

УДК 621.793

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/04>**Лузан С.О.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ситников П.А.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

САМОПОШИРЮВАНИЙ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИЙ СИНТЕЗ: СТАН, ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Роботу присвячено одній з актуальних проблем галузевого машинобудування – підвищенню ресурсу деталей сільськогосподарської та ґрунтообробної техніки за рахунок нанесення зміцнюючих та відновлювальних покриттів на основі композиційних матеріалів. У якості перспективного методу отримання композиційних матеріалів запропоновано використання – самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС), одного з високотехнологічних, наукоємних, енерго- та ресурсозберігаючих методів. Висвітлено історичні передумови та внесок О. Г. Мержанова, І. П. Боровінської та В. М. Шкиро у відкриття нового фізичного явища «твердого полум'я», що стало основою до появи СВС, ретроспективно наведені основні етапи його формування та розвитку. На основі огляду вітчизняних наукових робіт та розробок з використанням СВС-технології висвітлено створення трибологічних матеріалів типу TiFe-xC, проаналізовано та порівняно результати з розробки пористих (фільтраційних) металокерамічних матеріалів з використанням відходів машинобудування, представлено результати математичних розрахунків СВС-реактору та деяких реакцій синтезу, окреслено можливості суміщення СВС з технологіями нанесення покриттів. Авторами статті наведено власні наукові результати щодо розробки композиційного матеріалу, отриманого з використанням самопоширюваного високотемпературного синтезу та попередньої механічної активації вихідних реагентів, що містять у якості зносостійких дисперсних фаз оксиди SiO_2 та Al_2O_3 . На основі проведених досліджень підтверджено перспективність використання розробленого композиційного матеріалу зі структурою «зміцнююча фаза – матриця» {10 % (Ti-C-SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃-Al- ПТ-НА-01) + 90 % (ПГ-10Н-01)} для дугового наплавлення зміцнюючих та відновлювальних покриттів деталей машин. В кінці роботи сформульовано загальні висновки та наведено перелік подальших перспективних досліджень за цим напрямом.

Ключові слова: самопоширюваний високотемпературний синтез, композиційний матеріал, технологія, зносостійкість, ресурс.

Постановка проблематики. Розробка матеріалів з новими властивостями, як і раніше, визначає рівень сучасної науки і техніки. В теперішній час композиційні матеріали¹ (КМ) знаходять все більше поширення в різноманітних галузях. Створення КМ, що мають комплекс нових (порівняно з металами та сплавами) властивостей, дозволяє вирішити найважливіші технічні завдання, особливо в галузях машинобудівного, військово-промислового комплексів, ракето- та авіабудування [1, 2].

Перспективним способом отримання нових матеріалів, в тому числі і композиційних, є самопоширюваний високотемпературний синтез (СВС), суть якого полягає у локальному іні-

ціюванні екзотермічних реакцій між вихідними реагентами, що дозволяє генерувати значну кількість тепла для поширення фронту фізико-хімічних перетворень, утворюючи продукти синтезу. Розвиток СВС-технологій обумовлює докорінні зміни у традиційному виробництві порошкових та композиційних матеріалів, підвищує продуктивність праці, відкриває перспективні шляхи до створення об'єктів нової техніки, призначеної для використання у різних умовах експлуатації [3].

Починаючи з 70-х років ХХ ст. вітчизняними та закордонними вченими створено понад 500 видів синтезованих з'єднань, отримано чисельні тугоплавкі сполуки різного хімічного та фазового складу. Ці матеріали мають властивості, які не можливо, або досить важко отримати при традиційних технологіях металургійного виробництва матеріалів.

Основні переваги СВС-технологій перед традиційними технологіями металургійного

¹ Композиційні матеріали (КМ) – це гетерофазні матеріали, окремі фази яких виконують спеціальні задані функції. КМ вдається поєднувати в собі властивості кожного вихідного компоненту, оскільки його властивості формуються за рахунок додавання компонентів (адитивність), або за рахунок їх спільного посилення (синергізм) [1].

виробництва полягають у мінімальних втратах матеріалів під час процесу синтезу, спрощені та скороченні кількості технологічних операцій, що можуть бути сконцентровані у межах одного підприємства, чисельному зменшенні парку верстатного обладнання, а також економії електроенергії.

Постановка завдання. Аналіз вітчизняних наукових і прикладних досліджень у галузі самопоширюваного високотемпературного синтезу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нагадаємо досить коротко деякі відомості щодо відкриття СВС, потрібні для подальшого викладення основного матеріалу. В середині 50-х років ХХ ст., згідно рішення Ради Міністрів СРСР, при Інституті хімічної фізики АН СРСР (ІХФ АН СРСР), недалеко від с. Черноголовка (Московська обл.) було організовано науково-дослідний полігон, перед яким поставлено задачу зі створення потужної експериментальної бази для розвитку робіт з вивчення фізико-хімічних та вибухових властивостей матеріалів. Загальне керівництво колективом полігону в той період особисто здійснював тогочасний директор Інституту лауреат Нобелівської премії з хімії М. М. Семенов. Доволі швидко, головним чином враховуючи ефективні результати роботи над проблемами твердих ракетних палив, полігон, за рішенням М. М. Семенова, було трансформовано у відокремлений філіал ІХФ АН СРСР [4, 5].

Розширивши перелік наукових напрямів, у новоствореному філіалі для вирішення теоретичних та практичних задач спалаху та переходу горіння у детонацію було відкрито однойменну лабораторію, яку очолив молодий вчений-дослідник О. Г. Мержанов, один з талановитих представників наукової школи М. М. Семенова. Одним з головних наукових напрямів лабораторії, а відповідно і її керівника, стало дослідження механізмів горіння балістичного пороху. В той час, незважаючи на значну кількість наукових розробок за цим напрямом, залишалося остаточно не вирішеним питання щодо того, яка з трьох зон тепловиділення порохової суміші (конденсована, димно-газова, газова) була головною. Ця проблема потребувала нагального вирішення. Спираючись на попередній практичний досвід з порохової тематики, О. Г. Мержанов вирішує розробити та дослідити «безгазові» моделі горіння пороху.

Найпростіші класичні реакції горіння пороху передбачають хімічні реакції розкладу, при яких, як правило, з однієї складної речовини утворюються дві або декілька інших речовин. Враховуючи це, О. Г. Мержанов вирішує використати

в якості вихідного реагенту ацетиленід міді Cu_2C_2 , здатний до вибухоподібного розкладання хімічної системи на тверду мідь (Cu) та вуглець (C) зі значним утворенням теплоти. Однак, навіть при умові абсолютно просушеного реагенту Cu_2C_2 досить важко отримати цілком безгазовий процес. При проведенні цих дослідів відбувся вибух, що призвело до відмови від подальших досліджень цього реагенту. Тоді вчений приймає рішення спробувати замінити класичну реакцію розкладу на не класичну реакцію синтезу. У 1967 р. спільно з І. П. Боровінською та В. М. Шкіро він синтезує експериментальну модель на основі порошоків титану (Ti) та бору (B). Синтез Ti – B відбувся доволі стабільно з поширенням тепла від одного шару до іншого, змінивши колір від яскраво жовтого до червоного. При цьому був відсутній процес утворення газоподібних продуктів, а сам зразок не втратив ані форми, ані розмірів, перетворившись у твердий, як «алмаз», спік. Майже одразу нове фізичне явище за рішенням його розробників отримало свою назву – «тверде полум'я».

На початку 70-х років на основі «твердого полум'я» було синтезовано системи типів Me – C, Me – Si, Me – N₂ та отримано чисельні тугоплавкі з'єднання різних типів (бориди, оксиди, нітриди та ін.), на основі чого запропоновано нові напрями досліджень конденсованих систем. В цей час був накопичений значний обсяг теоретичних і експериментальних відомостей щодо режимів нестійкого горіння, методології отримання з'єднань з вибором оптимальних умов процесу. Ці результати дали поштовх до розвитку принципово нового напрямку створення матеріалів – самопоширюваного високотемпературного синтезу (офіційна назва з 1972 р.). Зазначимо, що фізичне явище «тверде полум'я» є первинною стадією СВС, за якою протікають вторинні (об'ємні) процеси, зокрема, догорання, фазо-та структуроутворення.

Враховуючи велику наукову та практичну актуальність проблематики СВС, вже з середини 70-х років відбулося створення нових цілеспрямованих дослідницьких груп у Єревані, Томську та Києві. У 1975 р. в місті Кіровка (Вірменська РСР) було відкрито перше спеціалізоване підприємство з використанням СВС-продуктів для виробництва високотемпературних нагрівачів на основі дисиліциду молібдену.

Важливим етапом в утвердженні СВС як нового наукового напрямку стала опублікована у 1982 р. стаття Джона Крайдера «Самопоширюваний високотемпературний синтез – радянський метод отримання матеріалів», яка сприяла форму-

ванню дослідницьких груп з цієї проблематики в країнах Американського континенту (США, Канада), Європи (Німеччина, Франція, Велика Британія, Польща, Італія, Іспанія) та Сходу (Японія та Китай). Нині, на основі аналізу наукових публікацій (Web of Science) можна відзначити, що дослідженнями в галузі СВС–процесів займаються вчені з 117 країн світу [6].

Виклад основного матеріалу дослідження.

Залишаючи для окремого розгляду дослідження СВС результатів закордонних колег, звернемося до вітчизняних наукових напрацювань та розробок. Зрозуміло, що у контексті короткої оглядової статті не можливо охопити всі наукові доробки та отримані результати. Тому розглянемо лише ті, які є найбільш інформативними та поширеними.

Структурно-операційна схема СВС-технології базується на трьох основних операціях: підготовка вихідної шихти, безпосередньо СВС-реакція, обробка та дослідження отриманого продукту. Враховуючи це, спробуємо навести результати робіт [7 – 17] за структурно-операційними схемами.

Наукові дослідження структури та трибологічних характеристик матеріалів типу TiFe-xC, отриманих за допомогою СВС, розглянуто в роботі [7]. В якості вихідних реагентів використано чисті ($\geq 99,5$ % мас) порошки титану Ti, заліза Fe, вуглецю C та бору B. Підготовленні для реакції матеріали попередньо очищували розчином ацетону для видалення з їх поверхонь інших хімічних сполук та підвищення адгезії. При формуванні дослідних вихідних сумішей системи TiFe-xC здійснено варіювання кількості вуглецю, яке складало 0; 10; 20; 30 та 40 % мас. Також, для суміші 55Ti–20C–30Fe–nB здійснено варіювання вмісту бору, що складав від 0,31 до 0,50 % мас.

Змішування та механічну активацію вихідних компонентів було проведено у кульовому млині, об'ємом 2 дм³ впродовж 8 хв., після чого отриману шихту спресовано під тиском у 150 МПа та завантажено до спеціалізованого реактору, де проведено СВС-процес.

За результатами металографічних досліджень встановлено, що матричною фазою для всіх дослідних зразків системи TiFe–10C, TiFe–20C та 55Ti–20C–30Fe–0,31B є феритна структура на основі заліза з включеннями інтерметалідів типу Ti₂Fe та TiFe. Додавання вуглецю впливає на структуру інтерметаліду TiFe. Так, при його збільшенні зростає кількість карбіду титану TiC та знижується вміст кисню O₂.

Додавання бору до системи TiFe-xC зменшує температуру спікання шихти за рахунок утворення легкоплавкої евтектики, а утворений борний ангідрид B₂O₃, що вступає в реакцію з оксидами заліза та титану, утворює борати титану TiO₂B₂O₃ та борати заліза FeB₂O₃.

Показники мікротвердості та зносотривкості отриманих зразків залежать від вмісту вуглецю та бору. Так, в суміші 45Ti–10C–45Fe, зі збільшенням бору від 0,31 до 0,50 % мас. мікротвердість зростає від HV 850 до 855. Для матеріалу з вмістом вуглецю 40 % мас. з таким збільшенням бору, цей показник складає від HV 775 до 788. Для системи TiFe-xC з підвищенням вмістом вуглецю від 0 до 40 % мас. мікротвердість зразку знижується від HV 870 до 800, що пояснюється появою значної кількості аустеніту. Таке зниження мікротвердості відповідно впливає на зменшення у 1,1 рази абразивної зносостійкості. Аналогічні дослідження виконано і для системи TiFe-xC-B, в якій зі збільшенням бору від 0,31 до 0,50 % мас. зношування зразка зростає, а показник зносостійкості зменшується. В роботі також встановлено їх оптимальне співвідношення у вихідній суміші.

Розроблені трибологічні матеріали TiFe-20C та TiFe-20C-0,31B, отримані з використанням СВС, призначені для роботи в умовах абразивного та сухого тертя. Вони рекомендовані для захисту поверхонь ступок сопел реактивних двигунів, що працюють в умовах високих температур та навантажень.

Оригінальні наукові результати зі створення металокерамічних пористих матеріалів з використанням відходів машинобудування наведено в роботі [8]. Вихідними матеріалами суміші є окалина сталі 18X2H4MA, порошок оксиду алюмінію Al₂O₃ (ТУ 48-5-22-87), природний матеріал – сапоніт Ташківського родовища та 6 видів пороутворювачів. Оптимальний склад компонентів шихти складав: сапоніт 30 %, Al₂O₃ 30 %, окалина 30 %, пороутворювач 10 %. В якості пороутворювачів використовували: карбамід (CH₄N₂O), поліетиленгліколь (C₂nH₄n+2On+1), карбонат кальцію (C_nCO₂), гідрокарбонат натрію (NaHCO₃), карболіт (CO(NH₂)₂) та хлорид натрію (NaCl).

Процес змішування вихідних реагентів здійснювали у кульовому млині з набором сталевих куль діаметром 20 мм, протягом 2 годин. Після цього отриману суміш змішували з клеєм КМЦ-Н (ТУ 6-15-1077-92) та пресували під тиском 25 МПа. Отриманий зразок мав форму циліндру \varnothing 30 мм, висотою 40 мм. СВС-реакцію здійснювали у реакторі, розробленому науковцями Луцького національного технічного університету [9].

Отримані синтезовані зразки, не залежно від виду пороутворювача, мали високу твердість, тріщиностійкість та міцність. Площа пористості зразку, визначена за мікрофотографіями шліфів за допомогою програми Smart-eye, становила 15–20 %. Основною фазою матеріалу були оксид заліза (Fe_2O_3) та оксид алюмінію (Al_2O_3). На основі аналізу одержаних структур було встановлено, що найбільш прийнятими пороутворювачами є карбамід та гідрокарбонат натрію. Отриманні зразки мали достатню міцність, пористість та фільтраційні властивості, що дозволяло рекомендувати їх у якості пористих (фільтраційних) матеріалів.

Відомі дослідження щодо використання СВС у технологіях легування хромоалітованих захисних покриттів (ХЗП) наведені в роботі [10], де легування здійснено бором, кремнієм та титаном. При дослідженні отриманої мікроструктури багатокомпонентного хромоалітованого захисного покриття, легованого кремнієм Si, встановлено роль алюмінію у вихідній суміші до СВС-процесу. Автори роботи зазначають, що при вмісті алюмінію 7 % мас. покриття є пористим та при витримці протягом 1 год. за температури 1000 °C складає від 40 до 45 мкм, товщина та компактність покриття зростає зі збільшенням вмісту алюмінію від 11 до 15 % і досягає максимального значення у 80 мкм при вмісті 15 % мас. Основними фазами покриття, легованого кремнієм, є $(\text{Fe}_2\text{Cr})_{23}\text{C}_6$, $(\text{FeCr})_7\text{C}_3$, Fe_3Al , $(\text{FeCr})_3\text{Si}$. В роботі наведено дослідження ХЗП, леговані титаном ($(\text{Fe}_2\text{Cr})_{23}\text{C}_6$, $(\text{FeCr})_7\text{C}_3$, Fe_3Al , Cr_2Ti) та леговані бором ($(\text{Fe}_2\text{Cr})_{23}\text{C}_6$, $(\text{FeCr})_7\text{C}_3$, Fe_3Al , $(\text{Fe,Cr,Al})_2\text{B}$).

На основі проведених досліджень розроблені нові леговані хромоалітовані захисні покриття і склад шихт для СВС-реакцій, застосування яких рекомендовано для підвищення міжремонтних ресурсів деталей.

Заслуговує на увагу робота [11], в якій виконано математичний розрахунок кількості теплоти для здійснення СВС-процесу в реакторі. При використанні математичних описів СВС-реакторів можливо вирішення двох головних задач: по-перше, в залежності від заданої конструкції та параметрів вихідного потоку визначити параметри процесу та характеристики теплового потоку, по-друге, в залежності від параметрів вхідного та вихідного потоків підібрати конструкцію установки та безпосередньо параметри самого СВС-процесу.

Математичне моделювання СВС-процесів гетерогенних порошкових сумішах розглянуто в роботі [12]. Авторами розроблено математичну модель та наведено результати числового дослі-

дження поширення фронту горіння СВС-складу, коли швидкість хімічного реагування в кожній точці по довжині СВС-зразку визначається з вирішення задачі дифузії та хімічного реагування в реакційних скринях. На основі результатів досліджень отримано залежності швидкості фронту горіння від розміру середнього елементу гетерогенної структури при різних значеннях інтенсивності дифузії.

В останні роки з'явився ряд робіт, спрямованих на одночасне суміщення СВС з різноманітними технологіями нанесення покриттів. Так, авторами роботи [13] виконано аналіз відомих напрацювань з цього напрямку та визначено, що одним з перспективних до подальшого опрацювання є метод суміщення СВС-реакції з електродуговим методом нанесення покриттів.

Поєднання технології поверхневого зміцнення матеріалу лазерною обробкою та СВС розглянуто в роботах [14, 15]. У якості вихідних реагентів використано суміш порошків титану Ti (68 %), вуглецю C (18 %) у вигляді сажі та заліза Fe (14 %). Дійсну суміш було розведено 2 % розчином латексу в бензині та нанесено на дослідні зразки зі сталі 10 та 20, після чого підсушено на повітрі. Утворені шари покриттів складали 80, 200 та 500 мкм. Підпал зразків здійснювали променем CO_2 -лазера безперервної дії з поздовжньою накачкою типу «Кардамон». Основні показники режиму складалі: потужність 850 Вт, густина 15–20 Вт·м², діаметри плями 0,3–1,0 мм. Швидкість сканування змінювали у межах від 10 до 20 мм·с⁻¹.

Згідно з результатами досліджень зміцненого шару встановлено його товщину (500 мкм) та фазовий склад (~50 % TiC та 50 % металеві зв'язки зі сталі типу У8). Заміна у вихідній суміші залізного порошку вуглецевим ферохромом (12 % Fe + 2 % FeCr замість 14 % Fe) дозволяє змінити матеріал зв'язки зі сталі У8 на сталь У12, яка має аустенітно-мартенситно-карбідну структуру. Твердість такої карбідо-сталі досягає HV 1400.

Запропонований спосіб суміщення СВС та лазера дозволяє виконувати процес відновлювання зношених поверхонь деталей машин до 0,5 мм.

Важливо відміти, що зазначений напрям суміщення СВС з технологіями отримання покриттів, не зважаючи на вагомий комплекс робіт, потребує подальших досліджень. Це пояснюється тим, що при класичній СВС-реакції (при ідеальних умовах) відбувається повне перетворення (синтез) вихідних реагентів, які володіють більш кращими хімічними, фізичними, а відповідно і механічними властивостями.

Поглибленні наукові дослідження щодо розробки композиційного матеріалу на основі сплаву системи Ni-Cr-B-Si, модифікованого боридами титану та нікелю, наведено в роботах [16, 17]. Відомо, що сполуки металів з бором (бориди), мають високу твердість в поєднанні з пластичними властивостями, що може рекомендувати цей елемент у якості мікролегуючого. Вихідними реагентами для отримання композиційного матеріалу були порошки титану Ti марки BT1-0, бору B, вуглецю C (ПМ-15), з метою підсилення реакції в механічну суміш було додано термореагуючий порошок алюмінію нікелю ПТ-НА-01, алюміній Al у вигляді пудри та оксид заліза Fe₂O₃.

Вихідні компоненти змішувалися, після чого відбувалося їх механічна активація у кульовому млині АГО-2. Час механічної активації складав від 2 до 6 хв. Після механічної активації отриману суміш змішували з клеєм «Метинал», формували циліндричний зразок та здійснювали його просушування. Ініціювання СВС-реакції виконували за допомогою дугового розряду. Отриманий спік подрібнювали до порошкового стану та додавали до самофлюсованого сплаву ПГ-10Н-01, після чого виконували його повторну механічну активацію. Для отримання пастоподібної маси до композиційного матеріалу додавали рідке скло. Отриману пасту наносили на деталь зі сталі 20, після чого здійснювали процес дугового наплавлення.

В результаті проведених досліджень було встановлено, що основою композиційного покриття є матричний матеріал ПГ-10Н-01, в якому рівномірно розподілені тверді вclusions дибориду титану, бориду нікелю, оксиду титану та заліза. Мікротвердість наплавлених покриттів, що містять 10 % модифікованого композиційного матеріалу, перевищує мікротвердість наплавленого ПГ-10Н-01 (HV 520) і становить HV 740. Розроблений композиційний матеріал рекомендовано для зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин.

Авторами цієї статті було розроблено композиційний матеріал зі структурою «зміцнююча фаза – матриця» для підвищення зносостійкості деталей, що працюють в умовах абразивного зношування. Для синтезу модифікованого матеріалу були використані порошки Ti, C, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, Al, ПТ-НА-01, попередньо підібрані за стехіометричним співвідношенням. Компоненти SiO₂ та Al₂O₃ до вихідної суміші було додано у вигляді бентонітової глини (ГОСТ 28177-89), з відповідним розподілом 58,8 % та 17,6 % мас. Після змішування вихідних реагентів було здійс-

нено їх диспергування (механічну активацію), таблетування (сформовано циліндричний зразок) та сушіння, після чого ініційовано СВС-реакцію. Отриманий спік (матеріал зміцнюючої фази) було подрібнено до порошкоподібного стану та додано у кількості від 10 до 30 % до матеріалу матриці. В якості матеріалу матриці використовували самофлюсований сплав ПГ-10Н-01. Після проведення повторної механічної активації КМ {10 % (Ti-C-SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃-Al-ПТ-НА-01) + 90 % (ПГ-10Н-01)} змішували з рідким натрієвим склом для отримання пастоподібної маси. Отриману масу перед процесом наплавлення наносили шаром 3 – 4 мм на поверхню дослідного зразка зі сталі 45. Наплавлення здійснювали графітовим електродом діаметром 6,5 мм, при Iзв = 110 А на прямій полярності. В якості джерела живлення використовували зварювальний інвертор постійного струму СВ-290 НК.

За результатами випробувань на абразивне зношування в умовах тертя зі закріпленими абразивними частинками (ГОСТ 17367-71) встановлено, що зносостійкість наплавленого покриття КМ {10 % (Ti-C-SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃-Al-ПТ-НА-01) + 90 % (ПГ-10Н-01)} у 1,8 рази є вищою порівняно з покриттям самофлюсованим сплавом ПГ-10Н-01.

На основі проведених досліджень підтверджено перспективність використання розробленого композиційного матеріалу КМ {10 % (Ti-C-SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃-Al-ПТ-НА-01) + 90 % (ПГ-10Н-01)} для дугового наплавлення зміцнюючих та відновлювальних покриттів деталей машин.

Висновки. Наведений в роботі аналіз наукових результатів, виконаний на основі огляду напрацювань вітчизняних вчених свідчить про те, що самопоширюваний високотемпературний синтез, як окремий науковий напрям постійно поповнюється суттєвими досягненнями, які дозволять розробити принципово нові матеріали і розширити області їх практичного використання. Серед цих досягнень необхідно зазначити синтез понад 500 видів з'єднань та отримані чисельні сполуки різного хімічного і фазового складу (карбіди, нітриди, бориди, інтерметаліди та ін.); створення на їх основі матеріалів різноманітного функціонального призначення (конструкційні, функціональні та композиційні), апробацію та використання розроблених СВС-матеріалів у машинобудуванні, металургії, електроніці та ін.

Поряд з цим перспективними науковими напрямами до подальшого розвитку СВС-процесів є:

– розробка та удосконалення конструктивних механізмів діагностики і математичного моделювання СВС-процесів з побудовою їх фізико-хімічних моделей, зокрема розгляду динаміки процесів фазо- та структуроутворення;

– розширення номенклатури реагентів до ініціювання СВС-реакцій, з використанням різних типів мінеральної сировини (глини, піщаних матеріалів), твердих промислових та радіоактивних відходів (плавильні шлаки,

металева стружка) та інших матеріалів у якості вихідних;

– отримання багатокомпонентних композиційних керамічних та металокерамічних матеріалів, в тому числі матеріалів з диференційними складами та властивостями в об'ємі;

– подальше освоєння нових сфер використання СВС-матеріалів у машинобудівному та військово-промисловому комплексах, космічному та авіаційному матеріалознавстві та піротехніці.

Список літератури:

1. Наука про матеріали: Досягнення та перспективи / редкол.: Л. М. Лобанов (голова) та ін. Київ : НАН України, Академперіодика, 2018. Т. 1. 652 с.
2. Физико-технические проблемы современного материаловедения / редкол: И. К. Походня (предс.) и др. Киев: НАН Украины, Академперіодика, 2013. Т. 1. 538 с.
3. Концепция развития СВС как области научно-технического прогресса. / редкол: А. Г. Мержанов (предс.) и др. Черноголовка: «Территория», 2003. 368 с.
4. Kharatyan, S. L., Merzhanov, A. G. Coupled SHS Reactions as a Useful Tool for Synthesis of Materials: An Overview. *International Journal of SHS*. 2012. Vol. 21, P. 59–73.
5. Merzhanov, A. G., Borovinskaya, I. P. Historical retrospective of SHS: An autoreview. *International Journal of SHS*. 2008. Vol. 4, P. 242–265.
6. Боровинская И. П. Академик Александр Григорьевич Мержанов: от научного открытия к промышленному производству. *Горение и взрыв*. 2018. № 4. С. 130–146.
7. Онищук О. О., Рудь В. Д. Структури та трибологічні характеристики трибологічних матеріалів TiFe-xC, отриманих самопоширюваним високотемпературним синтезом. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2013. № 3. С. 123–128.
8. Повстяна Ю. С., Савюк І. В., Самчук Л. М., Зубовецька Н. Т. Одержання поритих металокерамічних матеріалів із використанням відходів машинобудування в режимі самопоширюваного високотемпературного синтезу. *Журнал інженерних наук*. 2016. № 3. С. 6–12.
9. Реактор для проведення самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС-процесу): пат. 91287 Україна: UaB22F 3/23 C01G 1/00.; заявл. 11.02.14; опубл. 25.06.14, Бюл. № 12. 5 с.
10. Белоконь Ю. О., Кулинич В. Д., Драгобецький В. В., Середа Д. Б. Перспективи розвитку технологій та обладнання саморозповсюджувального високотемпературного синтезу. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського*. Кременчук, 2021. № 6. (131) С. 110–115.
11. Самчук Л. М. Розрахунок теплового балансу для СВС-реактору. *Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій та управління. Серія Нові технології*. Кременчук, 2013. № 1–2. С. 33–38.
12. Шульц Д. С., Крайнов А. Ю. Математическое моделирование СВС процесса в гетерогенных реагирующих порошковых смесях. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2011. № 2. С. 147–153.
13. Лучак Д. Л., Криль Я. А., Пилипенко О. В. Застосування самопоширюваного високотемпературного синтезу в технологіях нанесення зносостійких покриттів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. Івано-Франківськ, 2015. № 2 (55). С. 43–50.
14. Жигуц Ю. Ю., Похмурський В. І., Скиба Ю. Ю., Легета Я. П. Матеріали синтезовані металотермією і СВС-процесами. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика*. Ужгород, 2004. № 16. С. 93–103.
15. Жуков А. О., Жигуц Ю. Ю., Шиліна Е. П., Курітник І. П. Поверхневе зміцнення матеріалів за допомогою лазерної обробки і саморозповсюджувального високотемпературного синтезу. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. Львів, 2002. № 442. С. 133–137.
16. Luzan, S.O., Luzan, A.S. Microstructure and Abrasive Wear Resistance of Deposited Materials of the Ni–Cr–B–Si System with Inclusions of Dispersed Phases. *Materials Science*, 2020. Vol. 56 (3), P. 381–388. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00441-x>
17. Luzan, S. A., Sidashenko, A. I., Luzan, A. S. Composite material for hardening of tillage machines working bodies containing titanium and chromium borides synthesized using SHS-process. *Metallofizika and Noveishie Tekhnologii*, 2020. Vol. 42 (4), P. 541–552. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.42.04.0541>

Luzan S.A., Sytnykov P.A. SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS: STATE, PROBLEMS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

This work is devoted to one of the top problems of mechanical engineering – increasing the resource of parts of agricultural and tillage machinery, using the application of strengthening and restorative coatings based on composite materials. As a promising method of obtaining materials used self-propagating high-temperature synthesis (SHS), one of the high-tech, science-intensive, energy- and resource-saving methods, is proposed. The historical background and the contribution of O. G. Merzhanov, I. P. Borovinska and V. M. Shkyro to the discovery of a new physical phenomenon «solid flame», which became the basis for the appearance of SHS, are highlighted and the main stages of its formation and development are retrospectively shown. Based on a review of domestic scientific works and developments using SHS -technology, the creation of tribological materials of TiFe-xC type is reflected, results of development of porous (filtration) cermet materials using machine-building waste are analyzed and compared, and results of mathematical calculations of SHS reactor and some synthesis reactions are presented, possibilities of combining SHS with coating technologies are determined. The authors present their own scientific results of development of a composite material obtained using SHS and preliminary mechanical activation of initial reagents containing SiO₂ and Al₂O₃ oxides as wear-resistant dispersed phases. On the basis of the conducted research, the prospects of using the developed composite material with the structure «strengthening phase – matrix» {10 % (Ti–C–SiO₂–Al₂O₃–Fe₂O₃–Al– PT-NA-01) + 90 % (PG-10H-01)} for arc welding of strengthening and restoring coatings of machine parts. The article formulates general conclusions and a list of further promising studies in this area.

Key words: self-propagating high-temperature synthesis, composite material, technology, wear resistance, resource.