

# МАТЕРІАЛИ СИНТЕЗОВАНІ МЕТАЛОТЕРМІЄЮ І СВС-ПРОЦЕСАМИ

Ю.Ю. Жигуц, В.І. Похмурський<sup>1</sup>, Ю.Ю. Скиба, Я.П. Легета

Ужгородський національний університет, вул. Університетська 14, Ужгород, 88000.

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Карпенка, вул. Наукова, 5, Львів, 79060.

Сучасною проблемою створення нових матеріалів та покращення властивостей традиційних є необхідність екстреного виготовлення якісних запасних частин та інструментів на підприємствах і майстернях без відповідної технологічної бази. Ці задачі можуть бути успішно вирішені при застосуванні сплавів, отриманих способом спалювання екзотермічних порошкових сумішей. Цей метод дозволяє економити матеріал і в масовому та крупносерійному виробництві деталей. Саме тому актуальним є і дослідження сплавів, отриманих на основі саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС) та комбінованих (металотермія + СВС) процесів.

## Актуальність теми

Важливою проблемою в наших умовах є не тільки створення нових матеріалів та покращення властивостей традиційних, але і постачання запасними частинами і інструментом немасового використання потреба в яких виникає на невеликих підприємствах і у майстернях, де немає відповідної бази.

Детальне вивчення питання дає можливість вважати, що перераховані вище проблеми можуть успішно вирішуватися за рахунок використання відповідних сплавів, отриманих способом спалювання екзотермічних порошкових сумішей [1,2].

Цей метод може успішно застосовуватися і для економії металу на заводах крупносерійного і масового виробництва деталей і інструменту.

Саме тому, синтез матеріалів на основі СВС та комбінованих (металотермія+СВС) процесів, а також дослідження впливу нових технологічних способів отримання металу на мікроструктуру, хімічний склад, механічні властивості виготовлених виливків набули великого практичного значення.

При відсутності енергетичної та сировинної баз, спеціального плавильного і ливарного обладнання такі технологічні процеси створення матеріалів стають економічно доцільними, а використання їх у вже існуючих методах виготовлення ви-

ливків, наприклад у технології отримання сталевих і чавунних виливків з термітними додатками, суттєво підвищують ефективність виробництва.

## Мета дослідження

Метою роботи було встановлення можливості отримувати матеріали металотермічними і комбінованими способами, а також виявлення взаємозв'язків між структурою, хімічним складом і механічними властивостями синтезованих сплавів. Робота направлена на дослідження синтезованих матеріалів, а саме термітних чавунів, легованих конструкційних і нержавіючих сталей швидкорізальних сталей, твердих сплавів і карбідосталей, мідних сплавів – бронз.

## Матеріали і методика проведення дослідження

При виконанні роботи були використані матеріали: сажа (технічний вуглець ТУ 14-7-24-80), порошок алюмінієвий ПА-3–ПА-4 ГОСТ6058-73, залізна окалина (прокатного виробництва) із 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 та ін. Порошкова шихта просувалася, перемішувалася, ущільнювалася і після цього розміщувалася у металотермічному тиглі.

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 діаметром 40 мм із різним процентним співвідношенням компонентів у суміші. Ініціювання процесу горіння проводилося спеціальним титановим запалом виготовленим з порошку титанового хімічного ПХ-2 ТУ 48–10-78-83.

Випробовування на розтяг виконувалося у відповідності до ГОСТ 1215-59 на машині УМ-20 взірців виготовлених з центральної частини отриманих зливок. Металографічні дослідження проводилися на мікроскопі МИМ-8М та скануючому електронному мікроскопі “КЭМСКАН 4DV”.

Після встановлення складу шихти за стехіометричними коефіцієнтами хімічної реакції та корекції її коефіцієнтами засвоєння компонентів, проводився розрахунок адіабатичної температури горіння металотермічної реакції.

Розроблена методика дозволяє встановити склад металотермічних шихт і розрахувати адіабатичну температуру її горіння. Головна умова процесу синтезу – необхідність отримувати реальну температуру горіння шихти вище температури плавлення шлаку (для  $Al_2O_3$  – 2400 К).

Методика розрахунку  $T_{ад}$  дозволяє визначити режими протікання реакції і агрегатний стан вихідних компонентів у фронті хвилі горіння.

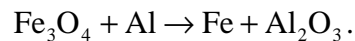
Вміст водню і сірки у металі витримують у допустимих межах пропалюванням залізної окалини, знежирюванням і прожарюванням алюмінієвої стружки з метою видалення залишків вологи, мастильно-охолоджувальної рідини, масел та ін.

Для зменшення впливу на термітний метал високої температури і для усунення пов'язаної із цим високою пористістю і усадкою у виливках, у склад шихти вводилися інертні домішки – стружка відповідного сплаву і феросплави (при умові, що температура горіння шихти зберігається вище 2400 К – температури плавлення глиноземистого шлаку). Із метою підвищення стабільності горіння і покращення

кінетичних характеристик протікання реакції, у склад шихти також вводилося 1...2 % (від маси шихти) плавикового шпату  $CaF_2$ , який не тільки знижує температуру запалення екзотермічної порошкової суміші, але і підвищує вихід металу з неї.

### Теоретичні основи реакції синтезу

При організації процесу синтезу сталей і чавунів використовуються класичні термітні реакції засновані на окисленні алюмінію і відновленні заліза:



Для отримання необхідного складу сталі або чавуна у шихту вводились домішки вуглецю, легуючих елементів (феродомішки) і флюси.

На основі проведених мікроплавлень виявлено залежності засвоєння термітним металом вуглецю (у вигляді сріблястого графіту) і інших елементів, що було необхідно для отримання потрібного хімічного складу термітної сталі при розрахунку екзотермічних шихт. Деяке зниження засвоєності вуглецю термітною сталлю від 2 до 4% його вмісту у шихті напевно викликано тим, що із зростанням присадки вуглецю засвоєваність на початку знижується – частина вуглецю у шихті не встигає розчинитися у рідкій сталі і падає у шлакову фазу. Подальше зростання присадки вуглецю підвищує рідкотекучість сталі і покращує умови для засвоєння  $C$  з шихти.

### Експериментальні дослідження

Суть технологій металотермічного і комбінованого синтезів достатньо проста – в металотермічний реактор засипаються порошкоподібні інгредієнти шихти, які підпалюються спеціальним запалом. Після завершення горіння в нижній частині реактора формується злинок, у верхній частині ж за рахунок значної різниці у питомій масі продуктів реакції, збирається шлак.

Враховуючи дані дослідження було розроблено і здійснено отримання різних марок вуглецевих сталей в результаті алюмініотермічного відновлення залізної

окаліни із введенням в терміт додатково вуглецю і феросплавів.

На основі спеціальних сплавів екзотермічних шихт отримано термітні сталі *20ГЛ–35ГЛ*, *30ГСЛ*, *32ХО6Л–40ХЛ*, *20Х5МЛ* (із перліто-феритною структурою) і *20Х5ТЛ*, *40Х9С2Л* (із мартенситною структурою) [3–5].

Із практичних даних встановлено, що введення більше 20% домішок у терміт приводить до припинення розділення термітного сплаву і шлаку в умовах лабораторних термітних мікроплавлень при масі шихти до 300 г. При масі екзотермічної шихти від 10 до 50 кг вміст домішок у ній можна довести до 25...30%.

Дані аналізу механічних властивостей дозволяють зробити висновок, що термітна сталь не поступається за цими параметрами ливарній, а за ударною в'язкістю на 20% краща, що пов'язано із додатковим дорозкисненням і мікролегуванням алюмінієм.

Додавання термітної сталі до звичайної різко зменшує розмір зерна у литому стані. По цій же причині метал у піддодатковій зоні сталевих виливків отриманих із використанням технології термітних ливарних додатків високого температурного градієнту отримується більш дрібнозернистий, ніж при використанні ординарної технології.

Високий процентний вміст домішок і феросплавів надмірно "захолює" екзотермічну реакцію і тоді розрахований склад шихти високолегованої термітної сталі, не дозволяє отримати оптимальну температуру горіння екзотермічної суміші.

У цьому випадку необхідно використовувати інше, відмінне від вищеописаного, направлення синтезу легуваних сталей.

Воно полягає у отриманні заданого хімічного складу сплаву не введенням певної кількості феросплавів, а складанням спеціальної екзотермічної шихти, у склад якої входять оксиди легуючих елементів (наприклад,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CrO}_3$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  та ін.) і залізна окаліна відновлювані алюмінієм у ході алюмінотермічного процесу [4]. Для отримання термітного висо-

колегованого металу даним способом розроблена методика відповідних розрахунків і технологія синтезу. Наприклад, таким чином синтезована сталь *12Х18Н10Т* на основі оксидів *Fe*, *Ni*, *Cr* [4,5].

Титан вводився у склад екзотермічної шихти не у вигляді  $\text{TiO}_2$ , а у вигляді феротитану (30%-ного), що пов'язано із слабкою відновністю титану з його оксидів алюмінієм. Склад шихти:  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  – 17,2%;  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  – 50%;  $\text{NiO}$  – 6,6%;  $\text{Al}$  – 26,2%.

Вуглець і титан при введенні їх у металотермічну шихту переводять реакцію синтезу з класу металотермічних у клас "комбінованих", тобто таких, що складаються з фази проведення металотермічної реакції і фази проведення реакції саморозповсюджувального високотемпературного синтезу.

Хімічний аналіз зрізів синтезованого металу показав погану відновність хрому з його оксидів.

При проведенні термітних плавок за запропонованим способом необхідно врахувати "активність" елементів, які складають металотермічну шихту. Говорячи про нерівномірність розподілу елементів у зливках, отриманих алюмінотермічним відновленням оксидів, не можна не вказати на послідовність взаємодії цих оксидів із алюмінієм. У початковий період проходить відновлення таких легковідновних елементів як *Fe*, *Ni* та ін., а важковідновні оксиди переходять у шлаковий розплав. Після термітний метал, що вміщує надлишковий алюміній, проходячи через шар шлаку, відновлює і важковідновні оксиди.

Так, при синтезі сталі *12Х18Н10Т*, спочатку проходить відновлення оксидів нікелю і заліза, а після хрому. Цим обумовлено недостатньо високий вміст *Cr* у отриманій термітній легуваній сталі. Для покращення повноти відновлення всіх оксидів, необхідно проводити екзотермічні плавки з більш крупними масами шихти.

Продовжуючи дану роботу були проведені у дослідно-промислових умовах експерименти із використанням вищеописаних складів шихт для термітних ливарних додатків виливків з легуваних сталей [5].

При проведенні наступних експериментальних мікроплавлень синтезовано чотири типи високолегованих чавунів – ніхардів, аналогів промислових чавунів, типу I, II, III і спеціальний з високим вмістом нікелю і хрому. Хімічний склад отриманих сплавів (табл. 1) знаходиться в межах регламентованих стандартом і підтверджує правильність результатів розрахунку шихти. При цьому реакція синтезу проводилася як у кожному типі реакто-

ра, так і з графітовим облицюванням для встановлення впливу режиму тепловідводу на механічні властивості ніхардів (табл. 2). Використання графітового тигля приводить до незначного підвищення міцності ніхарду. У цілому ж, умови мікроплавлень встановлюють настільки інтенсивний режим охолодження сплаву, що в принципі, вплив облицювання реактора перестає домінувати.

Таблиця 1. Хімічний склад термітних ніхардів (% за масою)

Синтезований ніхард	Вміст легуючих елементів							
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	S	P
Тип I	3,2–3,5	0,4–0,7	0,3–0,5	4–4,5	2–2,5	–	≤0,05	≤0,05
Тип II	2,7–3,2	0,4–0,7	0,3–0,5	4–4,7	2–2,5	–	≤0,05	≤0,05
Тип III	1–1,5	0,4–0,7	0,3–0,5	4–4,5	1,4–1,6	–	≤0,05	≤0,05
Сплав 3-2-1	3,2–3,5	0,4–0,7	1,2–2,0	3–3,5	1,5–2,0	0,8–1,0	≤0,15	≤0,40

Таблиця 2. Механічні властивості термітних ніхардів

Тип чавунів	Спосіб литва	$\sigma_b$	HВ	$\sigma_u$
		МПа		
I	В кокіль	270–320	570–640	470–890
	В графітовий тигель	280–320	600–670	490–710
II	В кокіль	380–450	590–630	560–770
III	В графітовий тигель	–	370–410	–
Сплав 3-2-1	В графітовий тигель	–	490–560	–

Всі виливки з ніхардів не мали зовнішніх ознак усадкової раковини, розрізка виливок і макроаналіз підтвердили ці результати. Ліквідації хімічного складу за об'ємом виливків не виявлено.

Синтезовані термітні зносостійкі чавуни – ніхарди, відносяться до хромонікелевих мартенситних чавунів. Імовірність графітизації виливків з ніхарду при синтезі сплаву алюмініотермічним шляхом значно зменшується у зв'язку із значним градієнтом температур і високими швидкостями тепловідводу.

Мікроструктурний аналіз (див. рис. 1) показав, що в термітних чавунах зміст цементиту складає не менше 50%, що дає мікротвердість від 1000 до 1050 HV.

Добре відомо, що зносостійкість чавунів при абразивному зношуванні залежить від мікротвердості, форми, розташування і

кількості структурних складових. Основними фазами в структурі ніхардів (як показав рентгеноспектральний аналіз), що найінтенсивніше впливають на зносостійкість, є цементит і більш зносостійкі карбіди Cr, Mo й ін.

Методами рентгеноструктурного аналізу в структурі цих чавунів виявлено, крім карбідів  $Fe_3C$  і  $(Fe, Cr)_3C$ , карбіди  $(Fe, Cr)_7C_3$  й ін., що забезпечує мікротвердість – 15 ГПа. Мікротвердість карбідів  $(Fe, Cr)_3C$  по HV 10,0-10,5 ГПа,  $(Fe, Cr)_7C_3$  і  $(Fe, Cr)_{23}C_6$  – 14,5–17,5 ГПа.

Необхідно відзначити, також і те, що механічні властивості термітного ніхарду вище, ніж відповідні властивості хромонікелевого промислового чавуна, мабуть, у зв'язку із додатковим мікролегкуванням

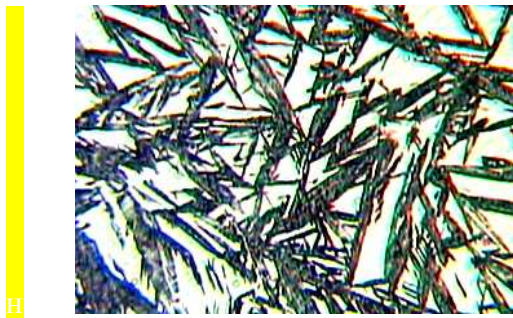
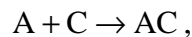


Рис. 1. Мікроструктура мартенситного ніхарду 3-2-1, x100

алюмінієм, що обов'язково входить до складу шихти. Разом із тим у легованих термітних чавунах при збільшенні вмісту марганцю [6–8], незважаючи на високі температури синтезу, спостерігається погіршення рідкотекучості при збереженні усадки в межах 1,6–2,2 %.

Для поліпшення ливарних властивостей і якості виливків з термітного ніхарду металотермічний реактор нагрівали до 150–200 °С. Синтезовані чавуни погано обробляються різанням [8–10]. Ніхарди схильні навіть при обробці шліфуванням до утворення мікротріщин. Це приводить до необхідності використання для виливків низькотемпературного відпуску з витримкою 4–6 год. або нормалізації і наступного відпуску.

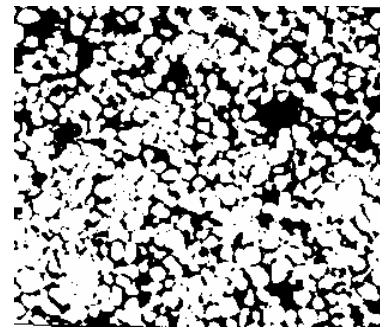
У продовження даної роботи вдалося успішно провести поєднання металотермічних та СВС-процесів для отримання вольфрамокобальтових інструментальних твердих сплавів за схемою реакції  $A + B + C \rightarrow A + BO$ ,



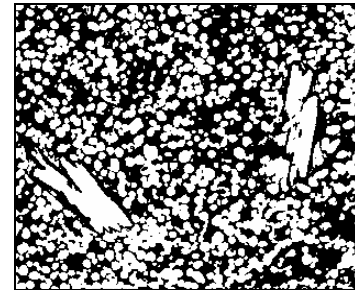
де  $A, B, C$  – елементи синтезу;  $O$  – окислювач (кисень та ін.);  $AC$  – продукти реакції (карбіди, силіциди та ін.);  $BO$  – шлак.

Розроблена на базі вказаної схеми технологія дозволила виготовити "нетрадиційним" способом крім литих твердих сплавів (типу  $BK3, BK4, BK6, BK8, BK15$  [11–13], мікроструктуру одного з них показано на рис. 2,а), швидкорізальні сталі ( $P9, P6M5, P12$ ) та ін.

Вперше синтезовано і так звані "карбідосталі" – матеріал, аналог твердого вольфрамокобальтового сплаву у структурі якого м'який і пластичний кобальт заміне-



а



б

Рис. 2. Мікроструктура: а) твердого сплаву  $BK4$ , б) карбідосталі  $V(P18)15$  з зв'язкою у вигляді швидкорізальної сталі  $P18$  (темний фон) – 15% і карбідів вольфраму  $W_2C$  (дрібні глобулярної форми світлі включення) та  $WC$  (крупні гранчасті) – 85%, x250

но на швидкорізальну сталь мікроструктура одного з типів карбідосталі показана на рис. 2, б [13].

Дослідження мікроструктури та механічних властивостей отриманих сплавів дозволяють навести наступні результати, наприклад, для сталі  $P18$ : бал зерна 10, твердість  $HRC65$ ,  $\sigma_B=2600$  МПа, теплостійкість 640 °С.

Доказом універсальності "комбінованих" технологій стало вирішення виробничої проблеми – синтезу високоперегрітих мідних сплавів бронз  $BrAJ 10-4$  та  $BrOЦС 5-5-5$  в технології термітних ливарних додатків високого температурного градієнту [14,15].

Розрахований склад металотермічної шихти для мідних сплавів враховує коефіцієнти активності окремих компонентів реакції, що дозволило встановити адіабатичну температуру горіння суміші і провести корекцію хімічного складу шихти за рахунок введення млива стружки бронзи відповідного складу.

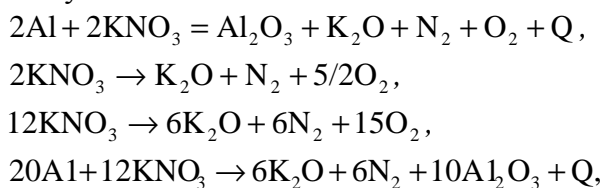
Для отриманих металотермією і комбінованими способами взірців, досліджува-

лись мікроструктура, бал зерна, механічні властивості (твердість, міцність та пористість).

Теоретично розраховано, а у наступному апробовано у лабораторних та дослідно-промислових умовах два склади екзотермічних шихт для мідних сплавів.

Перший склад – екзотермічна суміш для розігріву додатку вилівка, що виділяє тепло, але не утворює металу в результаті свого горіння. Він складається з ~20% алюмінієвого порошку і 80% калієвої або натрієвої селітри ( $KNO_3$  або  $NaNO_3$ ). Відхилення цього процентного співвідношення від стехіометричного ( $Al$  – 34,6%,  $NaNO_3$  – 65,4%) викликано тим, що при надлишку алюмінію, проходить його взаємодія з селітрою (калієвою або натрієвою) без залишку за рахунок того, що коефіцієнт активності  $Al$  у алюмінієвому порошку знижується до 0,96% при просушуванні. В результаті усувається небажаний вплив  $Al$  на мідний сплав.

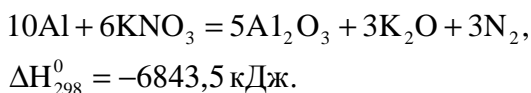
Реакція взаємодії шихти цього складу наступна:



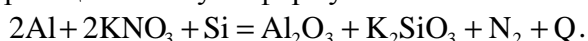
де  $Q$  – тепловий ефект реакції синтезу.

Продукти реакції  $K_2O$  і  $Al_2O_3$  взаємодіють між собою, утворюючи алюмінат калію, з невеликим виділенням тепла.

Аналогічно:



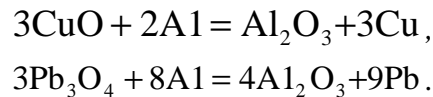
Ввівши у склад шихти  $Si$  отримуємо  $Al_2O_3$  та  $K_2SiO_3$ , які утворюють алюміносилікат калію – непоганий шлак, що покращує техніко-економічні показники реакції синтезу за формулою:



Другий склад екзотермічної суміші відноситься до композицій, горіння яких генерує рідкий розплав, а той, у свою чергу, перемішуючись із сплавом у порожнині додатку передає йому велику кількість

теплоти. При цьому утворений рідкий термічний сплав повинен бути аналогічним за хімічним складом сплаву залитому у форму. Екзотермічна шихта складається із таких компонентів: алюмінію, цинку, олова, оксиду міді ( $CuO$ ) та свинцевого сурику ( $Pb_3O_4$ ).

Реакція взаємодії записується формулами:



У дослідно-промислових умовах була апробована технологія екзотермічних додатків з високим температурним градієнтом для бронзових виливків. Два типи вищевказаних екзотермічних додатків випробувані на виливці корпусу крана Р6.010401-Б масою 2,55 кг з БрОЦС 5-5-5 ГОСТ 613-79.

Екзотермічна суміш виготовлена з  $Al$  та натрієвої селітри (у співвідношенні 20% до 80%) вставлялась у порожнину додатку: а) у вигляді пакету; б) у вигляді металотермічного стержня. Маса додатку вилівка 0,4 кг.

При використанні даного типу суміші в результаті високої температури її горіння проходить розігрів сусідніх до екзотермічної шихти шарів бронзи і заповнення перегрітим рідким розплавом усадкової раковини. Небезпеку надлишкового перегріву сплаву зони під додатком вилівка та зміну його фізико-механічних властивостей вдалося запобігти завдяки пізнішому спрацюванню металотермічного заряду (приблизно через 1–1,5 хвилини після закінчення заливки сплаву у форму), що визначило розігрів верхньої частини додатку вилівка після початку кристалізаційних процесів у зоні під ним.

Це знизило масу бронзового сплаву, що іде на ливарний додаток (на 60%).

Другий тип суміші, що складається з  $Al$ ,  $Sn$ ,  $Zn$ ,  $CuO$  та  $Pb_3O_4$  також використовується для екзотермічних додатків за двома варіантами: у вигляді пакета і у вигляді металотермічного стержня.

Склад цієї металотермічної шихти для бронзи БрОЦС 5-5-5 ГОСТ 813-79 визначаємо з термохімічного розрахунку:

$Sn$  – 4,19% (гранульований), а також  $Al$  – 16,52%;  $CuO$  – 70,54% (порошковий). Адіабатична температура горіння екзотермічної суміші склала 3300 К.

В результаті металотермічної реакції – відновлення свинцю, міді та окислення алюмінію, виділяється значна кількість тепла, яка дозволяє отримати бронзовий сплав із значним перегрівом. Для зменшення температури горіння шихти у її склад вводили додаткову стружку бронзи *БрОЦС 5-5-5* у кількості 100% (від маси), що "штучно" збільшує вихід сплаву з шихти.

Таким чином, вдалося запобігти надлишкового випалу дорогих компонентів екзотермічної шихти бронзового сплаву.

Технологія виготовлення металотермічних стержнів полягала у додаванні до шихти 4,5% пудрбакеліту, 0,2% сульфанолю та 5,5% води з наступною сушкою при температурі 150...200°C.

Іншим перспективним напрямом використання розроблених екзотермічних складів шихти другого типу (у основу яких покладено принцип одночасного відновлення декількох сполук) є розробка технології термітної плавки [15].

Ця технологія дає можливість виготовляти у важкодоступних районах, неспеціалізованих сільськогосподарських цехах та навіть польових умовах, виливки з мідних сплавів при відсутності "звичайного плавильного" обладнання та джерел електроенергії.

У результаті горіння спеціальної металотермічної шихти в реакторі утворюється рідкий високоперегрітий мідний сплав, який у наступному після вловлювання шлаку, зливається у форму виливка.

Наступним кроком у цьому напрямі було синтез високоміцних чавунів на основі класичної термітної реакції. Додатковими інгредієнтами металотермічної шихти були вуглець, оксиди нікелю, хрому, молібдену та надлишковий порошкоподібний алюміній (крім залізної окалини та основного алюмінію) [6–10].

Схема процесу наштовхнула на нову технологію у якій за рахунок спеціальної двохкамерної конструкції металотерміч-

ного реактора з пластинкою з алюмінієвого або титанового сплаву вдалося провести наплавлення металорізальної пластини безпосередньо на основу (державку) різця [17,18].

На рис. 3. зображена схема металотермічного реактору для зварювання чавунних деталей, де 1,2 – чавунні плити з СЧ20 товщиною 20 мм., 3 – формувальна суміш, 4 – пінополіуретан, 5 – опока, 6 – вертикальний ливарний канал, 7 – двокамерний реактор, 8 – отвір, 9 – нижня камера, 10 – верхня камера, 11 – стержень з отвором, 12 – пластина, 13 – суміш терміту та графітового порошку. Плити 1 і 2 заформовували у піщано-глиняну суміш 3, при цьому щілина між ними шириною 10 мм заповнювалася пінополіуретаном 4.

Плити 1, 2 і поліуретановий прошарок 4 прикривалися опокою з формувальною сумішшю 5, яка мала рівні лади. У верхній напівформі передбачався канал 6, на якому встановлювався двокамерний реактор 7. У формувальній суміші передбачався тимчасовий отвір 8, через який подавалося полум'я газової горілки, що пропалювало пінополіуретановий прошарок 4, розжарювало торці плит 1 і 2 та прогрівало порожнину термітного зварювання, а одночасно і канал 6, нижню 9 та верхню 10 камери реактору.

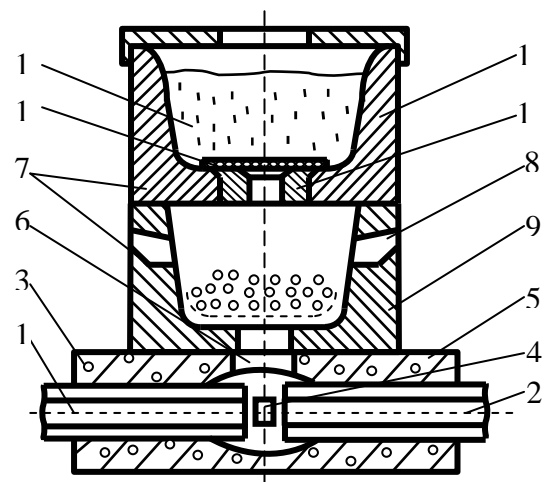


Рис. 3. Схема двохкамерного реактору із пристосуванням для зварювання

Після завершення операції прожарювання у камеру 9 закладався лігатура ферум-силіцій-магній-рідкісноземельні метали і стержень 11 з отвором, який пе-

рекривався тонкою пластиною зі сталі. Після цього у камеру 10 засипалася суміш терміту і графітового порошку 13. Проводився розігрів плит 1 і 2 горілкою приблизно до  $250^{\circ}\text{C}$ . Суміш підпалювалась термітним сірником або запальними порошками магнію чи титану, які у свою чергу підпалювали звичайним сірником. Приблизно через 20–25 секунд після початку технологічної операції пластина 12 пропалювалась термітним чавуном, який виливався у камеру 9 розчиняючи на своєму шляху лігатуру ферум-силіцій-магній-рідкісноземельні метали, а далі стікав у канал 6 і у порожнину зварювання. Шар на торцях плит 1 та 2 відновлювався розплавом чавуну, який вмщував силіцій. Плити міцно приварюються одна до одної у процесі їх оплавлення перегрітим чавуном і його твердіння.

Як відомо, особливістю технологій заснованих на проведенні металотермічних реакцій, є простота переходу від лабораторних експериментів до промислового виробництва, при цьому у великих об'ємах металотермічної шихти значно полегшується протікання процесу горіння, а також покращуються його показники [19,20]. Одним напрямом використання СВЧ синтезу є твердосплавне наплавлення матеріалів на сталеві або чавунні поверхні. Особливо перспективними з цієї точки зору виглядають технології, що поєднують у собі лазерне поверхневе зміцнення із наплавленням за допомогою СВЧ. Приклад такого використання комплексних технологій наведений нижче.

У даному дослідженні [20,21], у ролі світлопоглинаючої фарби було використано суміш порошоків Ti (68%), вуглецю у виді сажі (18%) і Fe (14% за масою). Суміш змочувалася розчином 2% латексу у бензині, наносилася на поверхню сталі марок Сталь 10 і Сталь 20 з наступним підсушуванням на повітрі, утворюючи шар товщиною 80, 200 або 500 мкм.

Термохімічні розрахунки показали, що у такій суміші практично весь Ti взаємодіє за рахунок безкисневого горіння з вуглецем, утворюючи карбід TiC. Надлишок вуглецю і дуже невелика кількість титану

легує залізо, утворюючи рідку сталь евтектоїдного складу, яка в умовах швидкого охолодження перетворюється у тростит в шарах товщиною 80 мкм.

Ці шари підпалювались променем  $\text{CO}_2$ -лазера безперервної дії з поздовжньою накачкою типу "Кардамон" потужністю 850 Вт при щільності потужності  $15\text{--}20 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$  (при діаметрі "плями" 0,3–1,0 мм). Швидкість сканування змінювалася у межах  $10\text{--}20 \text{ мм}\cdot\text{с}^{-1}$ . Після проведення експерименту вимірювалася макро- і мікротвердість у легованому шарі, зоні термічного впливу і основному металі.

На рис. 4 показана типова мікроструктура металу у поперечному перерізі зміцненого шару, отриманого при щільності потужності  $17 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ , діаметрі "плями" – 0,4 мм, швидкості сканування  $12 \text{ мм}\cdot\text{с}^{-1}$  та витратах аргону (для захисту Ti від окислення повітрям) –  $0,5 \text{ л}\cdot\text{с}^{-1}$ . Товщина легованого шару  $\sim 500$  мкм. Цей шар складається з  $\sim 50\%$  частинок TiC і  $\sim 50\%$  (по об'єму) металічної зв'язки – інструментальної вуглецевої сталі типу У8.

На рис. 4 двома вертикальними стрілками показано, що дві частинки TiC під час свого синтезу "пропалили" сталь і глибоко вкоренилися у зв'язку з високим локальним виділенням тепла.

Видно також, що в зоні інтенсивного теплового впливу мікроструктура сталі набула дуже дрібної стовпчастої будови з невеликим нахилом тонких дендритів (які майже не мають гілок) у сторону, протилежну напрямку сканування променем лазера. Нахиленою світлою стрілкою (зверху) показано направлення, вздовж якого вимірювалася мікротвердість алмазною пірамідою.

На рис. 5 подано повний поперечний розріз мікрошліфа. Як показали проведені дослідження, мікротвердість карбідів TiC майже у десятки разів вища твердості сталі.

Таким чином, у даній роботі вдалося організувати СВЧ-процес у порівняно тонкому шарі за рахунок використання технології лазерного поверхневого зміцнення одночасно для вирішення двох



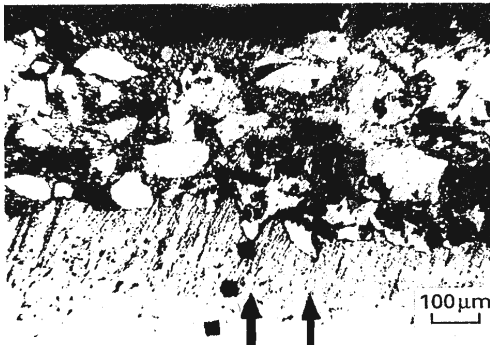


Рис. 4. Мікроструктура зміцненого шару з напівоплавленими частинками TiC завдань: для нагрівання, оплавлення і науглецьовування заліза; для оплавлення частинок Ti і його "горіння" у вуглеці із утворенням карбідів TiC.



Рис. 5. Мікроструктура поперечного розрізу мікрошліфа сталі після комбінованого її зміцнення ЛПЗ і СВС

Адіабатична температура безкисневого горіння еквіатомної суміші Ti-C дорівнює 3200 K. Фактична температура горіння вибраної суміші 68%Ti +18%С+14%Fe (% у масових частках) перевищує 1850 K, що забезпечує утворення на поверхні сталі твердо-рідкого шлікера розплав-TiC з великим інтервалом ліквідус-солідус. Утворення шлікера замість однофазного розплаву позитивно впливає на якість поверхні зміцненого шару після його повного твердіння і охолодження, а також на

утримувannya цього шару навіть на нахилених площинах.

У напівпроплавленій зоні видно високотверді (~HV2000) карбіди TiC, які займають до 50% об'єму всього шару карбідосталі. Травлення виконувалось ніталем. Важливо відмітити, що при вказаному безкисневому горінні ніяких неметалічних фаз і їх включень не утворюється. Зварювання зміцненого шару з основним металом автоматично отримується "металургійно", виключаючи необхідність пайки або інших способів з'єднання одного сплаву (наприклад, інструментального) з іншими (наприклад з основою різця), що показано на рис. 6.

Короткий огляд технологій синтезу матеріалів і їх застосування дає можливість судити про найближчі майбутні перспективи застосування СВС процесів і комбінованих процесів.

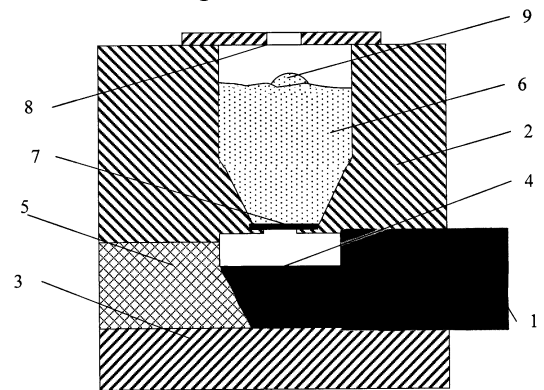


Рис. 6. Принципова схема металургійного зварювання: 1 – основа різця; 2 – верхня напівформа; 3 – нижня напівформа; 4 – місце зварювання; 5 – вогнестійкий матеріал; 6 – екзотермічна суміш (у насипному виді); 7 – титанова пластина (товщиною 0,5 мм); 8 – кришка з отвором у центрі для виходу газів; 9 – титановий запал

Незважаючи на підвищену ціну компонентів шихти вищеописані технології мають неабиякі переваги: відсутність складного дорогого обладнання (плавильних печей, потужних джерел електроенергії), повна автономність технологічного процесу (цю технологію можна використовувати на рухомих ремонтних платформах, у пересувних майстернях і навіть польових умовах), висока продуктивність та швидкодія (час синтезу сплаву складає декілька хвилин). Все це

дає можливість їх широкого застосування в умовах неспеціалізованих виробництв.

### Висновки

В даній роботі розглянуто проблеми, які стосуються синтезу легованих сталей металотермією і саморозповсюджувальним високотемпера-турним синтезом. На основі розробленої методики розрахунку встановлено склади шихт і синтезовано різні типи сплавів. Виявлено особливості проведення металотермічних плавок, досліджено механічні властивості і структура отриманих сплавів, встановлено коефіцієнти засвоюваності легуючих елементів у металотермічних і комбінованих процесах. Розроблено технологію термітного зварювання і наплавлення на деталь високотвердих поверхонь, а суміщення лазерного поверхневого зміцнення і СВС у одній операції дозволяє розв'язати цілий комплекс технічних проблем по отриманню матеріалів типу карбідосталі і твердих сплавів на поверхні металу.

### Література

1. Новые методы получения высокотемпературных материалов основанные на горении/А.Г.Мержанов, И.П. Боровинская, В.И. Юхвид и др.//Научные основы материаловедения. –М.: Наука, –1981.–С. 193–206.
2. Жигуц Ю.Ю. Some Permanent Joints Obtained with the Use of SHS//Modern Foundry Technologies – Environmental Protection. 3 Intern. Conference. Wydzial Odlewnictwa Akademii Gorniczo-Hutniczej Stowarzyszenie Techniczne Odlewnicow Polskich., –Kracow, –2000, –P.213–215.2.
3. Жуков А.А., Новохацкий В.А., Жигуц Ю.Ю. Получение литых инструментальных сталей в результате горения термитных смесей//Литейное производство, – 1990, – № 7, – С. 6–7.
4. Жигуц Ю.Ю. Ресорно-пружинні термітні сталі//Машинознавство, Львів, – 2002, – №10, – С.50–52.
5. Жигуц Ю.Ю. Экзотермічна суміш для живлення виливків з високолегованих

### Пропозиції для наступного опрацювання

На даний момент можна усунути ряд найбільших технічних проблем, що стримують розвиток і використання СВС та комбінованих процесів у практику промислового виробництва за рахунок вирішення наступних технічних завдань:

1. Необхідно розробити типові технологічні процеси засновані на комбінованих процесах синтезу матеріалів.
2. Потрібно розширити практику застосування технологій для ливарних і зварювальних виробництв у механічних майстернях та ін.
3. Виконати глибокі дослідження синтезованих матеріалів, в першу чергу, комплексу службових і технологічних властивостей.
4. Провести систематизацію отриманих матеріалів і розробити систему їх маркування.
5. Розробити типові обладнання для синтезу цих матеріалів.

- марганцевих сталей//Вісник СумДУ, Суми, – 2003, – №3(49), – С.176–179.
6. Скиба Ю.Ю., Жигуц Ю.Ю. Технологія синтезу термітних високоміцних чавунів//Вісник СумДУ, – Суми, – 2002, – №2, – С. 98–102.
7. Скиба Ю.Ю., Жигуц Ю.Ю. Технологія синтезу термітних високоміцних чавунів//Вісник СумДУ, – Суми. – 2002, – №2, – С. 98–102.
8. Жигуц Ю.Ю., Скиба Ю.Ю. Отримання термітних ніхардів// Матеріали доп. 7-ї міжн. наук.-практ. конф. „Наука і освіта 2004”. – Т.62, – Дніпропетровськ. Вид-во „Наука і освіта”. – 2004, –С. 25–26.
9. Жигуц Ю.Ю. Спеціальні термітні чавуни//Тези доп. 6-й міжн. симп. укр. інж.-мех., –Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2003. –С. 141–142.
10. Жигуц Ю.Ю. Сірі і білі спеціальні термітні чавуни//Вісник НУ “Львівська політехніка”/ Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у

11. машинобудуванні та приладобудуванні. Львів. Вид-во НУ “Львівська політехніка”, – 2003, – № 480, –С. 148–153.
12. Жигуц Ю.Ю. Синтез литых твердых сплавов//Литейное производство, М., – 1991, – № 11, – С.5–6.
13. Жигуц Ю.Ю. Структура і властивості синтезованих твердих сплавів//Фізико-хімічна механіка матеріалів, –Львів, –2003, –№1, –С.109–110.
14. Жигуц Ю.Ю., Похмурський В.І. Одержання твердих сплавів із застосуванням металотермії та саморозповсюджувального високотемпературного синтезу// Матеріалом. і мех. матеріалів. Праці наук. тов. ім. Шевченко, – Т.9, –2003, – С.131–137.
15. Zhiguts Yu. Yu. Thermit smelting of copper alloys Acta Metallurgica Slovaca. Special issue, –1999, –No.2, –P.418–421.
16. Жигуц Ю.Ю., Скиба Ю.Ю. Патент №20031212779. Екзотермічна суміш для металотермічних ливарних додатків бронзових виливків. Бюл. №9, 2004.
17. Жигуц Ю.Ю. Патент №2001106813. Екзотермічна суміш для живлення виливків з високолегованих сталей//Бюл. №9, 2002.
18. Жигуц Ю.Ю. Патент №2001129089. Металотермічний реактор// Бюл. №1, 2003.
19. Жигуц Ю.Ю. Використання термітних легованих чавунів для живлення прокатних валків// Вісник СумДУ, Суми, –2004, –№2(61), –С.134–140.
20. Жигуц Ю.Ю., Скиба Ю.Ю. Патент №2001106677. Екзотермічна суміш для термітних ливарних додатків//Бюл. №11, 2002.
21. Жуков А.А., Жигуц Ю.Ю., Шилина Е.П., Мажумдар Дж. Датта. Обработка материалов ЛПЗ и СВС// Изв. ВУЗов. Черная металлургия, –М.:, –1998, – №5, —С.60–63.
22. Жуков А.О., Жигуц Ю.Ю., Шилина Е.П., Мажумдар Дж. Датта. Комбінована обробка за допомогою лазерного поверхневого зміцнення і саморозповсюджувального високотемпературного синтезу//Науковий вісник УжНУ, Серія Фізика, –№ 10, –Ужгород, – 2001, –С.31–34.

## MATERIALS SYNTHESIZED METALLOTHERMY AND SHS PROCESSES

**Yu.Yu. Zhiguts, V.I. Pokhmursky\*, Yu.Yu. Skyba, Ya.P. Legeta**

Uzhgorod National University, Uzhgorod, Ukraine, 88000

\*Karpenko Physic-Mechanical Institute, Lviv, Ukraine, 79060

The modern problem of the creation new material and improvements characteristic traditions is need of the emergency fabrication of the qualitative spare parts and instrument on enterprise and in manufacturing, where haven't corresponding to technological base. These problems can successfully dare to account of the use alloy, got by way of the incineration exothermic powdered mixtures. This method allows spare material and in mass and in large-volume production of the details. Exactly so actual is and study alloy, got on base selfpropagation hightemperatures syntheses (SHS) and multifunction (metalotermic+SHS) of the processes.