

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 620.621.793

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.100.0.42

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ МЕХАНІЧНОЇ АКТИВАЦІЇ ШИХТИ  $Ti-C-Al-SiO_2-Al_2O_3-Fe_2O_3-PT-NA-01$  НА ТРИВАЛІСТЬ СИНТЕЗУ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ, ЩО МОДИФІКУЄ

Лузан С. О., Ситников П. А.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**Анотація.** У роботі досліджено вплив параметрів механічної активації на тривалість синтезу та морфологію шихти  $Ti-C-Al-SiO_2-Al_2O_3-Fe_2O_3-PT-NA-01$ , призначеної для одержання композиційного матеріалу, що модифікує, отриманого самопоширюваним високотемпературним синтезом. Як вихідні матеріали використано порошки  $Ti$ ,  $C$ ,  $Al$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $PT-NA-01$ . Механічну активацію шихти з варіюванням параметрів оброблення здійснено у розробленому авторами роботи кульовому млині моделі КМ-1, перервного принципу дії з об'ємом робочого сталевого барабана  $1,5 \cdot 10^4 \text{ м}^3$ . Маса млина становить 5,8 кг, габарити – (Ш–В–Д) 190–180–230 мм. Тривалість механічного оброблення шихти складала від 1 до 25 хв зі швидкістю обертання барабана від 50 до 180 об/хв. Співвідношення маси шихти до маси тіл подрібнення (сталевих куль, діаметром 6 мм) становило 1 : 20 та 1 : 40. Дослідженнями визначено, що рекомендованим режимом механічної активації шихти  $Ti-C-Al-SiO_2-Al_2O_3-Fe_2O_3-PT-NA-01$  є оброблення протягом 15 хв за швидкості обертання барабана 130 об/хв та співвідношення 1 : 40 маси шихти до маси сталевих куль. Гранулометричний склад шихти зменшується з максимального розміру 100 мкм до 40 мкм. На основі досліджень визначено, що таке оброблення шихти призводить до підвищення хімічної активності компонентів та ефективності протікання СВС-процесу внаслідок зниження тривалості його ініціювання та процесу синтезу.

**Ключові слова:** механічна активація, хімічний елемент, шихта, самопоширюваний високотемпературний синтез, кульовий млин, композиційний матеріал, наплавлення, напилення.

**Вступ**

Створення матеріалів з новим рівнем фізико-механічних властивостей, а також технологій їх ефективного виробництва визначає рівень сучасної науки та техніки. Це зумовлено тим, що суспільство постійно потребує необхідності вирішення питань підвищення ресурсу різноманітних машин, обладнання та технологічного оснащення [1].

**Аналіз публікацій**

Відомо, що ресурс – це сумарний наробіток об'єкта від початку його експлуатації чи поновлення після ремонту до досягнення граничного стану, визначеного нормативною документацією [2, 3].

Переважає більшість деталей машин та робочих органів ґрунтообробної техніки (леміші плугів, стрілочасті лапи, дискові борони тощо) експлуатуються в умовах абразивного середовища, внаслідок чого здійснюється зношування їхніх робочих поверхонь. З огляду на те, що після списання техніки понад 65 % деталей та робочих органів мо-

жуть бути відновленими, розроблення нових матеріалів та технологій для їх відновлення, а також зміцнення на сьогодні є актуальною проблемою [4].

Для її вирішення використовують технології відновлення та зміцнення способом нанесення різноманітних типів покриття, з яких найбільш розповсюдженими є покриття з композиційних матеріалів [5, 6].

Одним з ефективних методів одержання композиційних матеріалів є самопоширюваний високотемпературний синтез (СВС-процес). Процес розроблення матеріалів на основі СВС-процесу полягає в локальному ініціюванні екзотермічних реакцій між вихідними компонентами, що дозволяє утворювати значну кількість тепла у хвилі горіння, яка самостійно поширюється через всі вихідні компоненти, утворюючи продукти синтезу [7].

Основними перевагами СВС-процесу є суттєве зниження енерговитрат завдяки використанню екзотермічного ефекту реакції, високій швидкості синтезу, простоту та ма-

логабаритному обладнанню [8, 9]. Ретроспективний аналіз розвитку СВС, проблеми та його перспективи ґрунтовно досліджено в роботах [10, 11].

Технологічний цикл реалізації СВС-процесу складається з трьох основних операцій: підготовки вихідної шихти (сушіння, зважування, змішування, механічна активація, пресування, формування); ініціювання та СВС-процесу та його здійснення; перероблення отриманого продукту синтезу.

Механічна активація є ефективним засобом, що дозволяє впливати на параметри СВС-процесу та морфологію вихідної шихти, забезпечує можливість підвищення хімічної активності компонентів, дозволяє збільшити швидкість СВС-процесу та знизити температуру його початку [7–9].

#### Мета та постановка завдання

Визначити залежність тривалості процесу самопоширюваного високотемпературного синтезу модифікувального композиційного матеріалу від тривалості механічного оброблення вихідної шихти  $Ti-C-Al-SiO_2-Al_2O_3-Fe_2O_3$ -ПТ-НА-01.

#### Матеріали та методика досліджень

Для отримання шихти використовували порошок титану  $Ti$  марки ПТМ-1 з розміром частинок 20...100 мкм, порошок вуглецю  $C$  марки ПТ-15 з розміром частинок 35...100 мкм, алюміній  $Al$  у вигляді пудри марки ПАП-1 з розміром частинок 0,2...0,5 мкм, оксиди кремнію  $SiO_2$  та алюмінію  $Al_2O_3$ , що додають у вигляді вогнетривкої глини марки ПГОСА-0 з розміром частинок 20...100 мкм.; оксид заліза  $Fe_2O_3$  з розміром частинок 50...100 мкм та термореагуювальний порошок ПТ-НА-01 з розміром частинок 40...100 мкм (рис. 1). Співвідношення порошоків у шихті було еквімолярним, щоб під час подальшого СВС-процесу відбувався синтез карбідів та оксидів титану стехіометричного складу. Попередньо порошки просушували в термічній шафі за температури 120 °С протягом 1 години. Механічну активацію шихти здійснювали в кульовому млині моделі КМ-1 (рис. 2), розробленому авторами роботи, перервного принципу дії з об'ємом робочого сталевго барабана  $1,5 \cdot 10^{-4} m^3$ . Варіювання кількості обертів КМ-1 здійснюється в межах від 50 до 180 об/хв. Маса розробленого млина становить 5,8 кг за габаритів (Ш–В–Д) 190–180–230 мм [12]. Подрібнення шихти здійснювали за співвідношення 1:20 та 1:40 маси

шихти до маси тіл подрібнення (сталевих куль, діаметром 6 мм, підібраних експериментально). Кількість обертів робочого барабана вимірювалася тахометром.

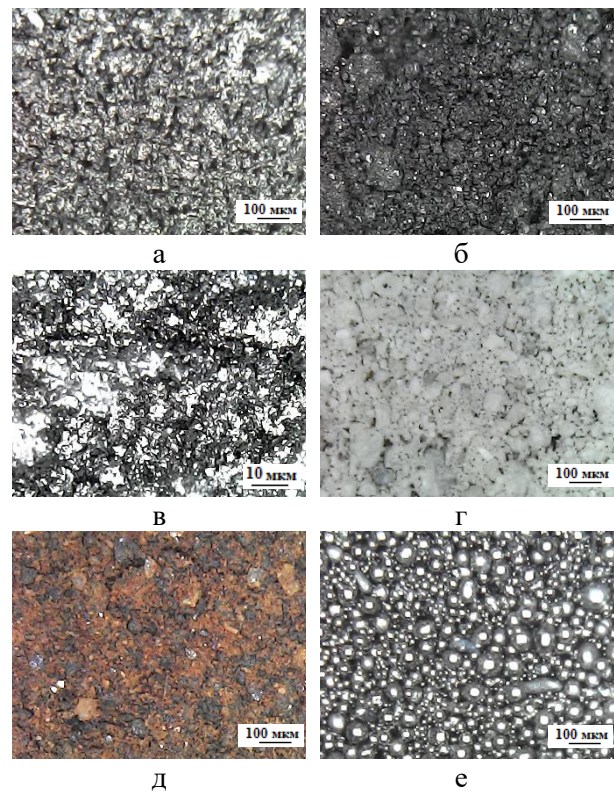


Рис. 1. Морфологія вихідних порошоків: а – порошок титану  $Ti$ ; б – порошок вуглецю  $C$ ; в – алюмінієва пудра  $Al$ ; г – оксиди кремнію та алюмінію  $SiO_2$  та  $Al_2O_3$ ; д – оксид заліза  $Fe_2O_3$ ; е – термореагуювальний порошок ПТ-НА-01

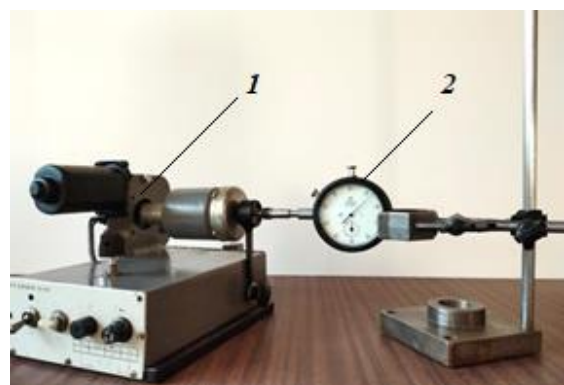


Рис. 2. Кульовий млин моделі КМ-1 з налаштованим тахометром: 1 – кульовий млин; 2 – тахометр

#### Виклад матеріалу дослідження

У процесі обертання барабану кульового млина КМ-1 на кулі діють сила тяжіння, сила тертя, яка утворена між кулями і стінкою

барабана млина, та відцентрова сила, що притискає кулі до внутрішньої поверхні барабана.

Під час механічної активації одними з головних показників процесу є кількість обертів барабана (об/хв), співвідношення маси оброблювальної шихти до маси подрібнювальних тіл та тривалість активації (хв).

За швидкості обертання барабана від 10 до 50 об/хв відцентрована сила куль є незначною. У цьому випадку кулі перекачуються та роздавлюють оброблювальні компоненти лише завдяки власній вазі та силі тертя.

Збільшення кількості обертів від 50 до 150 об/хв призводить до зростання відцентрової сили та притискання куль до внутрішньої поверхні барабана, внаслідок чого вони підіймаються в напрямку його обертання. У момент, коли результуюча сила ваги куль, сила тертя та відцентрова сила спрямовані від стінки барабана, відбувається відрив куль від стінки та їх падіння за параболічною траєкторією. Внаслідок цього падіння відбувається подрібнення компонентів. Також частина матеріалу, подрібнена ударом, підлягає додатковому подрібненню роздавленням та тертям внаслідок ковзання куль.

За швидкості обертання барабана більше ніж 180 об/хв настає момент, коли кулі завдяки відцентрованій силі не відриваються від поверхні барабана, а обертаються разом з ним, не здійснюючи корисну роботу. У цьому випадку подрібнення матеріалу відбувається завдяки власній вазі куль та силі тертя, утвореної під час цього обертання.

Вибір співвідношення маси куль до маси подрібнювальних компонентів здійснюється залежно від фізичних властивостей вихідних компонентів та вимог активації.

Співвідношення маси шихти  $Ti-C-Al-SiO_2-Al_2O_3-Fe_2O_3-PT-NA-01$  до маси куль 1 : 40 було визначено аналітично. За такого співвідношення, як демонструють результати експериментальних досліджень гранулометричного складу шихти, тривалість механічної активації зменшується в 2 рази, як порівняти зі співвідношенням 1 : 20. Крім того, за співвідношення 1 : 20 розподіл куль та оброблювального матеріалу в об'ємі барабана є нерівномірний.

Результати досліджень впливу тривалості механічної активації на морфологію шихти за співвідношення 1 : 40 та 130 об/хв наведено на рис. 3.

За отриманими результатами визначено, що під час механічної активації вихідної

шихти (рис. 3, а) протягом 2 хв відбувається перемішування та незначне подрібнення вихідних компонентів (рис. 3, б). У шихті зберігається вихідна (округла) морфологія частинок терморезистивного порошку ПТ-НА-01, здійснюється часткове подрібнення частинок титану, вуглецю, оксидів кремнію, алюмінію та заліза. Максимальний розмір частинок такої шихти не перевищує 80 мкм.

У разі збільшення часу активації до 5 хв продовжується процес подрібнення частинок, що призводить до збільшення сумарної площі поверхні (рис. 3, в).

У процесі оброблення протягом 10 хв можна спостерігати подрібнення частинок шихти, а їхній розмір зменшується з максимального 80 мкм до 50 мкм (рис. 3, г).

У процесі активації тривалістю 15 хв починають утворюватися конгломерати оброблювальних частинок. Максимальний розмір частинок такої шихти не перевищує 40 мкм. Це призводить до подальшого процесу подрібнення, що сприяє збільшенню реакційної активності активованої шихти, як порівняти з неактивованою.

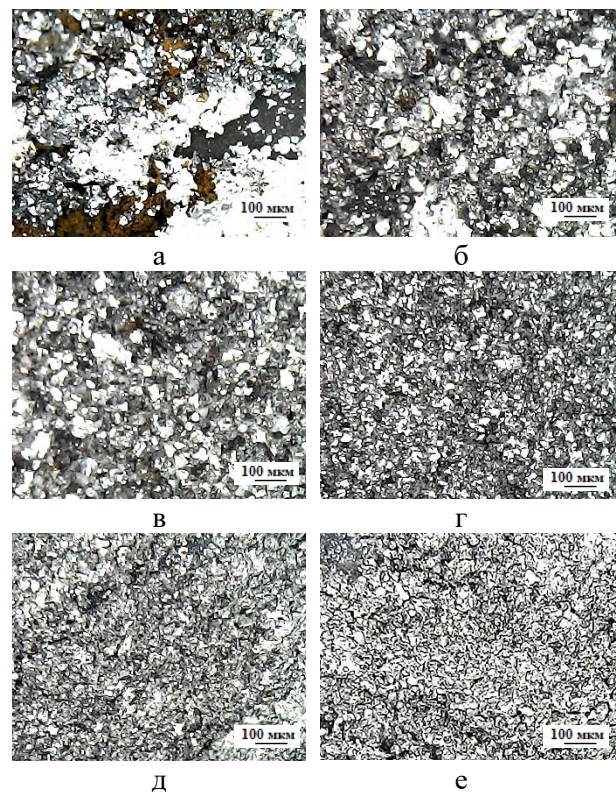


Рис. 3. Морфологія механічно активованих шихт: а – неактивована вихідна шихта; б – шихта, активована протягом 2 хв; в – шихта, активована протягом 5 хв; г – шихта, активована протягом 10 хв; д – шихта, активована протягом 15 хв; е – шихта, активована протягом 20 хв



У процесі механічної активації протягом 20 хв продовжується процес утворення конгломератів. Максимальний розмір частинок такої шихти не перевищує 35 мкм. Морфологію цієї шихти наведено на рис. 3, е.

Для дослідження впливу тривалості механічної активації на тривалість ініціювання та СВС-процес з одержаних шихт виготовляли зразки циліндричної форми, висотою 20 мм та діаметром 16 мм. Зразки пресували за допомогою гідравлічного преса з використанням прес-форми.

Ініціювання СВС-процесу в спресованих зразках здійснювали за допомогою спеціального пристрою [13] способом підведення розжареної ніхромової спіралі (рис. 4, а). Температура вихідних зразків на початку реакції становила 25 °С. Після початку СВС-процесу ніхромову спіраль відкладали вбік (рис. 4, б).

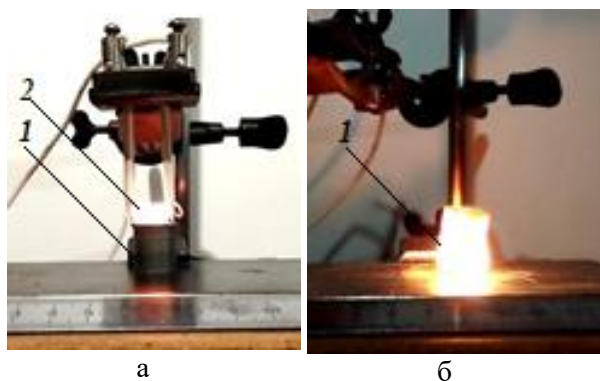


Рис. 4. Етапи ініціювання СВС-процесу шихти, активованої протягом 15 хв (1 – зразок; 2 – спіраль): а – ініціювання реакції; б – СВС-процес

Під час дослідів фіксували тривалість ініціювання (час від моменту початку живлення спіралі до початку горіння) та тривалість процесу синтезу для різної тривалості механічної активації шихт (табл. 1).

Таблиця 1 – Залежність тривалості ініціювання та тривалості синтезу шихти від тривалості механічної активації

Зразок	Тривалість механоактивації, хв	Тривалість ініціювання СВС-процесу, с	Тривалість синтезу, с
1	без МА	37	16
2	2	35	14
3	5	32	12
4	10	26	11
5	15	20	9
6	20	17	8

Аналізуючи результати, наведені в табл. 1, можна дійти висновку, що підвищення тривалості механічної активації шихти сприяє зменшенню тривалості ініціювання та самого СВС-процесу.

Варто зазначити, що синтез зразка з неактивованої шихти здійснюється з нерівномірністю поширення хвилі горіння. Водночас у такій реакції відбувається неповне перетворення вихідних компонентів суміші, зокрема оксидів кремнію та алюмінію, що призводить до їхнього високого вмісту в синтезованому спіку.

Синтезований спік подрібнювали до порошкового стану, після чого змішували у співвідношенні від 10 до 30 % з матеріалом матриці – сплаву ПГ-10Н-01, використовували для наплавлення та газотермічного наплення покриттів на деталі та робочі органи ґрунтообробної техніки.

### Висновки

На основі досліджень визначено, що підвищення тривалості механічної активації шихти  $\text{Ti-C-Al-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-ПТ-НА-01}$  сприяє зменшенню тривалості ініціювання та самого процесу самопоширюваного високотемпературного синтезу.

Для шихти  $\text{Ti-C-Al-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-ПТ-НА-01}$ , призначеної для одержання модифікувального композиційного матеріалу, отриманого самопоширюваним високотемпературним синтезом, рекомендовано вибрати тривалість механічної активації, що становить 15 хв за швидкості обертання барабана 130 об/хв та співвідношення 1 : 40 шихти до маси тіл подрібнення. Гранулометричний склад такої шихти зменшується з максимального розміру частинок у 100 мкм до 40 мкм.

### Література

1. Панасюк В. В. Механіка руйнування матеріалів – новий науковий напрям. Прогресивні матеріали і технології: у 2-х т. Київ, Академперіодика, 2003. Т. 2. С. 501–524.
2. Інженерія поверхні / Ющенко К. А., Борисов Ю. С., Кузнецов В.Д., Корж В.М. Київ: Наукова думка, 2007. 553 с.
3. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни і визначення. [Чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. Київ, 1994. 33 с.
4. Лузан С. О., Ситников П. А. Перспективи використання композиційних матеріалів для підвищення ресурсу деталей машин. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: матеріали XV Міжн.

- наук.-практ. конф., м. Житомир, 24–26 жовтня 2022 р. Житомир, 2022. С. 92.
5. Наука про матеріали: досягнення та перспективи: у 2-х т / Л. М. Лобанов та ін. Київ: Академперіодика, 2018. 652 с.
  6. Національна академія наук України в 1991–2021 роках. До 30-річчя Незалежності України / А. Г. Загородній та ін. Київ: Академперіодика, 2021. 228 с.
  7. Луцак Д. Л., Криль Я. А., Пилипченко О. В. Застосування самопоширюваного високотемпературного синтезу в технологіях нанесення зносостійких покриттів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2015. № 2 (55). С. 43–50.
  8. Borovinskaya I. P., Manukyan K, Mukasyan A. S. SHS Ceramics History and Recent Advances. *Ceramics in Modern Technologies*. 2019. Vol. 1. P. 3–19.
  9. Tavadze, G. F., Shteinberg, A. S. Production of Advanced Materials by Methods of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. Tbilisi, Meridian, 2011. 206 p.
  10. 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: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.4.12>.
  11. Лузан С. О., Ситников П. А. Самопоширюваний високотемпературний синтез: стан, проблеми та перспективи розвитку. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. 2022. Сер. Технічні науки. Т. 33 (72). № 6. С. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/04>.
  12. Ситников П. А., Лузан С. О. Кульбовий млин для механічної активації матеріалів. *Теоретичні та практичні дослідження молодих науковців: матеріали XVI Міжн. наук.-практ. конф.*, м. Харків, 14–16 грудня 2022 р. Харків, НТУ «ХПІ», 2022. С. 382.
  13. 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, 23–25 February 2023. London, 2023. P. 237–239.
  - machine parts. *Modern technologies and prospects for the development of road transport: materials of the XV Intern. Science and Practice conference*, Zhytomyr, October 24–26, 2022. Zhytomyr, 2022, P. 92.
  5. Science of materials: achievements and perspectives. NAS of Ukraine / Lobanov L.M. (Eds.). Kyiv: Akadempriodyka, 2018. Vol. 1. 652 p.
  6. National Academy of Sciences of Ukraine in 1991-2021. To the 30th anniversary of Ukraine's Independence. NAS of Ukraine / Zagorodny A. G. (Eds.). Kyiv, Akadempriodyka, 2021. 228 p.
  7. 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. 2 (55). P.43–50.
  8. Borovinskaya I. P., Manukyan K, Mukasyan A. S. SHS Ceramics History and Recent Advances. *Ceramics in Modern Technologies*. 2019. Vol. 1. P. 3–19.
  9. Tavadze, G. F., Shteinberg, A. S. Production of Advanced Materials by Methods of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. Tbilisi: Meridian, 2011. 206 p.
  10. 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: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.4.12>
  11. 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 Ser. Technical Sciences*. 2022. Vol. 33 (72). No. 6. P. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/04>
  12. Sytnykov P. A., Luzan S. O. Ball mill for mechanical activation of materials. *Theoretical and practical research of young scientists: materials of the 16th Intern. scientific and practical conference*, Kharkiv, December 14-16, 2022. Kharkiv: NTU «KhPI», 2022. P. 382.
  13. 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, 23–25 February 2023. London, 2023. P. 237–239.

### References

1. Panasyuk V. V. Fracture mechanics of materials is a new scientific field. *Advanced materials and processes: in 2 vol*. Kyiv, Akadempriodyka Publ., 2013. Vol. 2. P. 501–524.
2. Surface engineering / Yushenko K. A., Borisov Yu. S., Kuznecov V. D., Korzh V. M. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 2007. 553 p.
3. DSTU 2860-94. Reliability of equipment. Terms and definitions. [Effective from 1996-01-01]. Publ. is official. Kyiv, 1994. 33 p.
4. Luzan S. O., Sytnykov P. A. Prospects for using composite materials to increase the service life of

**Лузан Сергій Олексійович**, д.т.н., проф., зав. каф. зварювання, [khadi.luzan@gmail.com](mailto:khadi.luzan@gmail.com), тел. +38 097-174-19-15,

**Ситников Павло Андрійович**, аспірант каф. зварювання, [pavel.welder@ukr.net](mailto:pavel.welder@ukr.net), тел. +38 096-280-40-21,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

**Study of the influence of the parameters 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 mechanical activation on the duration of the modifying composites synthesis**

**Abstract. Problem.** The paper is devoted to one of the urgent problems of modern materials science – the creation of materials with predetermined properties, methods of their production and practical application. **Goal.** This work is devoted to the study of the influence of mechanical activation parameters on the synthesis duration and morphology 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 intended for the production of a modifying composite material obtained by self-propagating high-temperature synthesis. **Methodology.** Powders 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 are used as starting materials. Mechanical activation of the charge with variation of process parameters was carried out in a ball mill of the KM-1 model, developed by the authors of this work, of the intermittent principle of operation with a working steel drum volume of  $1.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ . The ball mill weighs 5.8 kg and has dimensions (W-H-D) of 190-180-230 mm. The duration of mechanical processing of the charge was from 1 to 25 minutes, with a drum rotation speed of 50 to 180 rpm. The ratio of the charge weight to the grinding media weight (steel balls with a diameter of 6 mm) was 1 : 20 and 1 : 40. **Results.** Studies have established that the recommended mode 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 is treatment for 15 minutes at a drum rotation speed of 130 rpm and a ratio of 1:40 charge weight to steel ball weight. The particle size distribution of the charge is reduced from a maximum size of 100 microns to 40 microns. **Originality.** Based on the studies conducted, it can be concluded that such treatment of this charge leads to an increase in the chemical activity of the components and increases the efficiency of the SHS process by reducing the duration of its initiation and synthesis. **Practical value.** The developed modified composite material is recommended for arc surfacing and gas thermal spraying of strengthening and restoring coatings of machine parts.

**Key words:** mechanical activation, chemical element, charge, self-propagating high-temperature synthesis, ball mill, composite material, surfacing, spraying.

**Luzan Serhii**, professor, Doct. of Sciences, Head of Welding, [khadi.luzan@dmail.com](mailto:khadi.luzan@dmail.com), tel. +38 097-174-19-15,

**Sytnykov Pavlo**, Postgraduate Student at the Department of Welding, [pavel.welder@ukr.net](mailto:pavel.welder@ukr.net), tel. +38 096-280-40-21, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2 Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine.