

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ІНІЦІУВАННЯ ПРОЦЕСУ САМОПОШИРЮВАНОГО ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗУ МОДИФІКУЮЧОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

### 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

У роботі наведено результати теоретичних і експериментальних досліджень способів ініціювання самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС-процес), застосованого під час розроблення модифікуючого композиційного матеріалу. Ініціювання СВС-процесу розглянуто для шихти складу  $Ti - C - Al - SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 - ПТ-НА-01$ . Попередньо шихту було механічно активовано в кульовому млині моделі КМ-1 протягом 15 хвилин, за 130 об/хв та співвідношення 1 до 40 маси шихти до маси сталевих куль діаметром 6 мм. Ініціювання СВС-процесу здійснювали трьома дослідними способами. У першому способі було застосовано термітну шашку марки ПА-16. У другому – процес ініційовано тепловою енергією зварювальної дуги від неплавкого графітового електрода. У третьому способі ініціювання процесу здійснено розжареною ніхромовою спіраллю від розробленого спеціального пристрою. Пристрій складався зі штатива, на якому окремо один від одного закріплено предметний столик для встановлення зразків, рухомого діелектричного затискача зі спіраллю розжарювання та силового трансформатора. Процеси, які відбувалися під час експериментів, досліджували за допомогою відеокамери, фіксування значень напруг здійснювали вольтметрами, підключеними до електричної спіралі та первинної обмотки силового трансформатора. На основі проведених досліджень було встановлено, що серед розглянутих способів ініціювання СВС-процесу найбільш ефективним для шихти складу  $Ti - C - Al - SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 - ПТ-НА-01$  є спосіб з використанням теплоти від розжарюваної спіралі. Таким способом можна в широких межах регулювати напругу первинної обмотки силового трансформатора, що дозволяє впливати на ступінь розжарення спіралі, здійснювати контрольований підігрів і фіксування показників ініціювання, а також проходження СВС-процесу. Одержаний модифікуючий композиційний матеріал застосовано для наплавлення та плазмового напилення деталей, які працюють в умовах абразивного середовища.

**Ключові слова:** СВС-процес, композиційний матеріал, термітна суміш, зварювальна дуга, спіраль, наплавлення, плазмове напилення, робочі органи, деталі машин, ресурс.

**Актуальність теми дослідження.** Одним з ефективних і перспективних способів одержання нових матеріалів із заданими фізико-механічними властивостями та структурою є метод самопоширюваного високотемпературного синтезу (далі – СВС) [1–5]. Фізична сутність СВС-процесу полягає в ініціюванні екзотермічних реакцій між вихідними реагентами, що генерують значну кількість теплоти та створюють хвилю горіння, яка самостійно поширюється через всі реагенти та водночас утворює продукти реакції. З використанням СВС-процесу розроблено понад 500 хімічних з'єднань різного типу, серед яких нітриди, бориди, карбіди, інтерметаліди, а також композиційні матеріали, одержання яких є досить трудомістким або практично

неможливим за іншими відомими методами та технологіями [6].

СВС є окремим науково-технічним напрямом, який, незважаючи на свою понад 50-річну історію, залишається актуальним і продовжує невпинно розвиватися. До перспективних наукових досліджень за цим напрямом належать [7; 8]:

– розроблення й удосконалення конструктивних механізмів діагностики та математичного моделювання СВС-процесів із побудовою їх фізико-хімічних моделей, зокрема розгляду процесів фазо- та структуроутворення;

– розширення номенклатури реагентів для ініціювання СВС-процесів, в тому числі вико-

ристання різних типів мінеральної сировини (глин, піщаних матеріалів), твердих промислових і радіоактивних відходів (плавильні шлаки, металева стружка) та інших матеріалів як вихідних;

– одержання багатокомпонентних композиційних керамічних і металокерамічних матеріалів, зокрема й матеріалів із диференційними складами та властивостями;

– розширення сфер використання СВС-матеріалів у різних галузях промисловості, зокрема в машинобудуванні, військово-промисловому комплексі, авіаційному матеріалознавстві тощо.

Важливою складовою частиною під час реалізації СВС-процесу є ініціювання початкової екзотермічної реакції, для чого використовуються різні технологічні методи. Серед них такі методи, як ініціювання процесу теплою зварювальною дугою або лазерним випромінюванням, застосування різних термітних сумішей у вигляді таблеток (шашок) із різною температурою поширювання горіння, ініціювання процесу шляхом теплового імпульсу від розжарених електричних спіралей тощо [5]. Відповідно до результатів попередніх досліджень встановлено, що спосіб ініціювання СВС-процесу впливає на швидкість його проходження та залежить від складу шихти. З огляду на це, доцільним є проведення дослідження з визначення оптимального способу ініціювання СВС-процесу для конкретного складу шихти.

**Мета роботи.** Дослідження способів ініціювання самопоширюваного високотемпературного синтезу шихти складу  $Ti - C - Al - SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3$  – ПТ-НА-01, призначеної для одержання модифікуючого композиційного матеріалу.

**Матеріали та методика проведення досліджень.** Вихідними матеріалами для досліджень були використанні порошок титану  $Ti$  марки ПТМ-1, технічний вуглець  $C$  марки П-803, оксиди кремнію  $SiO_2$  й алюмінію  $Al_2O_3$ , які було додано у вигляді вогнетривкої глини марки ПГОСА-0. Також із метою підсилення термічного ефекту реакції до шихти були додані алюмінієва пудра  $Al$  марки ПАП-1, оксид заліза  $Fe_2O_3$  та термореагуючий порошок ПТ-НА-01. Гранулометричний склад вихідних компонентів шихти не перевищував розміру 100 мкм, а їх співвідношення було еквімолярним, щоб під час подальшого проходження СВС-процесу відбувся синтез карбідів титану  $TiC$  та кремнію  $SiC$  стехіометричного складу.

Змішування та механічну активацію шихти було здійснено в кульовому млині моделі КМ-1 з об'ємом сталевго барабана  $1,5 \cdot 10^{-4} m^3$  протягом 15 хв, за 130 об/хв та співвідношення 1 до 40 маси

шихти до маси тіл подрібнення (сталевих куль діаметром 6 мм). Після проведення механічної активації максимальний розмір частинок шихти не перевищував 40 мкм [9]. До механічно активованої шихти додавали 10% клею “Metylan” та за допомогою спеціальної прес-форми здійснювали одностороннє пресування під тиском 5 МПа. Діаметр спресованого зразка – 16 мм, висота – 20 мм. Одержані зразки просушували протягом 72 годин за температури  $+25^\circ C$ .

Ініціювання СВС-процесу здійснювали трьома способами. У першому способі використовували спеціальну термічну шашку марки ПА-16, на верхню торцеву поверхню якої встановлювали спресований зразок із шихти.

Другий спосіб ініціювання СВС-процесу полягав у використанні теплової енергії зварювальної дугою. Джерелом живлення для цього способу був зварювальний інвертор моделі СВ-290 НК з графітовим електродом діаметром 9,5 мм із загостреним кінцем. Ініціювання СВС-процесу здійснювали за струму 80 А на прямій полярності.

У третьому способі для ініціювання СВС-процесу використовували нагріту ніхромову спіраль, для чого застосовували спеціально розроблений пристрій (рис. 1), який складається із штатива 1, на якому закріплено столик 2 для встановлення зразків 4 та рухомий діелектричний затискач 3 зі спіраллю 5 для нагрівання зразка [10]. Остання, за допомогою гнучкого провідника, з'єднана із силовим трансформатором 220–12 В 6, до первинної обмотки якого підключено лабораторний автотрансформатор 7 із можливістю регулювання вхідної напруги від 250 до 50 В. Для вимірювання значень напруги первинної обмотки силового трансформатора та спіралі використовуються вольтметри 8 і 9. Конструкція розробленого пристрою дозволяє проводити СВС-процес у захисному (інертному) середовищі, для чого над рухомим діелектричним затискачем встановлювався пальник, через який подавався струмінь газу (аргону  $Ar$  чистотою 98%).

Під час ініціювання СВС-процесу всіма способами фіксувалися тривалість підігрівання зразка (с), стійкість його горіння (безрозмірний показник) і тривалість його синтезу (с). Процеси, які відбувалися під час дослідів, фіксувалися за допомогою відеокамери.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Етапи ініціювання СВС-процесу з використанням термітної шашки марки ПА-16 наведено



Рис. 1. Пристрій для ініціювання СВС-процесу:  
 1 – штатив; 2 – столик для встановлення зразків; 3 – діелектричний затискач зі спіраллю; 4 – зразок, спресований із шихти; 5 – спіраль; 6 – силовий трансформатор; 7 – лабораторний автотрансформатор; 8 – вольтметр первинної обмотки; 9 – вольтметр спіралі

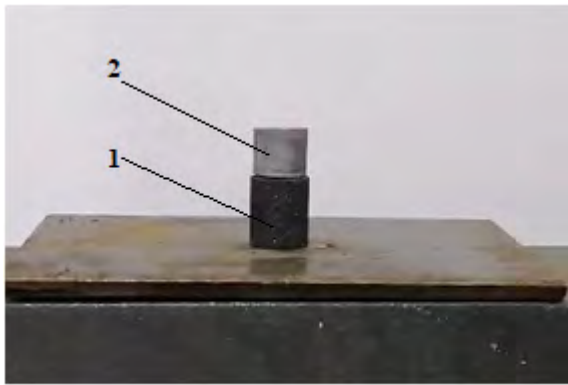
на рис. 2. На сталеву пластину встановлювалася термітна шашка *1*, на якій розміщувався спресований зразок із шихти (рис. 2, а). Підпал шашки здійснюється в її нижній частині (рис. 2, б), щоб утворена теплота та гази від її горіння, підіймаючись вгору, спричиняли попередній підігрів спресованого зразка (рис. 2, в). Тривалість підпалу та горіння термітної шашки становила 14 с, після чого відбулося ініціювання СВС-процесу зразка (рис. 2, г). Ініціювання СВС-процесу таким способом здійснюється за всією нижньою поверхнею зразка, тривалість горіння якого становила 10 с. На кінцевому етапі відбувся процес охолодження термітної шашки (рис. 2, г) і, відповідно, охолодження одержаного спіку (рис. 2, д).

Розглянутий спосіб ініціювання має такі недоліки: беручи до уваги інтенсивне горіння термітної шашки, важко точно визначити початок СВС-процесу, отже, і його тривалість. Для синтезу кожного зразка необхідно використовувати нову термітну шашку, вартість якої в середньому становить 21 грн.

При ініціюванні СВС-процесу дугою, утвореною з використанням графітового електрода, наведено на рис. 3. Реалізація способу здійснюється так: зразок *1* (рис. 3, а) встановлюється на металеву пластину, після чого загостреним кінцем графітового електрода ініціюється електрична дуга біля його нижньої основи (рис. 3, б). Утворена дуга здійснює підігрів зразка (рис. 3, в), після чого починається СВС-процес (рис. 3, г). Тривалість СВС-процесу зразка – 12 с, після чого відбулося його закінчення (рис. 3, г) і, відповідно, подальше охолодження одержаного спіку (рис. 3, д).

Одним із недоліків цього способу є часткове оплавлення бічної поверхні зразка, що спричинено дією електричної дуги.

У разі ініціювання СВС-процесу від нагрітої спіралі її підводять до верхньої торцевої поверхні зразка (рис. 4, а). Після цього здійснюється включення силового трансформатора, підключеного до мережі через лабораторний автотрансформатор (далі – ЛАТР), та подається живлення на ніхромову спіраль діаметром 0,8 мм (рис. 4, б).



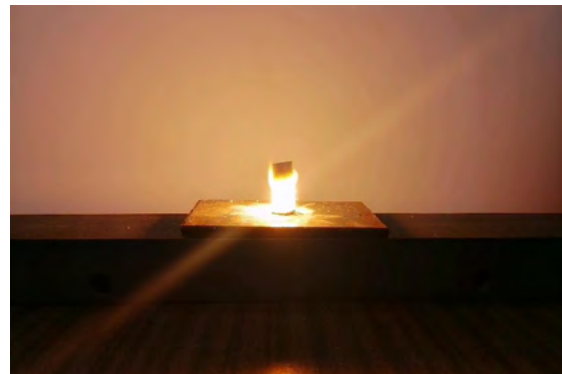
а)



б)



в)



г)



д)



д)

Рис. 2. Етапи ініціювання та СВС-процес з використанням термітної шашки ПА-16: а – термітна шашка (1) та спресований зразок (2); б – підпал термітної шашки ПА-16, в – підігрів зразка та початок СВС-процесу; г – СВС-процес; г – початок охолодження термічної шашки; д – охолодження одержаного спіку

Лабораторним автотрансформатором ЛАТР здійснюється регулювання вхідної напруги первинної обмотки і, відповідно, регулювання ступеня нагріву ніхромової спіралі. Для попереднього підігріву зразка на первинну обмотку трансформатора подавалася напруга 150 В, що забезпечило напругу на спіралі 7 В, якої достатньо для підігріву впродовж 15 с. Після цього напругу збільшують до 220 В, відповідно до чого напруга на спіралі підвищується до 12 В, водночас збіль-

шується температура підігрівання (рис. 3, в), через 3–5 с починається СВС-процес (рис. 4, г). Цієї ж миті вимикається живлення первинної обмотки, а діелектричний затискач із спіраллю відводиться вбік. Етап закінчення СВС-процесу, а також охолодження одержаного спіку наведено на рис. 4, г та д, відповідно.

Тривалість ініціювання СВС-процесу таким способом – 20 с, а тривалість проходження синтезу становила 9 с. Варто зазначити, що трива-

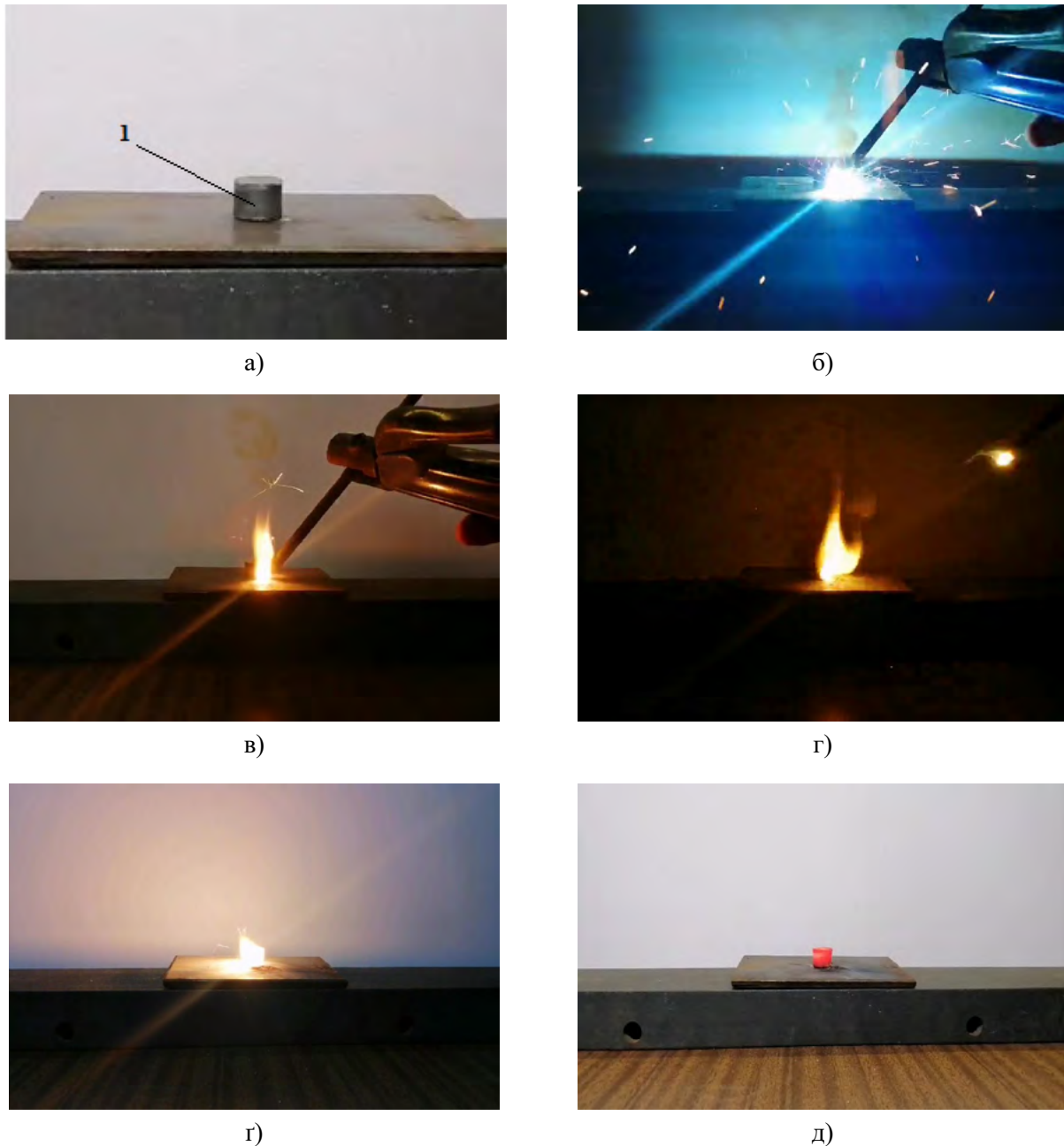


Рис. 3. Етапи ініціювання та СВС-процес у разі використання електричної дуги:  
 а – зразок (1); б – підігрів поверхні зразка зварювальною дугою, в – початок СВС-процесу;  
 г – СВС-процес; ґ – закінчення СВС-процесу; д – охолодження одержаного спіку

лість ініціювання (час від моменту початку живлення спіралі до початку горіння) та тривалість СВС-процесу зразка залежать від таких чинників: хімічного складу вихідної шихти, її морфології та гранулометричного розміру частинок компонентів, режимів механічної активації, величини тиску пресування, наявності у зразку речовини для зв'язки, а також процесу сушіння.

Експлуатація розробленого пристрою для ініціювання СВС-процесу від нагрітої ніхромо-

вої спіралі показала його високу ефективність і надійність у роботі. Пристрій дозволяє в широких межах регулювати тривалість і ступінь попереднього підігрівання зразків шляхом регулювання напруги первинної обмотки силового трансформатора, а також використання ніхромової проволочки різної довжини та конфігурації.

Одержаний модифікуючий композиційний матеріал застосовано для підвищення ресурсу деталей і робочих органів ґрунтообробних машин,

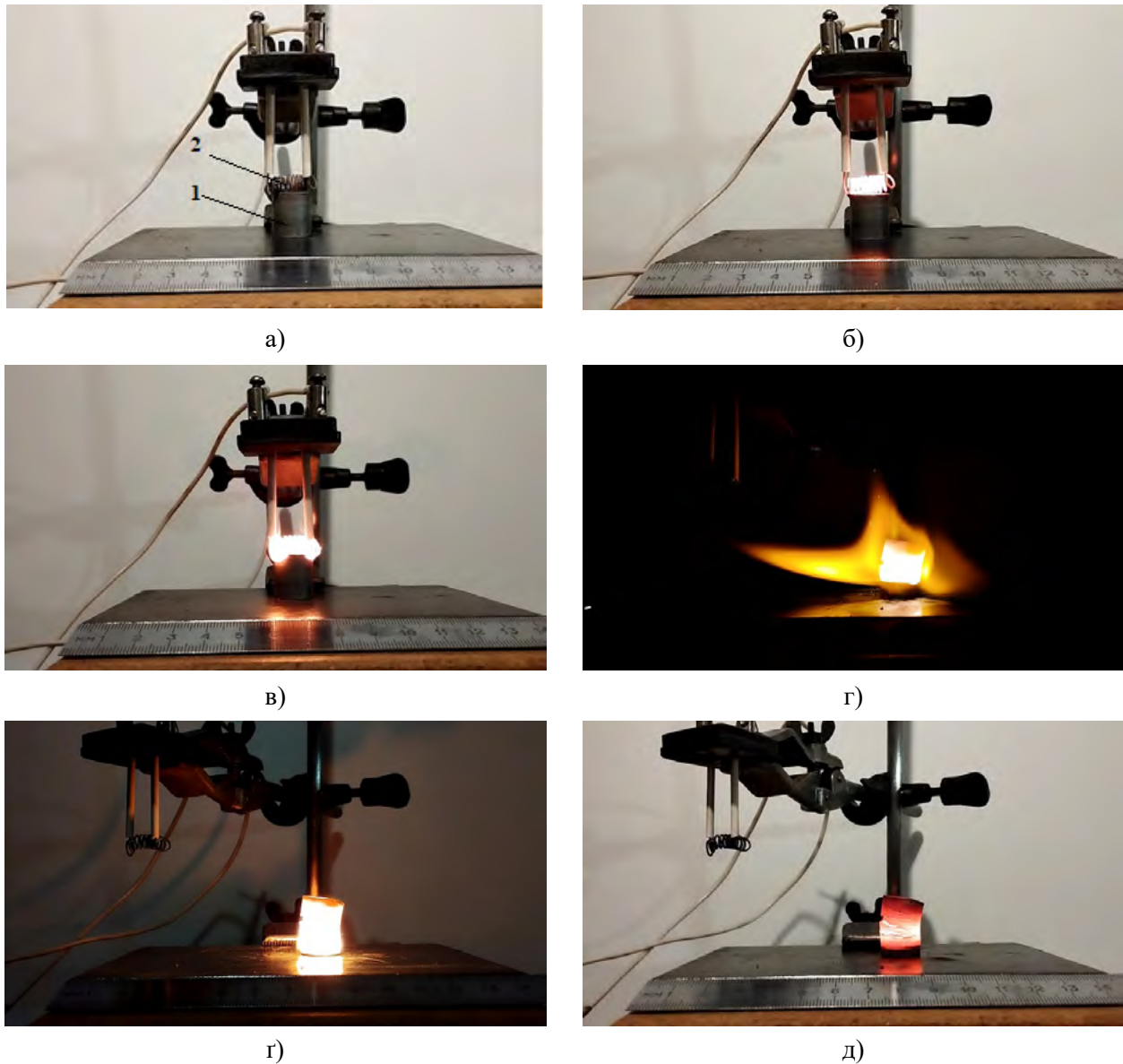


Рис. 4. Етапи ініціювання та СВС-процес зразка (1) в разі використання нагрітої ніхромової спіралі (2): а – зразок; б – підігрів поверхні зразка; в – початок СВС-процесу; г – СВС-процес; г – закінчення СВС-процесу; д – охолодження одержаного спіку

які працюють в умовах абразивного середовища, методами наплавлення та плазмового напilenня.

Отже, на основі проведених порівняльних досліджень трьох найбільш поширених способів ініціювання самопоширюваного високотемпературного синтезу для шихти складу  $Ti - C - Al - SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 - ПТ-НА-01$  рекомендовано використовувати спосіб ініціювання від нагрітої ніхромової спіралі.

#### Висновки:

1. Встановлено, що серед досліджених способів ініціювання СВС-процесу найбільш технологічним для шихти складу  $Ti - C - Al - SiO_2 -$

$Al_2O_3 - Fe_2O_3 - ПТ-НА-01$  є спосіб ініціювання від нагрітої ніхромової спіралі. Цей спосіб дозволяє в широких межах регулювати ступінь нагрівання спіралі, та таким чином впливати на початок і швидкість СВС-процесу.

2. Розроблено спеціальний пристрій для ініціювання СВС-процесу зразків із можливістю регулювання швидкості та температури нагрівання ніхромової спіралі.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Self-propagating high temperature synthesis of chromium boride / M.M. Koldasdekova et al. *Of the National*

*academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series chemistry and technology*. 2015. Vol. 3 (411). P. 102–108.

2. 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. 1. P. 59–73.

3. Застосування самопоширюваного високотемпературного синтезу в технологіях нанесення зносостійких покриттів / Д.Л. Луцак та ін. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2015. № (55). С. 43–50.

4. Перспективи розвитку технологій та обладнання саморозповсюджувального високотемпературного синтезу / Ю.О. Белоконь та ін. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2021. № 6 (131). С. 110–115. DOI: 10.30929/1995-0519.2021.6.110-115

5. Tavazde G.F., Shteinberg A.S. Production of advanced materials by methods of self-propagating high-temperature synthesis. Tbilisi : Meridian, 2011. 206 p.

6. Merzhanov A.G., Borovinskaya I.P. Historical retrospective of SHS: An autoreview. *International Journal of SHS*. 2008. Vol. 4. P. 42–265.

7. Лузан С.О., Ситников П.А. Самопоширюваний високотемпературний синтез: стан, проблеми та перспективи розвитку. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. Серія «Технічні науки». 2022. № 6. 33 (72). С. 17–23. DOI: 10.32782/2663-5941/2022.6/04

8. Лузан С.О., Ситников П.А. Ретроспективний аналіз формування та розвитку самопоширюваного високотемпературного синтезу. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2022. № 4 (135). С. 88–96. DOI: 10.32782/1995-0519.2022.4.12

9. Лузан С.О., Ситников П.А. Дослідження впливу параметрів механічної активації шихти Ti – C – Al – SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – ПТ-НА-01 на тривалентність синтезу композиційного матеріалу, що модифікує. *Вісник Харківського автомобільно-дорожнього університету*. 2023. № 100. С. 42–47. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.100.0.42

10. Luzan S.O., Sytnykov P.A. Device for initiating the SHS process. *Science and innovation of modern world : materials VI International scientific and practical conference, London, 3–25 February 2023*. London, 2023. P. 37–239.

## STUDY OF THE PECULIARITIES OF INITIATING THE PROCESS OF SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS OF A MODIFYING COMPOSITE MATERIAL

### Serhii Luzan

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Welding

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,  
2 Kyrpychova str., Kharkiv, Ukraine, 61002, khadi.luzan@dmil.com

ORCID: 0000-0002-4808-0017

### Pavlo Sytnykov

Postgraduate Student at the Department of Welding

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

ORCID: 0000-0001-6656-0180

The study presents the results of theoretical and experimental investigations on the methods of initiating of self-propagating high-temperature synthesis (SHS process) used in the development of a modifying composite material. The initiation of the SHS process was considered for the charge of the Ti – C – Al – SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – PT-NA-01 system. The charge was previously mechanically activated in a ball mill of the KM-1 model for 15 minutes at 130 rpm and a ratio of 1 to 40 of the charge mass to the mass of steel balls with a diameter of 6 mm. The initiation of the SHS process was carried out in three experimental ways. In the first method, a PA-16 thermite charge was used. The second method was initiated by the thermal energy of the welding arc from a non-consumable graphite electrode. In the latter, the process was initiated by a red-hot nichrome spiral from a specially developed device. The device consisted of a tripod on which a sample table was fixed separately from each other, a movable dielectric clamp with a glowing coil, and a power transformer. The processes that took place during the experiments were studied using a video camera, and the voltage values were determined by voltmeters connected to the electric coil and the primary winding of the power transformer. Based on the studies, it was found that among the investigated methods of initiating the SHS process, the most effective for the Ti – C – Al – SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – PT-NA-01 system charge is the method using heat from a glowing coil. With this method, it is possible to adjust the voltage of the primary winding of a power transformer within a wide range, which makes it possible to influence the degree of heating of the coil by performing controlled heating and recording the indicators of initiation and passage of the SHS process. The resulting modifying composite material is used for surfacing and plasma spraying technologies for parts sputtering in an abrasive environment.

**Key words:** SHS process, composite material, thermite mixture, welding arc, spiral, hardfacings, plasma spraying, working bodies, machine parts, resource.

## REFERENCES

1. Koldasdekova, M.M., Seydualyeva, A.J., Abdulkarimova, R.G. Self-propagating high temperature synthesis of chromium boride. *Of the National academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series chemistry and technology*. 2015. Vol. 3 (411). P. 102–108.
2. 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. 1. P. 59–73.
3. Luchak, D.L., Kryl, Ya.A., Pylypenko, O.V. Application of self-propagating high-temperature synthesis in wear-resistant coating technologies. *Exploration and development of oil and gas fields*. 2015. Vol. (55). P. 43–50.
4. Belokon, Y., Kulynych, V., Drahobetskyi, V., Sereda, D. Technologies and equipment development prospects for self-propagating high-temperature synthesis (SHS). *Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky National University of Kremenchug*. Vol. 6 (131). 2021. P. 110–115. DOI: 10.30929/1995-0519.2021.6.110-115
5. Tavadze, G.F., Shteinberg, A.S. Production of advanced materials by methods of self-propagating high-temperature synthesis. Tbilisi: Meridian, 2011. 206 p.
6. Merzhanov, A.G., Borovinskaya, I.P. Historical retrospective of SHS: An autoreview. *International Journal of SHS*. 2008. Vol. 4. P. 42–265.
7. Luzan, S.O., Sytnykov, P.A. Self-propagating high-temperature synthesis: status, problems and development prospects. *Scientific notes of Tavrida National V.I. Vernadskyi University. Series “Technical Sciences”*. 2022. Vol. 33 (72). № 6. P. 17–23. DOI: 10.32782/2663-5941/2022.6/04
8. Luzan, S.O., Sytnykov, P.A. Retrospective analysis of the formation and development of self-propagating high-temperature synthesis. *Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky National University of Kremenchug*. 2022. Vol. 4 (135). P. 88–96. DOI: 10.32782/1995-0519.2022.4.12
9. Luzan, S.O., Sytnykov, P.A. Study of the influence of the parameters of mechanical activation of the Ti – C – Al – SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – PT-NA-01 charge stock on the duration of the synthesis of the modifying composites. *Bulletin of the Kharkiv Automobile and Road University*. 2023. Vol. 100. P. 42–47. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.100.0.42
10. Luzan, S.O., Sytnykov, P.A. Device for initiating the SHS process. *Science and innovation of modern world: materials VI International scientific and practical conference, London, 3–25 February 2023*. London, 2023. P. 37–239.

Стаття надійшла 17.04.2023