

РЕТРОСПЕКТИВНИЙ АНАЛІЗ ФОРМУВАННЯ ТА РОЗВИТКУ САМОПОШИРЮВАНОГО ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗУ

Сергій Лузан

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Зварювання»

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, khadi.luzan@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4808-0017

Павло Ситников

аспірант кафедри «Зварювання»

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, pavel.welder@ukr.net

ORCID: 0000-0001-6656-0180

На основі огляду історичних матеріалів наведено результати ретроспективного аналізу розвитку досліджень із самопоширюваного високотемпературного синтезу як сучасного напрямку в галузі матеріалознавства та хімічної фізики. Створення матеріалів на основі самопоширюваного високотемпературного синтезу полягає у локальному ініціюванні екзотермічних хімічних реакцій між вихідними реагентами, що дозволяє генерувати значну кількість тепла у фронті горіння, який самостійно поширюється через всі вихідні реагенти, утворюючи продукти синтезу. У статті детально описані особливості появи відокремленого філіалу Інституту хімічної фізики АН СРСР та огляд напрямів наукових досліджень М.М. Семенова, Д.А. Франк-Камінського, О.М. Тодеса та Я.Б. Зельдовича. Розглянуто основні передумови відкриття раніше не відомого фізичного явища «твердого полум'я», на основі якого було запропоновано самопоширюваний високотемпературний синтез та висвітлено внесок О.Г. Мержанова, І.П. Боровінської та В.М. Шкіро. Визначено головні етапи подальшого розвитку самопоширюваного високотемпературного синтезу, подано переконливі приклади його успішного використання, представлено інформацію щодо появи перших цілеспрямованих наукових груп та спеціалізованих підприємств, які працювали у цьому напрямі. Розглянуто особливості організації та проведення Міжнародних наукових симпозіумів «Самопоширюваний високотемпературний синтез», відмічено важливі моменти щодо корегування його назви. На основі результатів проведених досліджень ґрунтовно доведено той факт, що матеріали, отримані з використанням самопоширюваного високотемпературного синтезу, мають принципово нові фізико-механічні та хімічні властивості, що робить перспективним застосування цього процесу в багатьох галузях науки і техніки.

Ключові слова: самопоширюваний процес, високотемпературний синтез, «тверде полум'я», композиційний матеріал, технологія, хімічний елемент.

Актуальність теми дослідження. Самопоширюваний¹ високотемпературний синтез (СВС) – пріоритетний напрям науки і техніки, що інтенсивно розвивається. За його допомогою можливе створення принципово нових матеріалів, які базуються на розумінні та прогнозуванні процесів структуроутворення та впливу на механізм формування структури з бажаними фізико-механічними властивостями. Технологія СВС, за рахунок проведення екзотермічних реакцій складових хімічних елементів у формі горіння, відрізняється своєю простотою та низькою енергоємністю [1].

Перевагою СВС-технології є її ініціювання у різних агрегатних станах речовин (суміші

порошків, гібридних системах «тверда – газоподібна», «тверда – рідка» та ін.), що забезпечує її універсальність. На основі СВС синтезовано понад 500 хімічних з'єднань, отримано чисельні тугоплавкі сполуки різного хімічного та фазового складу (карбіди, нітриди, силіциди, халькогеніди, інтерметаліди, гідриди, фосфіди) [2; 3; 5].

Області використання СВС-технологій невпинно зростають за рахунок створення спектру принципово нових порошкових та композиційних матеріалів в таких базових галузях, як машинобудування (абразиви, тверді сплави, зносостійкі наплавки), металургія (вогнетриви та феросплави), агропромисловий та оборонний комплекс (захисні метали, керамічні та гібридні покриття). СВС-покриття широко використовуються у медицині та мікроелектроніці.

¹ У деяких вітчизняних працях замість «самопоширюваний» доволі часто зустрічається – «саморозповсюджувальний», це пояснюється тим, що в українській мові ці словосполучення є однаковими відповідниками [4].

Перші дослідження з СВС були виконані на початку 50-х років та наприкінці 60-х років ХХ ст. Однак їх формування в новий науковий напрям з притаманними йому постулатами, предметом та методами досліджень відбулося лише в середині 70-х років ХХ ст. [6]. Значною мірою становленню СВС сприяли успіхи в галузі теорії горіння. Оскільки в пошуках принципово нових моделей безгазового горіння балістичного порошку група молодих вчених у складі О.Г. Мержанова, І.П. Боровінської та В.М. Шкиро наштотувалася на невідоме раніше нове фізичне явище «твердого полум'я», що стало основою відкриття СВС. Аналіз наукових результатів і розв'язання актуальних науково-технічних завдань з СВС, незважаючи на 55-річну історію свого існування, має суттєві досягнення, однак і нині залишається перспективним напрямом досліджень науки про матеріали.

Метою роботи є аналіз розвитку досліджень у галузі самопоширюваного високотемпературного синтезу.

Виклад основного матеріалу. Самопоширюваний високотемпературний синтез матеріалів як окремий науковий напрям був започаткований у 1967 р. радянським вченим О.Г. Мержановим. Отримавши перший експериментальний СВС-зразок, вчений зазначив: «Прошу мені повірити, я відразу зрозумів, що тримаю в руках продукцію майбутнього заводу» [7; 8].

Олександр Григорович Мержанов народився 1931 р. в Ростові-на-Дону. Ще в студентські роки, навчаючись на фізико-математичному факультеті Ростовського державного університету, Мержанов захопився наукою, складаючи та вирішуючи нові диференціальні рівняння з пошуком спеціальних функцій. Закінчивши у 1954 р. університет, молодий фахівець був розподілений інженером на Єреванський електроламповий завод, однак така професія не наближала його до заповітної мрії стати вченим [9].

Здійснити свою мрію допоміг незламний характер, у тому ж році йому вдається влаштуватися на роботу молодшим науковим співробітником Інституту хімічної фізики АН СРСР (ІХФ АН СРСР), який в той час очолював відомий організатор науки, лауреат Нобелівської премії з хімії Микола Миколайович Семенов. Там Мержанов показав себе працелюбним та талановитим дослідником. Він блискуче вирішив поставлені перед ним перші наукові задачі з розрахунку безпеки виготовлення потужних вибухових речовин з позиції теорії теплового вибуху. Поштовх до майбутнього відкриття самопоширюваного високотемпературного синтезу був зумовле-

ний інтенсивними фундаментальними дослідженнями О.Г. Мержанова та вирішенням практичних завдань з теорії горіння та вибуху, які вчений виконував впродовж 13 років з 1954 до 1967 рр. Цей період має назву «до СВС-період». У зв'язку із цим розглянемо його детальніше.

Теорія теплового вибуху ґрунтується на вирішенні системи рівнянь теплопровідності з тепловим джерелом та кінетикою хімічної реакції, при визначених граничних умовах, для різних моделей вихідної форми горючої речовини [10]. Фундаментальні дослідження з цієї проблеми здійснювали такі відомі вчені, як М.М. Семенов², О.М. Тодес³, Д.А. Франк-Камінський⁴ (рис. 1), в наукових працях яких були розглянуті найпростіші моделі теплового вибуху.

Вирішуючи поставлене завдання, Мержанов демонструє свій незламний характер – молодий дослідник не лише не користується раніше здобутими відомими результатами вчених, а навпаки, розпочинає виконувати всі теоретичні та експериментальні дослідження самостійно, що дозволяє більш широко ознайомитися з поставленою перед ним проблемою, самостійно її «відкрити», синтезувати отримані результати та зробити висновки.

² Семенов Микола Миколайович (1896–1986) – фізик-теоретик і хімік, учень А.Ф. Іоффе. Закінчив Петерб. ун-т (1917 р.). З 1931 р. дир. Ін-ту хімічної фізики АН СРСР. Розробник теорії ланцюгових хімічних реакцій, а в подальші роки – загальної теорії розгалужених, вироджено-розгалужених і нерозгалужених ланцюгових хімічних реакцій. Лауреат Нобелівської премії з хімії (1956 р.). Сформулював критичні умови теплового вибуху. Під його керівництвом були виконані дослідження із застосування теорії горіння у вибухових процесах.

³ Тодес Оскар Мойсейович (1911–1989) – фізик, учень Я.І. Френкеля. Закінчив Ленінгр. політехн. ін-т (1930 р.). Спільно з М.М. Семеновим, Я.Б. Зельдовичем, Д.А. Франк-Камінським та ін. створив вітчизняну наукову школу з горіння твердих речовин. Розробник нестационарної теорії теплового вибуху. Засновник методології використання теплонапружених кінетичних процесів з урахуванням каталітичних та адсорбційних факторів для газофазних процесів та кристалізаційних явищ у рідинних системах.

⁴ Франк-Камінський Давид Альбертович (1910–1970) – вчений у галузі фізики горіння, учень М.М. Семенова. Закінчив Томськ. технол. ін-т (1931 р.). З 1935 р. розпочав працю у Ін-ті хімічної фізики АН СРСР. Перший запропонував метод розкладання залежності константи швидкості хімічної реакції, при якому використовується розкладання в «ряд Тейлора» не самої константи швидкості, а її показника за експонентою (метод розкладання експоненти по Франк-Камінському). На його основі розвинуто теорію теплового вибуху з просторовим розподіленням температури. Спільно з Я.Б. Зельдовичем розробив теорію теплового розповсюдження ламінарного полум'я в газових системах [11].



Рис. 1. Вчені з теорії теплового вибуху:
а) М.М. Семенов, б) О.М. Годес, в) Д.А. Франк-Камінський

Мержанов самостійно «відкриває» перетворення експоненти по Франк-Камінському, «повторює» стаціонарну теорію теплового вибуху Семенова. При цьому отримує і власний, не відомий раніше, науковий результат. Розглядаючи нестационарну систему рівнянь, які описують тепловий вибух для автокатолітичних реакцій, він виявив, що за певних умов така реакція може самостійно прискорюватися і у екзотермічних умовах. В цьому випадку процес протікання реакції складається з ряду рівноважних, стаціонарних положень, за яких перехід від одного до іншого положення відбувається за рахунок ізотермічної зміни швидкості реакції. Критерієм квазістаціонарності процесу є мала швидкість теплового накопичення у порівнянні зі швидкістю теплоутворення. Близьке вирішивши поставлені завдання, О.Г. Мержанов сподобався М.М. Семенову, який запропонував перспективному молодому вченому продовжити працю в цьому напрямку і з того часу почав ставитися до нього з великою повагою.

Вагомий внесок О.Г. Мержанова було зроблено до теорії горіння пороху. У класичних підходах, які були сформульовані у 1942 р. Я.Б. Зельдовичем⁵, горіння пороху протікає за рахунок

⁵ Зельдович Яків Борисович (1914–1987) – вчений в галузі теорії горіння та вибуху. Навчався у Ленінгр. політехн. ін-ті, який не закінчив. У 1934 р. прийнятий до аспірантури Ін-ту хімічної фізики АН СРСР. Отримав нові важливі наукові результати з фізики горіння та вибуху, детонації та ядерної фізики. Фундатор теорії горіння. Розробник теорій: горіння нагартованої поверхні, теплового розповсюдження ламінарного потоку, границі розповсюдження полум'я, горіння конденсованих систем та ін. [11].

слабкої екзотермічної реакції в конденсованій фазі, продукти якої згорали за рахунок потужних екзотермічних реакцій газової фази. При цьому вважалося, що провідне місце в хімічній реакції належало взаємодії елементів у газовій фазі. Незважаючи на це, серед вчених з теорії горіння, в тому числі із Інституту хімічної фізики АН СРСР, ще не існувало остаточної думки щодо цього питання. Так, наприклад, відомий експериментатор О.Ф. Беляев відстоював думку про те, що провідна стадія горіння пороху знаходиться у газовій фазі, а завідувач відділу вибухових речовин П.Ф. Похил виокремлював у хвили горіння три зони тепловиділення (конденсовану, димову-газову та безпосередньо газову).

П.Ф. Похил відстоював думку про те, що важливою є проміжна зона (в той час ще не було остаточно зрозуміло як саме), яка утворюється при диспергуванні вихідного пороху [10; 12].

Наукові праці О.Г. Мержанова дозволили певним чином вирішити ці суперечки. Провівши дослідження в наближенні Зельдовича (нехтуючи теплом, що витрачається на прогрів пороху в процесі реакції), Мержанов отримав аналітичні формули, які дозволили оцінити ширину зони реакції та її швидкість у конденсованій фазі. Також на основі цих результатів стало можливим зробити висновок щодо провідної ролі диспергування (подрібнення) пороху. Результат був однозначним: швидкість горіння не залежить від тиску інертного газу, а відповідно до цього при горінні пороху є важливою конденсована фаза. Отримані результати, пов'язані з дослідженнями механізму



Рис. 2. Відкривачі фізичного явища «твердого полум'я»:
а) О.Г. Мержанов, б) В.М. Шкиро, в) І.П. Боровінська

горіння у конденсованій фазі, стали основою для захисту О.Г. Мержановим у 1959 р. кандидатської дисертації на тему «Дослідження теплового вибуху конденсованих систем» та одним з наукових підґрунть до майбутнього відкриття фізичного явища «твердого полум'я».

Важливою подією у розвитку наукових і прикладних досліджень з теорії горіння, а також роботи з потужними вибуховими зарядами, стало заснування у 1956 р. за ініціативою М.М. Семенова спеціалізованого полігону. Полігон було створено недалеко від селища Черноголовка (Московська обл.), а його керівником призначено Ф.І. Дубовицького.

Оцінюючи вагомі напрацювання співробітників полігону, у 1959 р. М.М. Семенов прийняв рішення перетворити його у відокремлений філіал Інституту хімічної фізики АН СРСР. У новоствореній структурі О.Г. Мержанову запропонували створити та очолити лабораторію спалаху та переходу горіння у детонацію. У свої 29 років О.Г. Мержанов став наймолодшим завідувачем лабораторії у структурі цієї установи [12].

Продовжуючи дослідження закономірностей моделей горіння балістичного пороху, О.Г. Мержанову було необхідно знайти суміші, які б горіли без утворення газового полум'я, так званні «безгазові суміші»⁶. Захопившись цією тематикою, він почав пошук простих систем, з яких у якості початкової обрав ацетиленід міді.

⁶ Безгазові конденсовані речовини при горінні не утворюють газоподібних продуктів, а отже, горіння протікає в гетерогенному режимі [13].

До вирішення цієї задачі він залучив студента-дипломника, а згодом і інженера-стажера В.М. Шкиро⁷. Основу тогочасної лабораторії Мержанова складала, як правило, фізики з теорії горіння. Враховуючи це, для її підсилення фахівцем-хіміком у кінці 1965 р. директор філіалу Ф.І. Дубовицький перевів молодого хіміка-синтетика І.П. Боровінську⁸ (рис. 2). Нині досить важко спрогнозувати, чи відбулося відкриття СВС, якби ці вчені не зустрілися в одному місці та в один час [14].

Спочатку до ідеї Мержанова використати у якості безгазової моделі горіння ацетиленід міді, враховуючи його вибухоподібну реакцію при розкладанні, І.П. Боровінська віднеслась доволі скептично, однак спробувала почати його синтезувати за відомими методиками. Ацетиленід міді Cu_2C_2 здатний до вибухоподібного розкладання на тверді мідь (Cu) та вуглець (C),

⁷ Шкиро Валентин Михайлович (1942–2009) – один з авторів відкриття СВС. Випускник Томськ. держ. ун-ту (1965 р.). З 1965 р. розпочав роботу у філіалі Ін-ту хімічної фізики АН СРСР в лабораторії спалаху та переходу горіння у детонацію. Отримав нові важливі наукові результати з розвитку теорії горіння та механізму горіння гетерогенних конденсованих систем та процесів СВС.

⁸ Боровінська Інна Петрівна (1934–2018) – одна з авторів відкриття СВС. Закінчила Уральськ. політехн. ін-т (1957 р.). З 1960 р. розпочала роботу у філіалі Ін-ту хімічної фізики АН СРСР в лабораторії органічної хімії. Вперше сформулировала уявлення про механізм самопоширюваних процесів у реагуючій парі «тверде-газ», що було закладено в основу СВС. Розробник методології проведення хімічних синтезів, заснованих на попередньому вивченні процесів горіння [14].

з суттєвим утворенням теплоти. У таких умовах синтезувати абсолютно сухі суміші, без кристалізованої води, не вдавалося, за рахунок чого було досить трудомістко отримати безгазовий процес. При проведенні цих дослідів відбувся вибух, що призвело до відмови від подальшого дослідження цього реагенту.

Аналітичний склад розуму та розвинена наукова інтуїція наштовхнули О.Г. Мержанова на ідею замінити класичну реакцію розкладу на некласичну реакцію синтезу. Для цього проаналізували термодинамічні довідники, щоб віднайти речовини, які можна використати у якості вихідних реагентів. Однак широка номенклатура таких речовин зумовила необхідність консультації з фахівцями-неоорганіками, а саме з Г.М. Ничепоренком та Б.М. Таракановим, які рекомендували зупинитися на системі «тугоплавкий метал – неметал», спираючись на позицію високої екзотермічної реакції продуктів горіння. Знайшовши потрібні вихідні реагенти, було досліджено безгазові системи $Ti - C$ та $Ti - B$. Експериментальний зразок горів досить гарно, переносячи тепло від одного шару до іншого, змінюючи свій колір від яскраво жовтого до червоного. Газу не утворювалися, зразок не втратив ані форми, ані розмірів, а перетворився у твердий, як «алмаз» спек. Такий процес горіння, розробники назвали «твердим полум'ям» [15].

Ці результати дали поштовх до проведення комплексу досліджень з горіння безгазових систем, зокрема $Me - C$, $Me - Si$, $Me - N$. Отримавши значну кількість тугоплавких з'єднань різних класів типу боридів, карбідів, нітридів, силіцидів, оксидів, а згодом і композиційних матеріалів, О.Г. Мержанов з колегами відвідав Інститут проблем матеріалознавства АН УРСР (нині Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України), де зустрівся з член-кор. АН УРСР Г.В. Самсоновим, який ознайомився з представленими розробками та зазначив перспективність цих досліджень. З того часу відбулося налагодження зв'язків з цим науковим закладом, яке виявлялося у проведенні спільних наукових нарад та конференцій. Незважаючи на це, були вчені металурги та матеріалознавці, які спочатку відверто не підтримували цю розробку, вважаючи її науково не життєздатною, однак, вже досить швидко змінили свою думку [12].

Інтенсивний розвиток досліджень процесів «твердого полум'я» невпинно продовжувався. Наприкінці 60-х та на початку 70-х років у філіалі ІХФ АН СРСР, де відбулося відкриття, були

досліджені механізми горіння систем $Me - C$, $Me - B$ та $Me - N_2$ та запропоновані нові на той час напрями досліджень горіння конденсованих систем. В цей період були відкриті та описані режими нестійкого горіння, такі як теплові автоколювання фронту, спинові хвилі, розроблена методологія отримання тугоплавких з'єднань з вибором оптимальних умов процесу. Стало можливим синтезувати металоподобні та неметалеві нітриди, карбіди, бориди та силіциди високої якості.

Фізичне явище «твердого полум'я» дозволило розвинути новий напрям науки про матеріали та технології їх отримання – самопоширюваний високотемпературний синтез. СВС є ширшим від явища «твердого полум'я», оскільки з процесом горіння пов'язана лише його перша стадія – поширення хвилі хімічної реакції. За хвилину протікають вторинні, об'ємні процеси (догорання, фазо- та структуроутворення), які визначають характеристики та якість кінцевого продукту [5].

Основою СВС є принцип максимального використання хімічної енергії реагуючих речовин для отримання неорганічних з'єднань, матеріалів та виробів різного призначення, а також оптимальної організації високоефективних технологічних процесів. Перша наукова доповідь з СВС була виконана О.Г. Мержановим на II симпозіумі з горіння та детонації у Єревані, а перша наукова публікація відбулася у 1972 р. Тоді технологія і отримала офіційну назву – самопоширюваний високотемпературний синтез.

На початку 70-х років експериментальні дослідження ІХФ АН СРСР дозволили створити першу технологічну установку для виробництва СВС порошків. Результати досліджень сприяли появі нових методів синтезу, розробці способів нанесення покриттів та зварювання деталей в режимі СВС, зумовили появу нових матеріалів та виробів для сучасної техніки. Також значну увагу науковців було приділено методам математичного моделювання СВС-процесів, зокрема безгазовому та фільтраційному горінню.

Отримані результати дали імпульс до формування нових дослідницьких груп на теренах Радянського Союзу. До числа перших цілеспрямованих СВС-досліджень належать експерименти, отримані в Єревані (горіння у водні та синтез гібридів), Томську (синтез та технологія азотованих феросплавів), Києві (обробка СВС-продуктів та створення абразивного інструменту). Важливою подією у розвитку наукових і прикладних досліджень СВС-процесу стало відкриття у 1975 р. в місті Кіровакан (Вірменська

РСР) підприємства з виробництва високотемпературних нагрівачів на основі порошків дисиліциду молібдену.

У 80-ті роки, враховуючи велику наукову та практичну актуальність СВС-процесу, його було взято під увагу державних органів. Також ефективність СВС-технології привернула увагу закордонних науковців. Спочатку роботи за цим напрямом були розпочаті в США та Японії, згодом у Польщі, Китаї та інших країнах. Поштовхом для стрімкого розвитку СВС-технології за кордоном стала стаття Джона Крайдера, опублікована у 1982 р. під назвою «Самопоширюваний високотемпературний синтез – радянський метод отримання матеріалів». Як результат, у США було створено енергетично стимульовані СВС-процеси з використанням джоулевого та СВС-нагріву, проведено математичне моделювання процесу зі складним фізико-хімічним механізмом, вченими Японії налагоджено технологію вирощування монокристалів із тугоплавких безкисневих СВС-продуктів, освоєно технологію виготовлення труб великого діаметру з внутрішнім покриттям, в Польщі розроблено пластичну СВС-кераміку.

У 1984 р. на процес СВС було видано диплом на відкриття СРСР № 287, під назвою «Явище хвильової локалізації автогальмівних твердофазних реакцій», автори О.Г. Мержанов, І.П. Боровінська, В.М. Шкиро. Згодом були отримані патенти в США, Англії, Франції, Італії, Японії та інших країнах.

Обговорюючи характерні риси відкриття, Мержанов виділив головні з них: високе значення теплового ефекту, потужне кінетичне гальмування, самопоширення при малій глибині реакції (не потрібне повне перетворення речовини), фронтальний (хвильовий) характер поширення реакції, високі швидкості нагріву речовини у хвилі горіння та високі швидкості поширення фронту, зафронтіві процеси, які не впливають на швидкість горіння (фазові та структурні перетворення у первинних продуктах), які він вважав

основою відмінності СВС від горіння пороху та вибухових речовин [12]. На основі цих характеристик О.Г. Мержановим було запропоновано схему відмінності між цими процесами (рис. 3).

У середині 80-х років створюється Наукова рада з теорії та практики СВС-процесів, а також розроблено загальносоюзну програму наукових робіт. Створено Міжгалузовий науково-технічний комплекс «Термосинтез» та засновано Інститут структурної макрокінетики АН СРСР (1987 р.) з функціями головної академічної організації з даної тематики. Діяльність «Термосинтезу» сприяла появі нових виробничих потужностей з виробництва порошків у багатьох містах країни. Виробництво абразивних порошків організовано у Баку та Полтаві, азотованого феромагнію в Іжевську та Чусовій, високотемпературних теплових ізоляторів у Куйбишеві, порошків ніобію літію у Дзержинську [5; 12].

У 1992 р. розпочався розпад Міжгалузового науково-технічного комплексу «Термосинтез», що суттєво вплинуло на можливості його працівників впроваджувати наукові розробки. Однак вагомий науковий та виробничий потенціал СВС було збережено за кордоном. Нині в Китаї працює 30 СВС-заводів лише з виробництва труб з захисними покриттями для перекачування агресивних середовищ, в Англії виробляють складні твердосплавні СВС-порошки, в США – нанопорошки диборида та інших складних з'єднань, в Японії – сіалони та ін.

Важливим етапом розвитку самопоширюваного високотемпературного синтезу як нового наукового напрямку є створення у 1991 р. за ініціативою та керівництвом О.Г. Мержанова Міжнародних симпозіумів «Самопоширюваний високотемпературний синтез». Такі міжнародні наукові симпозіуми (що відбувалися кожні два роки, починаючи з 1991 р.) проходили в таких містах, як: Алма-Ата (Казахстан, 1991 р.), Гавайї (США, 1993 р.), Ухань (Китай 1995 р.), Толедо (Іспанія, 1997 р.), Москва (Росія, 1999 р.), Хайфа (Ізраїль, 2002 р.), Краків (Польща, 2003 р.), Кальярі

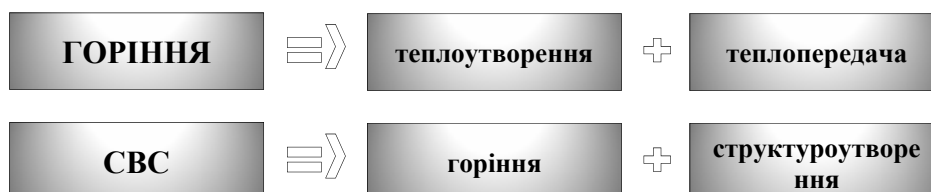


Рис. 3. Класифікаційні схеми відмінності процесу горінням від СВС, запропоновані О.Г. Мержановим

(Італія, 2005 р.), Діжон (Франція, 2007 р.), Єреван (Вірменія, 2009 р.), Анавісос (Греція, 2011 р.), Техас (США, 2013 р.), Анталія (Туреччина, 2015 р.), Тбілісі (Грузія, 2017 р.), Москва (Росія, 2019 р.).

Наукові напрями симпозіумів стосуються перспективних результатів синтезу матеріалів, дослідження структури та фізико-механічних властивостей нових матеріалів, практичного впровадження СВС-технологій.

Важливо відмітити і деякі моменти коректування назви СВС. На Міжнародному симпозіумі по СВС у Китаї (1995 р.) професором Каліфорнійського університету у Дейвісі (США), фахівцем у галузі СВС Зухаїром Муніром було запропоновано змінити назву «СВС» на «синтез горінням». Позиція вченого ґрунтувалася на двох аргументах: по-перше, англійська назва СВС-«Self-propagating High-temperature Synthesis» є складною для вимовляння, по-друге – синтез в режимі теплового вибуху не можна називати «самопоширюваний». Розпочалася наукова дискусія. О.Г. Мержанов відстоював право як першовідкривачів процесу дати йому саме таку назву, яку він вважав найкращою. Він опублікував статтю, в якій показав, що поширення реакції може відбуватися не лише у хвильовому режимі, а й у режимі вибуху. У 2002 р. на Міжнародному форумі СІМТЕС в Італії вчені примирилися. З того часу терміни «СВС» (SHS) «Self-propagating High-temperature Synthesis» та «СС» (CS) «Combustion Synthesis» використовуються як синоніми [10].

Заслуговує на увагу XIV–Міжнародний симпозіум з самопоширюваного високотемпературного синтезу (SHS – 2017), який відбувся у Тбілісі (Грузія), де було представлено доповіді з 17 країн: Вірменії, Білорусії, Греції, Грузії, Естонії, Ізраїлю, Індії, Іспанії, Італії, Польщі, Росії, США, Казахстану, Туреччини, України, Франції, Японії.

У цьому симпозіумі взяли участь і виступили з доповідями відомі науковці з проблем СВС, зокрема: професор Технологічного університету Хайфи (Ізраїль) та університету Айови (США) лауреат Нобелівської премії з хімії (2011) професор Дан Шехтман «Quasi-Periodic Materials – a Paradigm Shift in Crystallography», директор Інституту металургії та матеріалознавства імені Фердинанда Тавадзе НАН Грузії Г.Ф. Тавадзе «Successes and Ways of Development of SHS in Georgia», професор Університету Нотр-Дам (США) О.С. Мукосьян «Fifty Years of Discovery: History and Future».

Україна була представлена доповідями академіка НАН України О.М. Івасишина «Hydrogen Approach in Powder Metallurgy of Ti and Zn Based Alloys» та співробітниці з Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, доктором технічних наук О.М. Бердніковою – «Функціональні металокерамічні покриття: структура та експлуатаційні властивості» [16]. Міжнародні симпозіуми стали важливим етапом у розвитку світової науки з самопоширюваного високотемпературного синтезу, розкрили широкі можливості входження України у світову наукову спільноту у цій галузі знань.

Значимо, що дещо раніше, у 2016 р., за результатами конкурсу до здобуття найвищої відзнаки Національної академії наук України – Золотої медалі В.І. Вернадського, у номінації «закордонний вчений», був відзначений фахівець з СВС, директор Інституту металургії та матеріалознавства ім. Фердинанда Тавадзе НАН Грузії Гіоргій Фердинандович Тавадзе [17].

Професор Г.Ф. Тавадзе є автором спільної з професором А.С. Штейнбергом монографії «Получение специальных материалов методами самораспространяющегося высокотемпературного синтеза», в якій досліджено властивості порошкових матеріалів [18].

Аналіз наукових публікацій (Web of Science) показує, що вчені з 117 країн світу займаються дослідженнями в галузі СВС-процесів [12]. У результаті цілеспрямованих наукових СВС-досліджень багатьма науковцями створено оригінальні методи діагностики СВС-процесів; з'ясовано механізми та закономірності безгазового та фільтраційного горіння, виявлено нові, важливі знання з теорії горіння; виконано моделювання одномірних та двомірних моделей горіння СВС-систем, які дозволяють описувати та прогнозувати практичні експериментальні моделі; розроблено широкий комплекс СВС-технологій (синтез порошків, СВС-спікання, силове СВС-компактування, технологія високотемпературних СВС-розплавів, СВС-зварювання, газотранспортна СВС-технологія); проведено виробничу апробацію використання СВС-продуктів у багатьох галузях промисловості [5; 6]. Сучасна промисловість набула впевненості, що СВС технології та матеріали можуть дати конкурентоспроможні результати.

Компанії, які використовують СВС у своїх технологіях, отримали суттєві переваги на ринку машинобудівної, авіаційної, металургійної, оборонної та ряду інших галузей.

Висновки. У теперішній час сформована потужна наукова основа самопоширюваного високотемпературного синтезу, яка дозволяє розробити матеріали принципово нового рівня. Обмежений об'єм огляду може слугувати певним виправданням тому, що акцент роботи здійснено у ретроспективному аналізі, орієнтованому на розгляд безпосередньо основ формування та розвитку СВС. У цей же час є доцільним коротко відмітити деякі перспективні завдання розвитку цього напрямку.

Незважаючи на очевидний прогрес у цій галузі за останні роки та суттєве накопичення результатів досліджень, практично відсутні опубліковані розробки, спрямованні на теоретичні дослідження механізмів динаміки структуроутворення кінцевих продуктів на основі методів комп'ютерної діагностики побудови фізико-хімічних моделей СВС. Все більшого значення набувають дослідження з використання мінеральної сировини (глини, піщаних матеріалів), твердих промислових та радіоактивних відходів (плавильні шлаки, металева стружка) у якості реагентів для СВС-процесів. Інтенсивні можливості відкриває СВС-технологія для створення нерівноважних матеріалів, які приходять у рівноважний стан у процесі експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Прогресивні матеріали і технології: У 2-х т. Київ : Академперіодика, 2003. Т. 2. 663 с.
2. Наука про матеріали: досягнення та перспективи. У 2-х т. Т. 1 / Редкол.: Л.М. Лобанов (голова) та ін. ; НАН України. Київ : Академперіодика, 2018. 652 с., 12 с. іл.
3. Kharatyan, S. L., Merzhanov, A. G. Coupled SHS Reactions as a Useful Tool for Synthesis of Materials: An Overview. *International Journal of SHS*. 2012. 21. P. 59–73.
4. Українсько-російський словник. Київ : Наукова думка, 1976. 944 с.
5. Концепция развития СВС как области научно-технического прогресса. Черногоровка : «Территория», 2003. 368 с.
6. Merzhanov, A. G. SHS in Russian: historical sketch. Abstr. *Russian-French Workshop on SHS*. Chernogolovka, Russia, October 6-8, 2003, P. 6–7.
7. Мержанов А.Г. Лучше быть нужным, чем свободным... Черногоровка : «Территория», 2005. 256 с.
8. Merzhanov, A.G., Borovinskaya, I.P. Historical retrospective of SHS: An autoreview. *International Journal of SHS*. 2008, 4, P. 242–265.
9. Люди науки. Александр Григорьевич Мержанов (к 80-летию со дня рождения). *Инженерно-физический журнал*. 2012. Т. 85. № 1. С. 232–233.
10. Рогачев А.С., Мукосьян А.С. Aleksandr Nryhorevych Merzhanov (27.11.1937 – 31.07.2013). 2019. URL: http://www.ism.ac.ru/n_about/imp/merzhanov/vosp.pdf (дата звернення: 20.02.2022 р.).
11. Храмов Ю.А. Физики : Биографический справочник / Под ред. А.И. Ахиезера. Изд. 2-е, испр. и доп. Москва : Наука, 1983. 400 с.
12. Боровинская И.П. Академик Александр Григорьевич Мержанов: от научного открытия к промышленному производству. *Горение и взрыв*. 2018. Т. 18. № 4. С. 130–146.
13. Тарахно О.В., Трегубов Д.Г., Жернокльов К.В. Основні положення процесу горіння. Виникнення процесу горіння. Навчальний посібник. Харків : НУЦЗУ, 2020. 408 с.
14. Столин А., Алымов М. Наука – дело всей жизни Инны Боровинской. *Черногоровская газета*. 2018. С. 10.
15. Мержанов А.Г. Мукосьян А.С. Твердопламенное горение. Москва. 2007. 336 с.
16. Тавадзе Г.Ф., Бердникова Е.Н. XIV Международный симпозиум «Самораспространяющийся высокотемпературный синтез» (SHS-2017). *Современная электроталлургия*. 2017. № 4(129). С. 57.
17. Про розвиток напрямку високотемпературного самопоширюваного синтезу. Доповідь з нагоди вручення Золотої медалі ім. В.І. Вернадського. *Вісн. НАН України*. 2017. № 5. С. 46–51.
18. Tavadze, G. F., Shteinberg, A. S. Production of Advanced Materials by Methods of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. Tbilisi : Meridian, 2011, 206 p.

RETROSPECTIVE ANALYSIS OF THE FORMATION AND DEVELOPMENT OF SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS

Serhii Luzan

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Welding
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kyrpychova str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002,
khadi.luzan@dmail.com
ORCID: 0000-0002-4808-0017

Pavlo Sytnykov

Postgraduate Student at the Department of Welding

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kyrpychova str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, pavel.welder@ukr.net

ORCID: 0000-0001-6656-0180

Based on a review of historical materials, the results of a retrospective analysis of the development of research on self-propagating high-temperature synthesis as a modern direction in the field of materials science and chemical physics are given. The creation of materials based on self-propagating high-temperature synthesis consists in the local initiation of highly exothermic chemical reactions between the starting reagents, which allows generating a significant amount of heat in the combustion front, which independently spreads through all starting reagents, forming synthesis products. The article gives in detail the features of the emergence of a separate branch of the Institute of Chemical Physics of the Academy of Sciences of the USSR and an overview of the directions of scientific research by M.M. Semenov, D.A. Frank-Kaminskyi, O.M. Todesa and Ya.B. Zeldovich. The main prerequisites for the discovery of the previously unknown physical phenomenon of «solid flame» were considered, on the basis of which a self-propagating high-temperature synthesis was proposed, and the contribution of O.G. Merzhanova, I.P. Borovinska and V.M. Shkyro. The main stages of the further development of self-propagating high-temperature synthesis are defined, convincing examples of its successful use are presented, information is presented about the appearance of the first purposeful scientific groups and specialized enterprises that worked in this direction. The peculiarities of the organization and holding of the International Scientific Symposium “Self-Propagating High-Temperature Synthesis” were considered, important points regarding the correction of its name were noted. Based on the results of the conducted research, the fact that materials obtained using self-propagating high-temperature synthesis have fundamentally new physico-mechanical and chemical properties has been thoroughly proven, which makes the application of this process promising in many fields of science and technology.

Key words: self-propagating process, high-temperature synthesis, “solid flame”, composite material, technology, chemical element.

REFERENCES

1. *Prohresyivni materialy i tekhnolohii*. (2003). (Vol. 2). Kyiv. Akadempriodyka, 663 p. [in Ukrainian].
2. Lobanov, L. M. (Eds.). (2018). *Nauka pro materialy: dosiahnennia ta perspektyvy*. (Vol. 1). Kyiv: Akadempriodyka, 652 p. [in Ukrainian].
3. Kharatyan, S. L., Merzhanov, A. G. Coupled SHS (2012) Reactions as a Useful Tool for Synthesis of Materials: An Overview. *International Journal of SHS*. V. 21, P. 59–73.
4. *Ukrainsko-rosiiskyi slovnyk* [Ukrainian-Russian dictionary]. (1976). Kyiv: Naukova dumka, 944 p. [in Ukrainian].
5. *Kontseptsyia rozvytia SVS kak oblasti nauchno-tekhnicheskoho prohressa*. (2003). Chernoholovka: Terrytoryia, 368 p. [in Ukrainian].
6. Merzhanov, A. G. (2003, October 6–8) SHS in Russian: historical sketch. Abstr. *Russian-French Workshop on SHS*. Chernoholovka, Russia. P. 6–7.
7. Merzhanov, A. G. (2005). *Luchshe byt nizhnyim, chem svobodnym...* Chernoholovka: Terrytoryia, 256 p. [in Ukrainian].
8. Merzhanov, A. G., Borovinskaya, I. P. (2008). Historical retrospective of SHS: An autoreview. *International Journal of SHS*. V. 4, P. 242–265.
9. Liudy nauky. Aleksandr Hryhorevych Merzhanov (k 80-letyiu so dnia rozhdeniia) [Science people. Alexander Grigorievich Merzhanov (on the occasion of his 80th birthday)] *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. (2012). V. 85 (1), P. 232–233. [in Russian].
10. Rohachev, A. S., Mukosian, A. S. (2019). Aleksandr Hryhorevych Merzhanov. Retrieved from http://www.ism.ac.ru/n_about/imp/merzhanov/vosp.pdf [in Russian].
11. Khramov, Yu. A. (1983). *Fyzyky* [Physicists]. Moskva: Nauka, 400 p. [in Russian].
12. Borovynskaia, Y. P. (2018). Akademyk Aleksandr Hryhorevych Merzhanov: ot nauchnogo otkrytiia k promyshlennomu proyzvodstvu. *Combustion and Explosion – Gorenii i Vzryv*. V. 18 (4), P. 130–146. [in Russian].
13. Tarakhno, O. V., Trehubov, D. H., Zhernoklov, K. V., Kovrehin, V. V. (2020). *Osnovni polozhenni protsesu horinnia. Vynyknennia protsesu horinnia*. Kharkiv: NUTsZU, 400 p. [in Ukrainian].
14. Stolyn, A., Alymov, M. (2018). Nauka – delo vsei zhyzny Ynny Borovynskoi [Science is the life work of Inna Borovinskaya]. *Chernoholovskaia hazeta*, P. 10. [in Russian].
15. Merzhanov, A. H., Mukosian, A., S. (2007). *Tverdoplamennoe horenye*. Moskva, 336 p. [in Russian].
16. Tavadze, H. F., Berdnykova, E. N. (2017). XIV Mezhdunarodnyi simpozium «Samoraspostronaiushchysia vysokotemperaturnyi sintez» (SHS-2017). *Electrometallurgy Today*. V. 4 (129), P. 57 [in Russian].
17. Pro rozvytok napriamu vysokotemperaturnoho samoposhyriuvanoho syntezu. Dopovid z nahody vruchennia Zolotoi medali im. V. I. Vernadskoho. (2017). *Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*. V. 5, P. 46–51 [in Ukrainian].
18. Tavadze, G. F., Shteinberg, A. S. (2011). Production of Advanced Materials by Methods of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. Tbilisi: Meridian, 206 p.

Стаття надійшла 14.08.2022