

УДК 620.22: 669.017

## ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗАСНОВАНІ НА КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСАХ

ЖИГУЦЬ Ю. Ю.<sup>1</sup>, ЛАЗАР В. Ф.<sup>2</sup>, ХОМ'ЯК Б. Я.<sup>2</sup>

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»<sup>1</sup>

Мукачівський державний університет<sup>2</sup>

Робота присвячена розв'язанню актуальної науково-технічної проблеми, а саме, розробці фізико-металургічних і методологічних основ формування структури і фазового складу сплавів, синтезованих комбінованими процесами, які складаються з металотермічної стадії і СВС (само поширюваний високотемпературний синтез). Досліджені сплави, синтезовані металотермією і СВС, розроблено теоретичні основи синтезу, встановлено зв'язки між структурою сплавів, властивостями і характеристиками металотермічної шихти. Окрім цього, розроблено наукові основи регулювання властивостей сплавів синтезованих екзотермічними процесами з використанням металотермії і СВС. На основі дослідження впливу і умов синтезу, різних технологічних чинників розглянуті способи синтезу, які дозволяють набувати кращих властивостей матеріалу, ніж у матеріалів, виготовлених традиційними технологіями. Встановлено закономірності формування фазової складу і структури сплавів, отриманих за допомогою комбінованих процесів. Проведений пошук оптимальних структур сплавів, які задовольняють заданим службовим і технологічним властивостям матеріалів. Виявлено близькості фазового складу і структур синтезованих сплавів.

У роботі представлено результати дослідження термічних сплавів, їх механічні і службові властивості, хімічний склад. Оптимізовано склад металотермічної шихти і технології синтезу цих сплавів. Дослідження проводилися з високолегованими сталями (110Г13л, 110Г12л), інструментальними і надкорізальними сталями (Р18л, Р12л, Р9л, Р6М3л, Р9К5л, Р10К5Ф5л), спеціальними чавунами (ЖЧХ25Н, ИЧХ12Н4, ИЧХ12М, ЖЧХ-08, ЖЧХ-1,5, ЖЧХ-2,5 та ін.), кольоровими сплавами (БрОЦС 5-5-5, БрАЖ10-4), синтезованими комбінованими процесами. Встановлені закономірності структуроутворення в литих сплавах у залежності від хімічного складу, способу проведення плавлення і дисперсності інгредієнтів.

**Ключові слова:** властивості матеріалів, металотермія, СВС, комбіновані процеси, термічні сплави, структура, технологія.

**Постановка проблеми.** Прогрес у машинобудуванні, випереджаючий розвиток нових форм виробництва, умови одиничного та дрібносерійного виробництва сучасних ремонтних та відновлювальних технологій вимагають застосування сплавів із необхідним комплексом фізико-механічних та експлуатаційних характеристик і прогресивних технологій їх отримання. Особливо гостро це відчувається в Україні у зв'язку із дефіцитом багатьох легувальних елементів.

Аналіз даних показав, що одним з перспективних шляхів для покращення технологічних та службових властивостей матеріалів, розширення їх функціонального призначення є створення матеріалів із композитною структурою, отриманою за допомогою комбінованих процесів, які поєднують в собі металотермію і самопоширюваний високотемпературний синтез (СВС). На сьогодні покращення властивостей матеріалів досягають, переважно, використанням традиційних технологій отримання матеріалів та подальшою термічною, хіміко-термічною та іншими способами обробки. Але їх висока енергоємність, необхідність поєднання декількох технологічних етапів, дотримання екологічних вимог приводять до потреби пошуку інших шляхів надання необхідних властивостей матеріалам та синтезу нових матеріалів інколи з унікальними властивостями, які дають змогу уникнути наведених недоліків. Одним із таких перспективних шляхів може бути використання способу отримання матеріалів із застосуванням сильноекзотермічних реакцій [1,2].

Загальні основи металотермічного та СВС-процесів були закладені давно, але тільки останнім часом з'явилися умови для вирішення проблеми формування структури і фазового складу сплавів з покращеними властивостями, синтезованих

новими прогресивними комбінованими (СВС+металотермія) технологіями. До початку цих досліджень проблемам СВС-процесів, металотермії та створення оптимальних структур при синтезі присвячено ряд досліджень, проведених Боровинською І.П., Жуковим А.О., Мержановим А.Г. та ін. [1-4], але системний науковий підхід до формування структури і встановлення технологічних особливостей синтезу сплавів комбінованими процесами відсутній. Крім цього, вплив комбінованих процесів на структуроутворення, фазовий і хімічний склад синтезованих матеріалів і їх властивості вивчено недостатньо, а даних щодо закономірностей зв'язку між показниками різних властивостей цих матеріалів немає.

Відсутність цього комплексу закономірностей і даних не дозволяє здійснити цілеспрямований вплив на структуру і фазовий склад синтезованих сплавів, які забезпечують покращені властивості порівняно із промисловими технологіями та розробити технології створення прогресивних матеріалів. Враховуючи вищенаведене особливо актуальним стає використання нових матеріалів і технологій, які не вимагають значних змін у існуючих технологічних процесах.

**Мета дослідження.** У зв'язку із вказаним вище дослідження авторів направлені на вирішенню надзвичайно важливої і актуальної науково-технічної проблеми – створення наукових основ формування структури і фазового складу литих сплавів із покращеними механічними, службовими та технологічними властивостями та розробка за рахунок цього конкурентоздатних технологій шляхом комбінування металотермічних і СВС-процесів.

**Методи дослідження.** Для проведення термітних та комбінованих плавлень необхідно, враховувати термодинамічний стан створених систем. Використання методів геометричної термодинаміки дає можливість обійти такі проблеми як складність експериментального встановлення показників стану компонентів під час проходженні фронту горіння при термітному або самопоширюваному високотемпературному синтезі.

На основі стехіометричного співвідношення компонентів реакції встановлювався склад шихти, який перевірявся за термодинамічними параметрами. За браком даних для встановлення фазового складу сплавів при синтезі, що пов'язано із високими температурами у зоні горіння (адіабатичні температури горіння металотермічної суміші на основі залізовуглецевого терміту перевищують 2100 К, а, наприклад, на основі оксидів хрому – 6300 К) розроблено теоретичні методи, які придатні для прогнозування фазового складу сплавів і таким чином моделюють його структуру.

Досліджувалися різні сплави – термітні аналоги звичайним вуглецевим сталям, низько- та середньолегованим сталям 20ГЛ, 30ГСЛ, 32Х06Л–40ХЛ, 20Х5МЛ та ін., сірим та високоміцним чавунам СЧ30, ВЧ45, спеціальним чавунам СЧХН10А та ін. Для вказаних матеріалів виконувався мікроструктурний аналіз на металографічних мікроскопах при збільшенні до 1350 разів, проводилися механічні випробовування на розтяг із встановленням границі плинності, границі пружності із залишковою деформацією 0,02, границі міцності, пластичності за показниками відносного видовження і звуження за ГОСТ 1215-59, встановлювали твердість за методами Брінелля, Роквелла та Віккерса за ГОСТ 9012-59, ударна в'язкість, зношуваність на спеціальному пристрої НГО "НАТУ" для випробування матеріалів на зносостійкість в умовах поступального руху і абразивного зношування. Інструментальні сплави типу аналогів литих твердих сталей і карбідосталі, синтезовані комбінованими процесами, досліджувались металографічно і за допомогою електронної мікроскопії на електронному мікроскопі типу СЕМ "Кэмскан" серії 4DV з комп'ютером системи "Линк-860", твердотільним детектором і спектрометром фірми "Мікроспек" моделі WDX-2A, визначалися також мікротвердість, бал зерна, теплостійкість на пристрої

IT-Лямбда-400 в інтервалі температур 25–300°C, зношуваність та інші властивості.

Термохімічні розрахунки проводилися за спеціально розробленою методикою визначення розрахункової адіабатичної температури горіння шихти ( $T_a$ ) [1,3]. Враховуючи умову розрахунку, що все тепло витрачається на нагрів шихти, тобто ентальпії ( $H$ ) вихідних продуктів і кінцевих однакові, знаходимо:

$$\sum_{i=1}^k (H(T_a) - H(T_0))_i = Q, \quad (1)$$

де  $T_a$  – адіабатична температура горіння;  $T_0$  – початкова температура;  $Q$  – тепловий ефект реакції;  $i$  – кількість продуктів реакції.

У подальшому, враховувалися встановлені у роботі експериментальні коефіцієнти засвоєння окремих елементів шихти. Після корекції хімічного складу і компонування, шихту просушували при температурі 120–180°C на протязі однієї години, а після перемішування засипали у графітовий або футерований металевий тигель об'ємом  $\sim 2 \cdot 10^5$  мм<sup>3</sup>, ущільнювали і підпалювали титановим запалом. Процес синтезу тривав декілька десятків секунд. Надалі відділяли метал від шлаку, оцінюючи структуру шлаку, і проводили контрольне зважування та встановлення величини виходу металу з шихти, виконували дослідження синтезованого зливку. Третій етап полягав у корекції складу шихти за рахунок введення відповідних феродомішок (феромарганцю, ферохрому та ін.), які доводять хімічний склад сплаву до завданого.

**Експериментальна частина.** Основна увага авторів була зосереджена на опрацюванні теоретичних результатів дослідження, виявленні і застосуванні результатів на конкретних сплавах, що синтезувалися за допомогою комбінованих процесів з метою отримання підвищених технологічних і службових властивостей.

Розглядалися такі класи матеріалів: 1) сталі (малолеговані, високолеговані марганцеві), 2) чавуни (сірі, спеціальні, зносостійкі, що використовуються при підвищених температурах, високоміцні), 3) інструментальні термітні матеріали (вуглецеві інструментальні, швидкорізальні сталі, тверді сплави і карбідосталі, синтезовані в результаті комбінованих процесів, 4) термітні мідні сплави.

**Термітні сталі.** Авторами було розроблено технологію одержання різних класів вуглецевих сталей в результаті алюмінотермічного відновлення залізної окалини із введенням у терміт додаткововуглецю та феросплавів. Перші спроби дозволили отримати вуглецеву конструкційну термітну сталь, аналог за хімічним складом промислової марки Сталь 45. Твердість феритної фази складала 2,85–2,97 ГПа, а перлітної знаходилася у межах 3,8–4,4 ГПа. Дані аналізу механічних властивостей і мікроструктури дозволяють зробити висновок, що отримана термітна сталь навіть відрізняється за цими параметрами ніж ординарна ливарна [5].

**Високолеговані термітні марганцеві сталі.** Недоліком існуючих складів екзотермічних сумішей для синтезу сталей є неможливість їх використання для виготовлення виливків з легованих сталей – введення лігатури у шихту викликає надто низькі температури її горіння, інколи, навіть, недостатні для розділення шлакової і металевої фаз. Для досягнення мети дослідження були використані у складі металотермічної шихти пус'єри (пил), що вловлюються фільтрами з диму, який виділяється з дугової сталеплавильної печі у процесі плавлення високомарганцевої сталі. Ці пус'єри мають хімічний склад (в мас. %): перекис марганцю 35–40, оксид вуглецю 15–25, оксид кальцію 4–7, інші сполуки – решта. Даний хімічний склад пус'єра дозволяє скласти на їх основі екзотермічну суміш, здатну самовільно горіти із утворенням рідкої сталі типу 110Г13Л, 110Г12Л. Відповідні термохімічні розрахунки із врахуванням коефіцієнтів засвоєння компонентів шихти були проведені на початку

експерименту. В результаті запропоновано склад екзотермічної суміші (у мас. %): залізоалюмінієвий терміт 70–76; пус'єри 20,5–25; алюмінієвий порошок або стружка 3,0–4,3; порошок вуглецю 0,5–0,7.

В результаті проведених робіт вдалося отримати і дослідити виливки масою 5,5 кг з високолегованої термітної сталі виготовленої із використанням відходів металургійного виробництва. Синтезована сталь мала високі механічні та технологічні властивості (табл. 1) і аустеніто-мартенситну структуру до термообробки. У продовженні вказаних досліджень у дослідно-промислових умовах були використані пус'єри при виплавлянні сталі 110Г13Л.

Таблиця 1.

**Хімічний склад та фізико-механічні властивості<sup>1</sup> термітної сталі – аналога промислової марки 110Г13Л, отриманої в результаті термітних плавлень**

Елементи	C	Mn	Si	S	P	Питома маса, кг/м <sup>3</sup> (×10 <sup>-3</sup> )	σ <sub>b</sub> , МПа	δ	ψ	KCU, МДж/м <sup>2</sup>	Лінійна усадка, %	HB
Вміст, %	0,95-1,00	12,2-12,7	0,5-0,6	0,03-0,05	0,08-0,05	7,80-7,81	840-846	27-28	34-37	2,1-2,2	2,1-2,2	195-210

<sup>1</sup>Механічні властивості термітної сталі 110Г13Л після гартування з 1050°C і витримці 1,5 год.

Аналогічно синтезовано і досліджено *високохромисті термітні сталі*. Результати дослідження високохромистих термітних аустенітних неіржавіючих сталей (табл. 2) продемонстрували, що вони кращі промислових за механічними властивостями.

Таблиця 2.

**Механічні властивості неіржавіючих сталей**

№ з/п	Марка сталі	σ <sub>b</sub>	δ	ψ	a <sub>n</sub>
		МПа	%		МДж/м <sup>2</sup>
1	X13	650	20	50	12
2	X13N3	720	18	55	9
3	X14	670	19	55	9

*Спеціальні термітні чавуни. Зносостійкі термітні чавуни.* При синтезі алюмініотермічним способом чавунів у склад шихти вводили оксиди молібдену і вольфраму, які значно підвищують температуру реакції і створюють кращі умови для регулювання процесами синтезу і плавлення. Для всіх високолегованих термітних сплавів можна виявити характерну особливість при компонуванні шихти – необхідність часткової або повної заміни лігатури на оксиди легуючих елементів, що викликано надмірно низькими температурами горіння шихти, недостатніми для плавлення глиноземних та кременистих шлаків. Таким чином, для компонування шихти обмежується, у даному випадку, вміст порошкових феросплавів та металів [6-8]. Структура вищевказаних чавунів складається зі спеціальних карбідів хрому і відповідної феритної, мартенситної або аустенітної матриці. Нами встановлено склад шихти, хімічний склад чавунів і властивості синтезованих марок при кімнатних (табл. 3) та підвищених температурах (табл. 4).

Таблиця 3.

**Механічні властивості термітного чавуну при кімнатній температурі**

Термітний аналог промислової марки	σ <sub>b</sub>	σ <sub>n</sub>	HB
	МПа		
ИЧХ15М3	370–400	510	610–630

Таблиця 4.

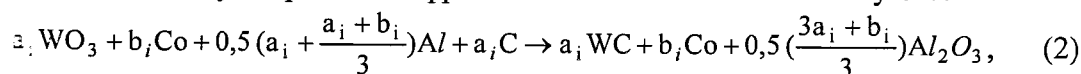
Механічні властивості термітного чавуну при підвищених температурах					
Термітний аналог промислової марки	$\sigma_b$ (МПа) – чисельник, $\delta$ (%) – знаменник при температурі °С				
	500	600	700	800	900
ИЧХ15М3	340	230	130	150	70
	0,5	0,5	1,6	2,4	5,2

Особливістю термітних хромистих чавунів залишається їх схильність до утворення гарячих тріщин, що пояснюється високими температурами заливки, характерними для металотермічного способу отримання сплаву.

Аналогічно синтезовано і досліджено інструментальні сталі – термітні *швидкорізьомі сталі* (аналоги промислових марок Р18Л, Р12Л, Р9Л, Р6М5Л, Р9К5Л, Р10К5Ф5Л).

*Тверді сплави, синтезовані в результаті комбінованих реакцій.* Для отримання необхідного хімічного складу синтезованого твердого сплаву потрібно було врахувати склад порошкової шихти. На першій стадії розрахунок шихти виконували, виходячи із стехіометричного співвідношення за формулою взаємодії вихідних речовин, тобто так, щоб, отримавши заданий хімічний склад вольфрамокобальтового сплаву, одночасно досягнути максимально високої температури взаємодії реагуючих речовин [2]. Мікроструктура синтезованих твердих сплавів виявила два типи карбідів –  $WC$  та  $W_2C$ . Карбіди  $WC$  крупні, гранчастої форми у відмінності від дрібних кулястих карбідів  $W_2C$ . Матриця порівняно рівномірно охоплює карбіди, і залишкової пористості в ній мало, так само, як і вільно розташованого, незв'язаного вуглецю у вигляді графіту. Експерименти показали, що ефективність засвоєння графіту рідким розплавом  $W$  –  $Co$  2–3 рази вища ніж сажі, що пов'язано із її виносом з шихти у процесі горіння. У подальших мікроплавленнях застосовувався тільки графіт, а для здешевлення вартості шихти – просіяне мливо графітових електродів. Для покращення процесу синтезу запропоновано було розігрівати металевий тигель до температури 250–280°C та додати у склад шихти 2–3% плавикового шпату  $CaF_2$ , який підвищував рідкотекучість вольфрамокобальтового сплаву.

Реакцію синтезу твердих вольфрамокобальтових сплавів записують:



де  $a_i$  і  $b_i$  – стехіометричні коефіцієнти.

Так тверді сплави отримано за схемою (2) – для ВК6л (маса зливка – 176,0 г; вихід сплаву з шихти – 41,7%), для ВК4л (маса зливка – 132,5 г, вихід сплаву з шихти – 32,8%), для ВК3л (зливок масою 140,5 г; шлак – 175,5 г, вихід сплаву з шихти – 24,4%). Зростання розміру зерен карбідів у даних литих сплавах призводить до збільшення міцності сплавів і збільшення їх крихкості. Модуль пружності змінюється від 400,0 ГПа для ВК3л до 410,0 ГПа для сплаву ВК25л. Досліджувалися крім фізико-механічних властивостей і різальні властивості синтезованого сплаву, а також стійкість і період стійкості (табл. 5). Отримані дані дозволяють стверджувати, що синтезовані литі тверді сплави можуть застосовуватися для процесу різання, демонструючи властивості кращі, ніж у сплавів, отриманих промисловими методами.

Таблиця 5.

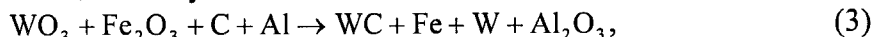
Теплостійкість та період стійкості ( $T$ ) твердого сплаву у залежності від швидкості різання<sup>1</sup> ВКл сплавів

Сплав типу	Теплостійкість, °С	$T$ , хв.		
		30	60	90
ВКЗл	1100	1,3	1,1	1,0
ВК6л	1000	1,2	1,0	0,8
ВК9л	1000	1,1	0,8	0,7

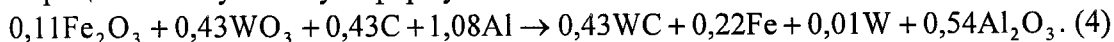
<sup>1</sup>Застосували стандартні пластини для прохідних різців типовиконання 01 ГОСТ 25395-82.

*Литі карбідосталі.* Авторами було досліджено і так звані карбідосталі – новий матеріал, що має структуру, аналогічну вольфрамокобальтовому сплаву, але у відмінності від нього кобальт, використаний як зв'язуюча складова у структурі, замінено на вольфрамову сталь. Приклад розрахунку шихти для сплаву – литої карбідосталі з 85% карбідів вольфраму і 15% зв'язки – вольфрамової сталі з 18% W (аналог сплаву ВК15).

Реакція записується схемою:

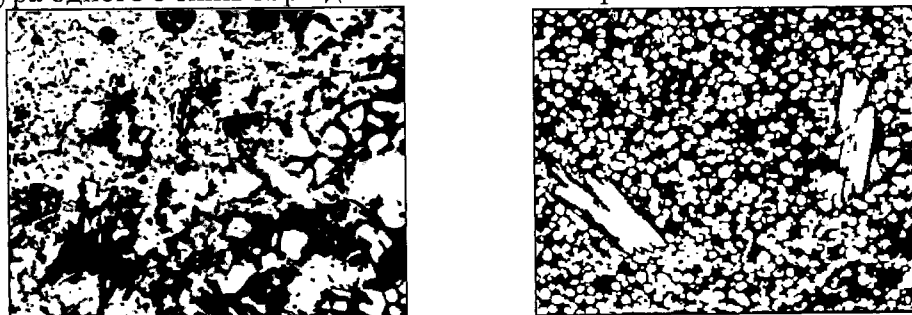


а процес синтезу сплаву – формулою:



Встановимо склад шихти для синтезу карбідосталі В18-15л:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 11,59%,  $\text{WO}_3$  – 65,85%,  $\text{C}$  – 3,41%,  $\text{Al}$  – 19,23%. Для реакції (5) при отриманні карбідосталі В18-15л процент виходу сплаву з шихти складав ~20%. Фактична маса щільного зливка – 19,35 г.

При встановленні марок карбідосталей – порівняно нового матеріалу, що має структуру, аналогічну вольфрамокобальтовим сплавам запропоновано маркування аналогічне маркуванню твердих сплавів і швидкокорізальних сталей, але із вилученням літери К при цьому залишивши кількісний вміст вольфраму, тоді цифрою вказують кількість зв'язки у литому карбідному сплаві. Літера "л" в кінці марки означає спосіб отримання (лиття). Наприклад, для марки В18-15л: зв'язка – вольфрамова сталь В18, що міститься у сплаві у кількості 15 % за масою, решта – литі карбіди вольфраму. Крім цього проводили експериментальне встановлення виходу карбідосталі з шихти. Мікроструктура одного з типів карбідосталі показана на рис. 5.



а

б

Рис. 5. Мікроструктура сплаву: а) В6-15л з дендритною структурою сплаву, б) В18-15л (x250)

На ній чітко виділяються світлим кольором карбіди вольфраму, які при рентгеноструктурному аналізі вдалося ідентифікувати: крупні гранчасті, як карбіди  $\text{WC}$ , а дрібні глобулярні –  $\text{W}_2\text{C}$ . Зв'язка (темний фон) – вольфрамова сталь. Карбідосталь можна отримати не тільки за реакцією (3), але і при заміні кобальту в реакції синтезу оксидами  $\text{CoO}$ ,  $\text{Co}_2\text{O}_3$ , а також вводячи у реакцію мливу стружки сталі

Рис. Дані, отримані в результаті проведеної роботи, підтвердили високі механічні і реологічні властивості литих карбідосталей (див. табл. 6 та 7), що пов'язано не тільки з певною структурою сплаву, але й із способом отримання.

Таблиця 6.

**Особливості хімічного складу і твердість синтезованих сплавів**

Тип сплаву	Вміст елементів, % за масою					Твердість, HV
	C	W	Co	Al	Fe	
Карбідосталь В18-15л	4,2	41,6	–	0,22	решта	1100 1250 <sup>1</sup>
ВК15	5,6	решта	15,1	0,17	–	1100
Сталь P18	1,0	19,2	–	0,20	решта	950 <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Після гартування з 1280°C і потрійного відпуску при 570°C.

Таблиця 7.

**Теплостійкість литих карбідосталей<sup>1</sup>**

№ з/п	Сплав	Теплостійкість, °C
1	В18-6л	1150
2	В9-6л	1110
3	В6-6л	1110
4	В18-10л	1110
5	В6-15л	1020
6	В18-15л	1020

<sup>1</sup>Для стандартних пластин прохідних різців, типовиконання 01 ГОСТ 25395-82.

Проведена робота дозволила дослідити мікроструктури вказаних сплавів і встановити форму і характер розміщення карбідів, а також малу пористість. Дослідження мікротвердості показало, що вона знаходиться для твердої фази синтезованих твердих сплавів у межах 24480–25800 МПа. Виявлено також технологічні особливості підпалу екзотермічної суміші і проведення реакції синтезу (вплив дутерівки, тигля, місця підпалу суміші, наявність корольків у шлаку і їх кількість та ін.).

При отриманні металорізальних різців із синтезованої карбідосталі проводили експерименти з металургійного приварювання сплаву до основи різця. Після швидкого охолодження за рахунок прискореного відводу тепла у холодний метал основа сплаву набуває аустенітно-мартенсито-карбідної структури. Твердість такої карбідосталі досягає HV1400 (14000 МПа).

В результаті проведених досліджень виявлено, що литі тверді сплави і карбідосталі, синтезовані комбінованими способами, успішно можуть замінити тверді вольфрамокобальтові сплави, отримані промисловими методами. Їх твердість знаходиться у межах 90–94 HRA.

В роботі синтезовано термітні спеціальні валкові чавуни при усуненні відбіленого шару за рахунок використання двокамерного пристрою і введення лігатури залізо-силіцій-магній-рідкісноземельні метали (наприклад церій) після завершення процесу алюмінотермічного плавлення. Експериментальні роботи з впровадження використання термітного чавуну в технології термітних додатків у виробництво прокатних валків виконувалися в декілька етапів. Метою експерименту було відпрацювання технології термітних додатків у дослідно-промислових умовах. У ході експериментів вирішувалися такі завдання: оцінити залежність величини зони локалізації усадкових дефектів у додатку від кількості металотермічної шихти і підтвердити можливість зменшення додатку вилівка з валкового чавуну; в'яснити можливий вплив вказаної технології на якість сплаву піддодаткової зони.

Попередні дослідження дозволили обґрунтувати теоретичні методи прогнозування умов фазоутворення при синтезі термітних чавунів, аналогічних за складом і структурою промисловим. Таким чином, хімічний склад отриманих чавунів практично відповідав розрахунковому за виключенням сірки і фосфору, вміст яких не коригувався.

Форма кулястого графіту забезпечували у чавуні введенням в шихту модифікатора ЖКМК-1, що вміщує 41% *Si*, 12% *Ca*, 9% *Mg*, 8% РЗМ. Залізна окалина, що застосовувалася для приготування шихти, мала хімічний склад: 0,1% *C*, 0,15% *Si*, 0,1% *Mn*, 0,01% *S*, 0,03% *P*, 50–55% *Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*, 40–45% *FeO*. За результатами аналізу даних були проведені експерименти на моделі верхньої півформи додаткової частини прокатного валка, а саме: на циліндричному виливковій Ø 130 і висотою 400 мм, загальною масою 40 кг. У піщано-глинистих формах було отримано п'ять виливків з валкового чавуну одного виплавлення з тією різницею, що в одному випадку чавун модифікували лігатурою ЖКМК-1 для отримання у структурі кулястого графіту, один з виливків був контрольним, а в інші три, після заливки сплаву у форму, закладали металотермічну шихту у кількості 50%, 100% і 150% від розрахованої порції.

Експериментальні виливки отримано із сірого чавуну СПХН такого хімічного складу (% за масою): *C* – 3,35; *Si* – 0,8; *Mn* – 0,5; *Cr* – 0,5; *Ni* – 1,2; *P* менше 0,1; *S* менше 0,05. У подальшому застосовувався спеціальний склад металотермічної шихти: залізоалюмінієвий терміт 86,7–86,8%, вуглець 5,6–5,7%, феросиліцій (75%-ний) – 1,2%, феромарганець (70%-ний) – 1,0%, ферохром (65%-ний) – 1,0%, нікель порошковий – 4,3%.

Збільшення кількості термітної суміші призводить (за результатами хімічного аналізу, дослідженням пористості, густини виливка) до зміни форми усадкової раковини від витягнутої з розгалуженнями до виду чаші з малою кількістю усадкових пор. За аналогічною схемою проведено експериментальні плавлення для високоміцних чавунів марок СПХН-42 (хімічний склад аналогічний чавуну марки СПХН-42 за виключенням додатково введенного *Mg* – 0,1%). У склад екзотермічної шихти вводили: вуглець 5,6–5,7%, модифікатор ЖКМК 1-10-12 (з *Mg* – 5,3%).

Механічна обробка валків засвідчила відсутність усадкових дефектів (пор, раковин) і незначне, у межах допустимого, відхилення за хімічним складом матеріалу шийки валка (табл. 8). Це свідчить про достатність розігріву ливарного додатку, який забезпечується направленим тепловідводом і підпитуванням рідким термітним сплавом виливка.

Таблиця 8.

Хімічний склад досліджуваного валка

Місце проби	Вміст елементів, % за масою							
	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Mg</i>
Шийка валка	3,42	0,88	0,75	0,10	0,11	0,92	0,67	0,07
Нижня частина додатку	3,42	0,83	0,70	0,08	0,10	0,89	0,52	0,06
Верхня частина додатку	3,36	0,81	0,64	0,06	0,06	0,33	0,25	0,04

У мікроструктурі поверхні чавунного валка відбілу не виявлено. Зона ливарного додатку складалася з високоміцного чавуну з кульками графіту ГФ9–ГФ12 (ГОСТ 3443-87). Механічна обробка усадкових дефектів для шийок валків не виявила. Хімічний аналіз показав ідентичність хімічного складу тіла валка і додатку.

Це відкриває значні перспективи для економії сплаву при литві важких та середніх валів. Аналіз показує, що синтезовані термітні сплави дозволяють отримувати виливки з валкового чавуну як з пластинчастим, так і з кулястим графітом з одночасним зменшенням зони локалізації усадкових дефектів аж до її практично



повного усунення. При цьому механічні властивості сплаву у зоні під додатком трохи покращуються дорозкисленням сплаву у формі алюмінієм, який вміщується у металотермічній шихті. Мікроструктура отриманих валків за дослідною технологією показана на рис. 6.

Характер змін величини і кількості графітних включень, дисперсності і кількості вільного цементиту, а також твердості за глибиною робочого шару для контрольних і дослідних валків практично співпадають [6].

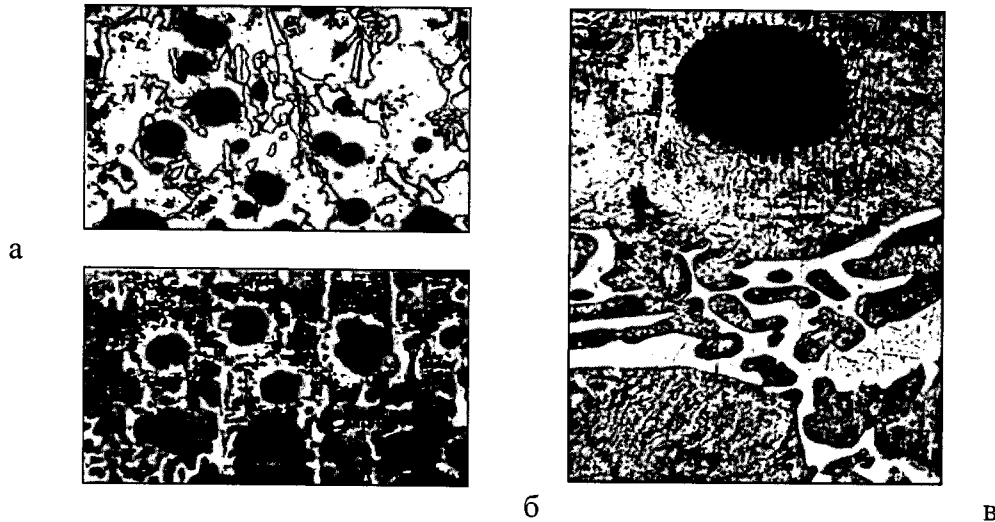


Рис. 6. Мікроструктури чавуну робочого шару валків виготовлених за дослідною технологією: а) валок виконання ССХН-42 (370x900 мм) (x100), б) виконання ССХН-50 (267x356 мм) (x100), в) виконання ССХН-45 (x500). Травлення ніталем

Мікроструктури матеріалу верхньої шийки контрольних і дослідних валків різного виконання також суттєвої різниці не мають, але границя міцності на розтяг матеріалу верхньої шийки валків виготовлених за дослідною технологією на 45–50 МПа вище. Крім цього, при хімічному аналізі матеріалу верхньої шийки дослідних валків виявлено сліди алюмінію.

Комбінована обробка за допомогою лазерного поверхневого зміцнення і СВС. Автори розглянули практичне застосування отриманих сплавів і поверхневе легування і зміцнення залізобуглецевих виливків за допомогою СВС-сумішей. При лазерному поверхневому зміцненні (ЛПЗ) практично весь  $Ti$  взаємодіє за рахунок безкисневого горіння із вуглецем, утворюючи карбід  $TiC$ . Надлишок вуглецю і дуже невелика кількість титану легують залізо, утворюючи рідку сталь евтектоїдного складу, яка в умовах швидкого охолодження перетворюється у тростит в шарах товщиною до 80 мкм.

На рис. 7 показана типова мікроструктура металу у поперечному перерізі зміцненого шару. Товщина легованого шару ~500 мкм. Цей шар складається з ~50% частинок  $TiC$  і ~50% (за об'ємом) металічної зв'язки (сталі типу У8). На цьому ж зображенні видно, що в зоні інтенсивного теплового впливу мікроструктура сталі набула дуже дрібної стовпчастої будови із невеликим нахилом тонких дендритів (які майже не мають гілок) у сторону, протилежну напрямку сканування променем лазера.

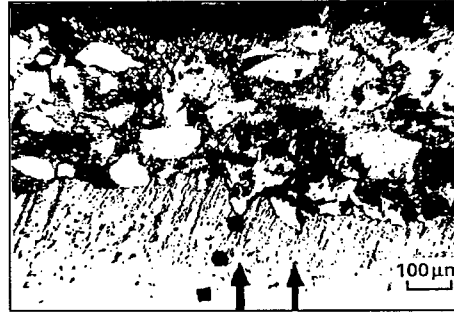


Рис. 7. Мікроструктура зміцненого шару із оплавленими частинками  $TiC$

У напівпроплавленій зоні видно високо тверді ( $\sim 2000 HV$ ) карбіди  $TiC$ , які займають до 50% об'єму всього шару карбідосталі. Проведені дослідження показали, що мікротвердість карбідів  $TiC$  майже у десятки разів вища твердості сталі. Таким чином, вдалося організувати СВС-процес у порівняно тонкому шарі за рахунок використання технології ЛПЗ одночасно для вирішення таких завдань: для нагріву, оплавлення і науглецьовування заліза; для оплавлення частинок  $Ti$  і його "горіння" у вуглеці із утворенням карбідів  $TiC$ . Важливо відмітити, що при вказаному безкисневому горінні ніяких неметалічних фаз і їх включень не утворюється. Зварювання зміцненого шару з основним металом отримується "металургічно", виключаючи необхідність пайки або інших способів з'єднання одного сплаву (наприклад, інструментального) з іншими (наприклад з основою різця).

Суміщення ЛПЗ і СВС у одній операції дозволяє вирішити цілий комплекс технічних завдань по отриманню високотвердих матеріалів типу карбідосталі і твердих сплавів на поверхні металу. Виділення внутрішнього хімічного тепла у СВС-сумішах дозволяє знизити потужність лазерного випромінювання, роль якого зводиться до ініціювання СВС-реакцій і її підтримці у тонких шарах матеріалу. Новий комплексний технологічний процес дозволяє нарощувати зношені поверхні деталей машин, апаратів і приладів на глибину 500 мкм з матеріалів із високими механічними, службовими і технологічними властивостями.

#### **Висновки.**

1. Встановлено закономірності формування структури і фазового складу сплавів, синтезованих комбінованими процесами (СВС+металотермія), що мають покращенні властивості по відношенню до сплавів отриманих промисловими технологіями. Одночасно встановлено оптимальні умови їх отримання і галузі найефективнішого застосування, а саме неспеціалізовані, ремонтні і індивідуальні виробництва.

2. Теоретично розраховано і експериментально здійснено синтез термітних матеріалів: інструментальних вуглецевих, легованих сталей (110Г12Л, 110Г13Л та ін.) і чавунів (включно із спеціальними високоміцними чавунами), а також швидкорізальних сталей, твердих литих вольфрамокобальтових сплавів та литих карбідосталей. Встановлено, що найбільш суттєво на властивості синтезованого матеріалу впливають температурний інтервал між температурою горіння шихти і твердінням виливки, швидкість охолодження, дисперсність інгредієнтів реакції, маса та склад шихти, виявлено вплив умов підпалу на якість отримання зливок. Дослідження властивостей цих термітних сплавів показало, що вони відрізняються від аналогічних традиційних сплавів, а мікроструктури їх бувають суттєво відмінними (як правило, більш дрібнозернистими у синтезованих сплавах). Отримані на підставі проведених досліджень теоретичні положення і практичні рекомендації використані при розробленні сплавів, синтезованих комбінованими процесами, з покращеними службовими і технологічними властивостями та на розробку технологічних процесів їх

синтезу.

3. Проаналізовано широку номенклатуру литих карбідосталей, що відрізняються від традиційних (синтезованих методами порошкової металургії) сплавів литою мікроструктурою та відсутністю залишкової пористості. Рентгеноструктурним дослідженням уточнено фазовий склад синтезованих сплавів і виявлено крупні карбіди вольфраму –  $WC$  і дрібні кулясті карбіди –  $W_2C$ , що входять у карбідосталі до складу м'якої основи швидкорізальної сталі (P12, P9, P6 та ін.). Показано, що при збільшенні вмісту  $W$  у зв'язці твердість карбідосталі зростає до 1100-1250  $HV$ , одночасно із теплостійкістю 1020-1150°C та періодом стійкості при точінні до 285-295 м/хв., а їх твердість знаходиться у межах 90–94  $HRA$ . Досліджені різальні властивості синтезованих інструментальних сплавів.

4. Розроблено ефективну методику розрахунку основних параметрів металотермічної шихти стосовно заготовок прокатних валків і нові технологічні прийоми її введення у додаткову частину форми, що дозволяє збільшити тривалість часу впливу шихти металотермічного додатку на сплав. Встановлено вплив термітного чавуну на структуру, хімічний склад та механічні властивості прокатних валків з чавунів класів СШХН та СПХН при використанні технології термітних ливарних додатків. Аналіз отриманих результатів показує, що отримані виливки з валкового чавуну як з пластинчастим, так і з кулястим графітом мають покращені механічні властивості сплаву у зоні під додатком за рахунок дорозкислення його у формі алюмінієм, який вміщується у металотермічній шихті, одночасно зменшується зона локалізації усадкових дефектів, аж до її практично повного усунення, роздрібнюється його структура, зростає на ~10–20% ударна в'язкість шийки валку і отримується значна економія рідкого сплаву. Твердість шийки валка для чавунів СПХН-42 коливається у межах 210–238  $HV$ , а міцність на розтяг 357–363 МПа.

5. Встановлено закономірності зміцнення поверхонь за допомогою СВС та вплив карбідів  $TiC$  на отримані поверхні. Комбінування СВС і лазерного поверхневого зміцнення утворює у напівпроплавленій зоні високотверді карбіди  $TiC$ , які займають до 50% об'єму всього шару карбідосталі. Твердість такої карбідосталі сягає  $HV$  1400. Зуміщення ЛПЗ і СВС у одній операції дозволяє отримати високотверді матеріали типу карбідосталі і тверді сплави на поверхні металу та нарощувати зношені поверхні деталей машин на глибину 500 мкм.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Боровинская, И.П. Процессы горения в химической технологии и металлургии / И.П. Боровинская, Е.П. Новиков. Черноголовка, 1975. – 141 с.
2. Жигуц, Ю.Ю. Технології отримання та особливості сплавів синтезованих комбінованими процесами (монографія) / Ю.Ю. Жигуц, В.Ф. Лазар. Ужгород : Видавництво «Інватор», 2014. — 388 с.
3. Жигуц, Ю. Методика розрахунку складу екзотермічних шихт на основі термохімічного аналізу [Текст] / Ю. Жигуц, В. Широков // Машинознавство. – 2005. – № 4. – С. 48 - 50.
4. Жигуц, Ю.Ю. Матеріали, синтезовані металотермією і СВС-процесами [Текст] / Ю. Жигуц, В.І. Техмурський // Доп. НАН України. Сер. Математика, природознавство, техн. науки. – 2005. – № 8. – С. 93 - 100.
5. Zhiguts, Yu. Špeciálna termitova liatina [Текст] / Yu. Zhiguts // Výrobné inžinierstvo. Košice. – 2007. – R. 11. – № 2. – S. 45 - 48.
6. Zhiguts, Yu. Special grey and white termite cast irons / Yu. Zhiguts, V. Lazar // British Journal of Science, Education and Culture, "London University Press". London. — 2014. — № 2 (6). — V. 1. — P. 201 - 207.
7. Zhiguts, Yu. The highstrenght termite cast irons / Yu. Zhiguts, Ya. Miklovsh, Yu. Agapitov // Australian and New Zealand Journal of Fundamental and Applied Studies, "Sidnej University Press". — 2015. — № 1 (15). — P. 3. — P. 614 - 619.
8. Жигуц, Ю. Ю. Технологія одержання та властивості термітних чавунів легованих міддю [Текст] / Ю.Ю. Жигуц, В.Ю. Талабірчук // Міжвузівський збірник Луцького національного технічного університету «Наукові нотатки». – 2015. – № 49. – С. 62 - 65.

9. Zhiguts, Yu. Conditions of effective deposition of superhard materials in medicine / Yu. Zhiguts, I. Opachko, I. Opachko (jun.) // Deutscher wissenschaftsherold» ("German Science Herald"). "Inter GING". —2016. — № 2 (15). Gamel'n. — С. 49 - 51. ISSN (print) 2509-4327.

### **АННОТАЦИЯ**

#### **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОСНОВАННЫЕ НА КОМБИНИРОВАННЫХ ПРОЦЕССАХ**

*Работа посвящена решению актуальной научно-технической проблеме: разработке научных и методологических основ формирования структуры и фазового состава сплавов, синтезированных комбинированными процессами, состоящими из металлотермической стадии и СВС (самораспространяющийся высокотемпературный синтез).*

*Исследованы сплавы, синтезированные металлотермией и СВС, разработаны теоретические основы синтеза, установлены связи между структурой сплавов, свойствами и характеристиками металлотермической шихты. Кроме этого, разработаны научные основы регулирования свойств сплавов, синтезированных экзотермическими процессами с использованием металлотермии и СВС. На основе исследования влияния и условий синтеза, разных технологических факторов, рассмотрены способы синтеза, которые позволяют получать лучшие свойства материала, чем у материалов, изготовленных по промышленным технологиям. Установлены закономерности формирования структуры и фазового состава сплавов, полученных с помощью комбинированных процессов. Проведен поиск оптимальных структур сплавов, которые удовлетворяют заданным служебным и технологическим свойствам материалов. Обнаружены особенности фазового состава и структур синтезированных сплавов.*

*В работе представлены результаты исследования термитных сплавов, их механические и служебные свойства, химический состав. Оптимизирован состав металлотермической шихты и технологии получения этих сплавов. Исследования проведены с высоколегированными сталями (110Г13л, 110Г12л), инструментальными быстрорежущими сталями (P18л, P12л, P9л, P6M3л, P9K5л, P10K5Ф5л), специальными чугунами, которые синтезированы комбинированными процессами. Установлены закономерности структурообразования в литых сплавах в зависимости от химического состава, способа проведения плавления и дисперсности ингредиентов.*

*Установлены закономерности структурообразования в литых сплавах в зависимости от химического состава, способа проведения плавки и дисперсности ингредиентов.*

**Ключевые слова:** свойства материалов, металлотермия, СВС, комбинированные процессы, термитные сплавы, структура, технология.

### **SUMMARY**

#### **ADVANCED TECHNOLOGY BASED ON COMBINED PROCESSES**

*The article is devoted to the decision of scientific and technical issue of the day, namely to the development of scientific and methodological backgrounds for the formation of structural and phase composition of alloys, synthesized by the combined processes consisting the metallothermic stage and SHS (self-propagating high-temperature synthesis). The alloys, synthesized by metallothermy and SHS have been studied, theoretical backgrounds for synthesis have been developed, as well as the relations between the structure of alloys, properties and descriptions of metallothermic burden have been set.*

*Besides, the scientific backgrounds for properties adjusting of alloys synthesized have been developed by exothermic processes with the usage of metallothermy and SHS. The synthesis methods, based on the study of the influence and the synthesis conditions of different technological factors, allowing the acquisition of better material properties in comparison with materials made by industrial technologies, have been under consideration. The conformity to principle of alloys phase forming chemical composition and structure, received by the combined processes have been carried out. The research of optimal alloys structures, satisfying the defined operating and technological properties of materials, have been conducted. The peculiar features of phase forming chemical composition and structure of synthesized alloys have been found out.*

*The thermite alloys, their mechanical and operating properties as well as chemical composition have been presented in the article. The chemical composition of metallothermic burden and technologies of these alloys synthesis have been optimized.*

*The high-alloyed steels (110Г13л, 110Г12л), instrumental high-speed steels (P18л, P12л, P9л, P6M3л, P9K5л, P10K5Ф5л), and special types of cast-iron, synthesized by the combined processes, have been under the investigation.*

*The conformity to principle of structure formation in the poured alloys depending on chemical composition, method of melting and dispersion of ingredients has been carried out.*

**Key words:** properties of materials, metallothermy, SHS, combined processes, thermite alloys, structure, technology.



# МУКАЧІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

89600, м. Мукачево, вул. Ужгородська, 26

тел./факс +380-3131-21109

Веб-сайт університету: [www.msu.edu.ua](http://www.msu.edu.ua)

E-mail: [info@msu.edu.ua](mailto:info@msu.edu.ua), [pr@mail.msu.edu.ua](mailto:pr@mail.msu.edu.ua)

Веб-сайт Інституційного репозитарію Наукової бібліотеки МДУ: <http://dspace.msu.edu.ua:8080>

Веб-сайт Наукової бібліотеки МДУ: <http://msu.edu.ua/library/>