ванадію (VC). При високих температурах ці карбіди входять, як окрема фазова складова у порівняно однорідний за об'ємом твердий розчин, який при зменшенні температури розпадається з утворенням додаткових карбідних фаз різної дисперсності.

Тривала міцність сталей при дослідженні у двох типах середовища (повітрі та воді) в діапазоні температур 200-500°C виявляє її послідовне зменшення у залежності від часу проведення експерименту. Так зменшення  $\sigma$  термітної сталі 40X15H7Г7Ф2МС для часу  $4 \cdot 10^2$  год. складає  $\sim 120$  МПа у воді та 140 МПа на повітрі, а для термітної сталі 37X12H8Г8МФБ така ж зміна  $\sigma$  складає  $\sim 180$  МПа у воді при проведенні експерименту на протязі  $5 \cdot 10^3$  год. та 120 МПа на повітрі.

Тривала міцність та експлуатаційні властивості сталі залежні від величини зерна та однорідності структури деталі. Тому особливо важливо витримувати заданий режим охолодження термітної сталі для отримання дрібнодисперсної однорідної структури. Вироби з термітної дрібнодисперсної сталі мають більшу стійкість при експлуатації. Продовження експериментальних робіт було направлено на встановлення впливу величини зернистості термітної сталі на  $\delta_{10}$ ,  $\psi$  та час до руйнування (табл. 2).

Таблиця 2.

**Тривала міцність термітної сталі 37X12H8Г8МФБ з різним типом зерна при 650°C**

Величина зерна, мм	$\delta_{10}$	$\psi$	Час до руйнування в год. зразків	
	%		гладких	з надрізом ( $r=0,5$ мм)
Дрібнодисперсний	2,8	5,5	171	165
0,5-1,0	1,7	4	163	63
1,5-2,0	1,4	4	76	56
3-5	1,9	3,8	41	37

В табл. 2 показано вплив зерна на механічні властивості термітної сталі 37X12H8Г8МФБ. У залежності від типу зразка (гладкий або з надрізом) встановлено, що збільшення зерна до 3-5 мм призводить до зменшення майже в 4 рази часу до руйнування зразка.

**Висновки**

1. Встановлено, що металотермічні методи можуть успішно використовуватися для синтезу термітних жароміцних сталей, аналогів промислових марок 40X15H7Г7Ф2МС та 37X12H8Г8МФБ. 2. Виявлені механічні властивості вказаних марок матеріалів та вплив на них температури вказують на те, що термітні сталі можуть успішно замінити промислові марки сталей. 3. Встановлена тривала міцність термітних сталей 40X15H7Г7Ф2МС і 37X12H8Г8МФБ у паровому середовищі та на повітрі. 4. Виявлено вплив зернистості матеріалу на механічні та службові властивості сталі 37X12H8Г8МФБ.

1. Солнцев, Ю. П. *Материаловедение [Текст]* / Солнцев Ю. П., Пряхин Е. И. — М. : Химиздат, 2007. — 784. 2. Жигуц, Ю. Ю. *Сплавы, синтезовани металотермією і СВС-процесами [Текст]* / Ю. Ю. Жигуц. — Ужгород : Гражда, 2008. — 276 с. 3. Жигуц, Ю. Ю. *Технологія виробництва термітного високопрочного чугуна* / Ю. Ю. Жигуц, В. Ф. Лазар, Л. І. Косюк // *Міжн. збірн. наук. праць. «Прогресивні технології і системи машинобудування».* Донецький нац. техн. ун-тет. — 2012. — № 1,2 (43). — С. 142-147. 4. Жигуц, Ю. Ю. *Синтез термітних кавітаційностійких сталей [Текст]* / Ю. Ю. Жигуц // *Восточно-европейский журнал передовых технологий. Прикладная физика и материаловедение.* — 2013. — №1/5 (61). — С. 4-6. 5. Жигуц, Ю. Ю. *Технологія отримання термітних суднобудівних сталей [Текст]* / Ю. Ю. Жигуц // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. Збірник наукових праць.* — 2012. — № 3 (28). — С. 283-286. 6. Жигуц, Ю. *Ресурсозберігаюча технологія термітного зварювання сталевих деталей [Текст]* / Ю. Жигуц, В. Лазар // *Вісник ТДТУ.* — 2009. — Т. 14, № 4. — С. 94-98. 7. *Металотермічний реактор [Текст] : пат. 20045 Україна: МПК В22С9/00* / Жигуц Ю. Ю., Скиба Ю. Ю., Крайняй І. І. ; заявник і патентовласник Ужгородський національний університет. — № u200606530. заяв. 13.06.06; опубл. 15.01.07, Бюл. №1. — 6 с. 8. Жигуц, Ю. Ю. *Методика розрахунку складу екзотермічних шихт на основі термохімічного аналізу [Текст]* / Ю. Жигуц, В. Широков // *Машинознавство.* — 2005. — № 4. — С. 48-50.