

**ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ САМОРОЗПОВСЮДЖУВАЛЬНОГО ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗУ****Ю. О. Бєлоконь**

Запорізький національний університет

**ORCID: 0000-0002-9327-5219****В. Д. Кулинич, В. В. Драгобецький**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

**ORCID: 0000-0003-1702-2989; 0000-0001-9637-3079****Д. Б. Серєда**

Дніпровський державний технічний університет

**ORCID: 0000-0003-4353-1365**

Робота націлена на побудову алгоритму та опрацювання нанесення покриття на конструкційну сталь, його детальну контролю на кожній зі стадій та аналізу фізико-технічних характеристик отриманого матеріалу. Пропонується дослідження механізму отримання покриттів, а також експлуатаційні випробування отриманих зразків, наведено комп'ютерне моделювання та спектральний аналіз. Розглянуто способи нанесення покриттів, проведено оцінку їх переваг та недоліків. Досліджена кінетика формування захисних покриттів на сталі 50. Доведено, що залежності зміни товщини покриття від температури процесу є експоненціальною, а часова – параболічною; на базі отриманих даних спрогнозовано умови для отримання найбільшої товщини покриття. На прикладі отримання покриття на поверхнях деталей, виготовлених зі сталі 50, проаналізовано доцільність запропонованого методу. Наведено оцінку мікроструктури, фазового складу легованих хромоалітованих (ХЗП) захисних покриттів, їх експлуатаційних характеристик. Проведено аналіз ефективності використання розчинів поверхнево-активних речовин (ПАР) у якості змащувачів речовин при протіканні СВС-процесів та розробку системи прогнозних оцінок ефективності використання розчинів ПАР у якості змащувачів речовин при протіканні СВС-процесів. Доведено, що леговане бором та титаном ХЗП отримано на деталях з метою підвищення їх зносостійкості. Низька вартість покриття порівняно з відомими методами отримання покриттів в ізотермічних умовах забезпечуються незначною собівартістю компонентів СВС-шихти, а також збільшенням термінів експлуатації технологічного обладнання. Впровадження розроблених рекомендацій дозволить збільшити міжремонтний ресурс у 2,7–3,2 рази за рахунок підвищення зносостійкості у 1,9–2,1 рази. На основі проведених досліджень і отриманих результатів розроблені нові леговані хромоалітовані захисні покриття і склади порошкових шихт для саморозповсюджувального високотемпературного синтезу.

**Ключові слова:** саморозповсюджувальний високотемпературний синтез, сталь 50, легування, мікроструктура, хіміко-термічна обробка.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Проблеми інноваційного розвитку виробництва в напрямку ресурсозбереження вимагають розробки та впровадження нових конструкційних матеріалів. Зі збільшенням вмісту легуючих елементів у виробках, такі фізико-механічні характеристики, як міцність, твердість, зносостійкість зростають, але й підвищується ймовірність крихкого руйнування, збільшується вартість легованого металу. В даний час, це пояснює все зростаючий інтерес до покриттів. Необхідність застосування покриття, перш за все, обумовлена необхідними і, бажано, прогнозованими експлуатаційними властивостями. Сукупність умов експлуатації і визначає призначення покриттів, за якими вони діляться на: термостійкі, жаростійкі, ерозиційностійкі, зносостійкі, антифрикційні, корозійностійкі, ті, що відображають або поглинають різні випромінювання [1]. Способи отримання захисних покриттів на металевих виробках розрізняються технологією нанесення покриття, і основною метою створення є задовільна адгезія з підкладкою, а також отримання суцільного, безпористого і стійкого в даному середовищі захисного шару [2–3].

Всі методи модифікації поверхонь можна розділити на 2 великі групи [4]:

– процеси формування захисних покриттів, до яких можна віднести нанесення електролітичних покриттів, гальванізацію, осадження покриттів з

газової фази методами PVD і CVD, лазерне нашарування.

– процеси, пов'язані з модифікацією матеріалу вже існуючих поверхонь. Найбільш використовувані методики в цій галузі включають зміцнення поверхні за допомогою лазерної техніки, електронних пучків, імплантації іонів, а також класичні методи хіміко-термічної обробки поверхні.

Способи отримання захисних покриттів на металевих вироби розрізняються технологією їх нанесення, при чому основною метою їх застосування є хороша адгезія з матеріалом, а також отримання суцільного, безпористого і стійкого в даному середовищі захисного покриття [5].

В даний час основними способами нанесення захисного покриття є: гальванічне висаджування при електролізі, газотермічне напилення або металізація, термодифузійне насичення в порошок, занурення в розплавлений метал, плакування. За типом з'єднання захисного шару з підкладкою розрізняють адгезійні і дифузійні металеві покриття [6].

Для захисту вуглецевих і мідних матеріалів використовуються найрізноманітніші методи отримання захисних покриттів: в порошках, рідких та газових середовищах [7].

Поверхневе насичення сталі алюмінієм, хромом, цинком і іншими елементами відноситься до дифузійного насичення металами [8]. Виріб, поверхня якого збагачена цими елементами, отримує

цінні властивості, до числа яких відносяться висока жаростійкість, корозійна стійкість, підвищена зносостійкість і твердість.

Залежно від методу перенесення дифузійного елемента на насичувану поверхню розрізняють наступні основні способи дифузійної металізації: занурення в розплавлений метал, якщо дифундуєчий елемент має низьку температуру плавлення; насичення з розплавлених солей, що містять дифундуєчий елемент (з електролізом і без електролізу); насичення з сублімованої фази шляхом випаровування дифундуєчого елемента; насичення з газової фази (контактним і неконтактним методом), що складається з галогенних сполук дифундуєчого елемента [9].

Оскільки суттєвим фактором для впровадження таких матеріалів є певний комплекс фізичних і механічних властивостей при низькій собівартості, одним з перспективних напрямків з вирішення цього питання є нанесення температуро-, зносо- і хімічно-стійких покриттів на робочих поверхнях та подальша їх експлуатація [10].

В реаліях сьогодення явища саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС) [11], а конкретно – способи хіміко-термічної обробки, набувають все більшого розповсюдження як такі, що дозволяють регулювати склад і структуру захисних покриттів, забезпечувати необхідні експлуатаційні характеристики при мінімальному терміні їх формування та відносно низькій собівартості виготовлення.

Серед методів поверхневого зміцнення широке застосування знаходять хромоалітовані захисні покриття, які отримані різними методами хіміко-термічної обробки (ХТО) [12].

Сучасні темпи виробництва вимагають розробки нових конструкційних матеріалів, які б при низькій собівартості мали певний комплекс фізичних і механічних властивостей. Одним з напрямків отримання таких матеріалів є виробництво конструкційного матеріалу з температуро-, зносо- і хімічно стійкими покриттями на робочих поверхнях [13]. Відомі методи нанесення покриттів характеризуються високими енергетичними затратами. Газотранспортна СВС-технологія дозволяє різко зменшити тривалість технологічного процесу, що приводить до зменшення собівартості виробу.

Проведений літературний аналіз у напрямку дослідження властивостей легованих хромоалітованих захисних (ХЗП) обґрунтовує необхідність легування хромоалітованих покриттів для отримання конструкційних матеріалів із заданим комплексом фізико-механічних властивостей. Враховуючи невеликий обсяг досліджень, вважається за доцільне проведення фізико-хімічного моделювання зі встановлення механізмів формування легованих ХЗП, яке базується на результатах дослідження газової фази методом термодинамічного аналізу реакцій теплового самозаймання СВС-шихт, дослідженнях кінематичних схем хімічних перетворень у СВС-шихтах, а також впливу швидкості горіння та

отримуваної максимальної температури від ХС, В, Ті, Si, дослідження температурних характеристик режиму теплового самозаймання порошкових СВС-шихт [14].

Передбачуване використання конструкційних матеріалів в умовах зносу, корозії та корозії при високих температурах, проблема захисту сталей, латуні та вуглеграфітових матеріалів можна вирішити шляхом створення ХЗП легованих бором, кремнієм і титаном. Однак всі відомі методи нанесення захисних покриттів (порошковий, з паст, в рідких і газових середовищах) є енергоємними і характеризуються великою тривалістю процесу. Перспективним методом в сучасних умовах є отримання покриттів за допомогою саморозповсюджувального високотемпературного синтезу на конструкційних матеріалах [15].

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Дослідження механізму формування захисного покриття на конструкційних матеріалах здійснювали використовуючи метод термодинамічного аналізу можливих хімічних реакцій між компонентами системи. Для цього був виконаний розрахунок взаємодії газового насичуваного середовища, що утворюється в процесі СВС і матеріалу. Для термодинамічного аналізу СВС-процесу формування легованих ХЗП використовувалась універсальна програма розрахунку багатокомпонентних гетерогенних систем, відпрацьована для високотемпературних процесів [16]. На відміну від традиційних у хімічній термодинаміці методів розрахунків параметрів рівноваги та використання енергії Гіббса, констант рівноваги та закону діючих мас Гольдберга і Ваге, універсальна програма термодинамічних розрахунків базується на принципі максимуму ентропії для ізольованих термодинамічних систем, що перебувають у стані рівноваги та характеризуються максимумом ентропії щодо термодинамічних ступенів свободи, до яких відносяться концентрації компонентів системи, температура, тиск і т.д. [17–19].

Дослідження мікроструктури багатокомпонентних ХЗП, легованих кремнієм, показує, що велике значення має вміст у СВС-шихті алюмінію. Так, при вмісті 7 % мас. покриття пористе і при температурі 1000°C та часі витримки 60 хвилин становить 40–45 мкм, товщина та компактність покриття зростає при збільшенні вмісту алюмінію від 11 до 15 % і досягає свого максимального значення 80 мкм при 15 % мас (рис. 1).

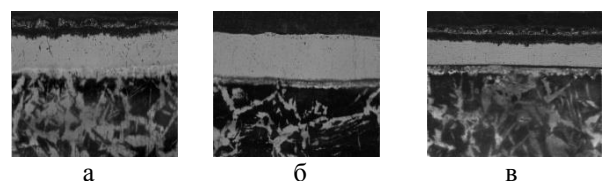


Рисунок 1 – Мікроструктури легованих кремнієм ХЗП, отриманих при різному вмісті алюмінію в шихті при  $t_n = 1000^\circ\text{C}$ ,  $\tau_n = 60$  хв., конструкційний матеріал – сталь 50,  $\times 100$ : а – 7 %; б – 11 %; в – 15 %

За даними рентгеноструктурного аналізу, леговане кремнієм ХЗП на сталі 50 складається з наступних фаз:  $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ ,  $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{Al}$ ,  $(\text{Fe,Cr})_3\text{Si}$  (рис. 2).

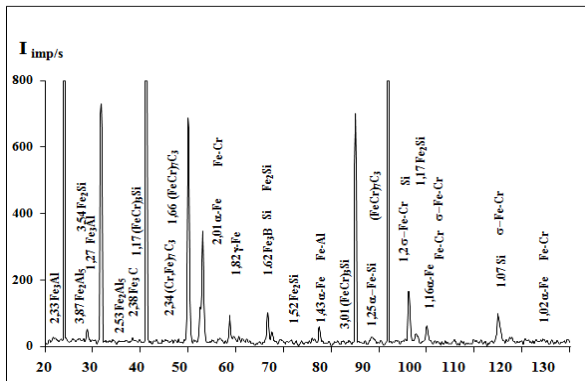


Рисунок 2 – Дифрактограма зразка зі сталі 50 з легованим кремнієм ХЗП, отриманим при  $\tau_{\text{в}} = 60$  хв,  $t_{\text{п}} = 1000^\circ\text{C}$

Мікроструктури легованих титаном ХЗП у режимі теплового самозаймання СВС-систем, отриманих при різному часі витримки в СВС-шихті на сталі 50, наведені на рис. 3. Покрыття має рівномірний характер та повністю заліковує поверхневі дефекти поверхні, максимальна товщина якого складає 65 мкм. Слід зазначити якісну адгезію покриття з основним металом, про що свідчить відсутність на лінії метал-покрыття плівок, окислів, пор.

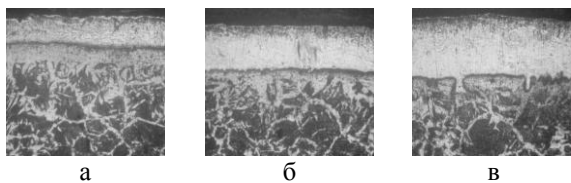


Рисунок 3 – Мікроструктури легованих титаном ХЗП у режимі теплового самозаймання СВС-систем, отриманих при різному часі витримки ( $t_{\text{п}} = 1050^\circ\text{C}$ , матеріал – сталь 50),  $\times 100$ : а – 30 хв; б – 45 хв; в – 60 хв

За даними рентгеноструктурного аналізу, леговані титаном ХЗП на сталі 50 складаються з наступних легованих фаз:  $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ ,  $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{Al}$ ,  $\text{Cr}_2\text{Ti}$  (рис. 4).

При легуванні бором ХЗП на сталі 50 складається з наступних легованих фаз:  $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ ,  $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{Al}$ ,  $(\text{Fe,Cr,Al})_2\text{B}$  (рис. 5).

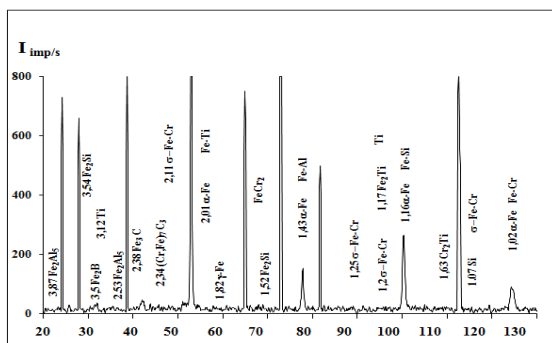


Рисунок 4 – Дифрактограма зразка зі сталі 50 з легованим титаном ХЗП, отриманим при  $\tau_{\text{в}} = 60$  хв,  $t_{\text{п}} = 1000^\circ\text{C}$

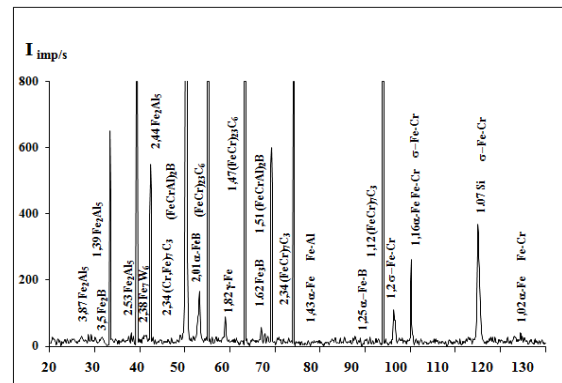


Рисунок 5 – Дифрактограма зразка зі сталі 50 з легованим бором ХЗП, отриманим при  $\tau_{\text{в}} = 60$  хв,  $t_{\text{п}} = 1000^\circ\text{C}$

Дослідження з використанням растрового мікроскопу РЕМ-106 дозволяє встановити, що ХЗП леговані бором, кремнієм та титаном мають схожу морфологію поверхні. Зміна розмірів структурних елементів показує, що середній розмір сферичних пор не перевищує 3 мкм. РЕМ-зображення покриттів в поперечному перетині вказує на те, що пори формуються на поверхні покриттів. У структурі ХЗП міститься мінімальна кількість пор, які розподіляються однорідно по товщині (рис. 6), пористість складає 0,5–0,8 %.

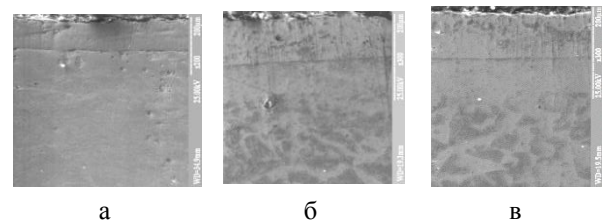


Рисунок 6 – Мікроструктури легованих ХЗП у залежності від виду легування, отриманих при  $t_{\text{п}} = 1050^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{\text{в}} = 60$  хв. матеріал – сталь 50: а – легування Ti ( $\times 200$ ); б – легування B ( $\times 300$ ); в – легування Si ( $\times 300$ )

Характер розподілу елементів по товщині легованого кремнієм ХЗП на сталі 50 наведено на рис. 7.

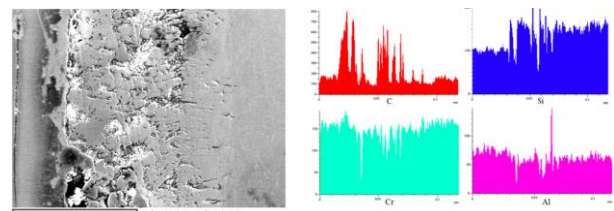


Рисунок 7 – Характер розподілу елементів за товщиною легованого кремнієм ХЗП на сталі 50 ( $t_{\text{п}} = 1050^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{\text{в}} = 60$  хв)

Концентрація хрому, алюмінію і кремнію на поверхні сталі 50 становить: 60,2 – 60,8 % Cr; 8,3 – 8,7 % Al; 3,5 – 3,9 % Si. У той же час в ізотермічних умовах концентрація відповідно становить: 57,2 – 57,8 % Cr; 7,9 – 8,1 % Al; 3,1 – 3,3 % Si. Характер розподілу елементів по товщині легованого бором ХЗП на сталі 50 наведено на рис. 8.

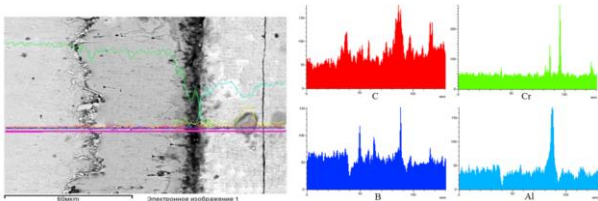


Рисунок 8 – Характер розподілу елементів за товщиною легованого бором ХЗП на сталі 50 ( $t_{\text{п}} = 1050^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau_{\text{в}} = 60$  хв)

Концентрація хрому, алюмінію та бору на поверхні сталі 50, становить: 55,7 – 56,3 % Cr; 10,2 – 10,8 % Al; 2,5 – 2,8 % V. У той же час в ізотермічних умовах вони відповідно становлять: 52,9 – 53,5 % Cr; 9,3 – 9,8 % Al; 2,1 – 2,3 % V.

У покриттях на сталі 50 відсутня крихка фаза FeAl, яка є в усіх покриттях, отриманих в ізотермічних умовах, що можна пояснити великою швидкістю підйому температури на стадії теплового самозаймання. Це приводить до збільшення дифузійного проникнення легуючих металів, за рахунок отримання великої кількості активних атомів насичуючих елементів, що підтверджують дослідження газової фази у розділі 3. Отримання дрібнозернистої структури, за рахунок швидкісного підйому температури на стадії самозапалення, дає можливість збільшити дифузійне проникнення насичуючих металів. При проходженні хвили горіння, швидкість підйому температури досягає 200 град/с, що дозволяє отримувати підвищену концентрацію вакансій та прискорити дифузійні процеси. Таке явище характерно і при швидкісному електронагріві. Як відомо, фаза FeAl приводе до появи пористої структури. Оскільки FeAl ( $\alpha_2$ -фаза, 32,57 % Al, решітка кубічна, число атомів в коміріці – 4, період решітки  $a = 2,90$  нм) має менший питомий обсяг, ніж Fe<sub>3</sub>Al (13,87 % Al, решітка кубічна, число атомів в коміріці – 16, параметр решітки  $a = 5,78$  нм), в місцях її утворення з'являються пори. Зменшення пористості покриттів отриманих в умовах СВС, підвищить їх корозійну стійкість та жаростійкість.

Крім того, проведено аналіз ефективності використання розчинів поверхнево-активних речовин (ПАР) у якості змащуючих речовин при протіканні СВС-процесів та розробку системи прогностичних оцінок ефективності використання розчинів ПАР у якості змащуваних речовин при протіканні СВС-процесів. Розчини ПАР, як адсорбційно-активні речовин, знижують поверхневу енергію твердого тіла. Зниження вільної поверхневої енергії, пов'язане з адсорбцією, лежить в основі змін механічних властивостей (міцності і пластичності) твердих тіл під впливом поверхнево-активних речовин (ефект Ребіндера). Зменшенню поверхневої енергії при адсорбції на поверхні руйнування компонентів середовища (тобто при руйнуванні тіла в контакт з поверхнево-активним середовищем) відповідає зниженню міцності. Наведені співвідношення разом з рівнянням адсорбції Гіббса, що зв'язує зміну вільної поверхневої енергії з величиною адсорбції, є

простим термодинамічним трактуванням ефекту адсорбційного зниження міцності.

**ВИСНОВКИ.** Леговане бором та титаном ХЗП отримано на деталях з метою підвищення їх зносостійкості. Низька вартість покриття порівняно з відомими методами отримання покриттів в ізотермічних умовах забезпечуються незначною собівартістю компонентів СВС-шихти, а також збільшенням термінів експлуатації технологічного обладнання. Впровадження розроблених рекомендацій дозволить збільшити міжремонтний ресурс у 2,7–3,2 рази за рахунок підвищення зносостійкості у 1,9–2,1 рази.

На основі проведених досліджень і отриманих результатів розроблені нові леговані хромоалюмінієві захисні покриття і склади порошкових шихт для саморозповсюджувального високотемпературного синтезу.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Development of wear-resistant coatings for automotive parts after processing in SHS conditions, Sereda B., Kruglyak I., Sereda D., Gaydaenko A., Kruglyak D., *Journal of sustainable development of transport and logistics*, 4(1), 2019, P. 25–30.
2. Microstructure and mechanical properties of TiAl-based alloy, Zhongjie Pu, Jiandong Shi, Dunxu Zou, Zengyong Zhong, *J. Mater. Sci. Technol.* 1993. Vol. 9. P. 449–457.
3. Development of wear-resistant coatings for automotive parts after processing in SHS conditions, Sereda B., Kruglyak I., Sereda D., Gaydaenko A., Kruglyak D., *Journal of sustainable development of transport and logistics*, 4(1), 2019, P. 25–30.
4. Application of activation of substrate by aluminium and copper for increase of adhesive durability of sheetings received in self-propagating high-temperature synthesis conditions, Sereda B., Sheyko S., Kruglyak I., Belokon' Y., *10th International Conference on the Science and Technology of Adhesion and Adhesives*, 2008, P. 437–439.
5. Hard Alloys Recycling as a Promising Direction of Technological Equipment for Machine-Building Production, V. Kulynych, A. Shapoval, V. Dragobetskii, *Materials Science Forum*, Vol. 1052, pp 423–428. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-49mxxgo>.
6. The usage of heat explosion to synthesize intermetallic compounds and alloys, Belokon K., Belokon Y., *Ceramic Transactions*, 2018, Vol. 261, P. 109–115.
7. To the Issue of the of Copper-Aluminum Elements Production for Conductive Assemblies in Electrometallurgy, Vorobyov, V., Kulynych, V., Vorobyova, L., Pieieva, I., Salenko, Y., Matiukhina, A., *Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems*, MEES 2021, DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598770>.
8. The researching and modeling of physical-chemical properties of Ni-base alloys in SHS conditions, Sereda B., Belokon' Y., Zherebtsov A., Sereda D., *Materials Science and Technology Conference and Exhibition*, 2012, Vol. 1, P. 494–498.

9. The research thermoplastic deformation modes of dual-phase special alloys for obtaining rational intermetallic structure, Belokon Y., Temin H., *METAL 2021 - 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials*, 2021, P. 348–353.

10. Physical and mechanical metallurgy of NiAl. Noebe R. D., Bowman R. R., Nathal M. V., *NASA Technical Paper. Washington*, 1994. 44 p.

11. Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology, Appel F., Heaton Paul J. D., Oehring M., Weinheim : *Wiley-VCH Verlag GmbH*, 2011. 762 p. ISBN 978-3-527-31525-3.

12. Microstructure and mechanical properties of consolidated gamma titanium aluminides, Kothari K., Radhakrishnan R., Wereley N. M., Sudarshan T. S., *Powder Metallurgy*. 2007. Vol. 50. P. 21–27.

13. Heat-resistant intermetallic alloys and composites based on titanium: Microstructure, mechanical properties and possible application. Imayev V. M., Imayev R. M., Gaisin R. A., Nazarova T. I., Shagiev M. R., Mulyukov R. R., *Materials Physics and Mechanics*. 2017. № 33. P. 80–96.

14. In Microstructure: Property Relationships in Titanium Alloys and Titanium aluminides, Kim Y. W., Boyer R. R., *TMS, Warrendale*, 1991. P. 91.

15. Tailoring microstructure and chemical composition of advanced  $\gamma$ -TiAl based alloys for improved creep resistance, Kasthuber M., Klein T., Clemens H., Mayer S., *Intermetallics*. 2018. Vol. 97. P. 27–33.

16. Enhancement of creep properties and microstructural stability of intermetallic  $\beta$ -solidifying  $\gamma$ -TiAl based alloys, Kasthuber M., Rashkova B., Clemens H., Mayer S., *Intermetallics*. 2015. №63. P. 19–26.

17. Hot deformation behavior of TiAl alloys prepared by blended elemental powders, Liu B., Liu Y., Zhang W., Huang J. S., *Intermetallics*. 2011. №19. P. 154–159.

18. Production of Al-Co-Ni ternary alloys by the SHS method for use in nickel based super alloys manufacturing, Alkan M., Sonmez M. S., Derin B. and oth. *High Temperature Materials and Processes*. 2015. №34(3). P. 275–283. DOI: <https://doi.org/10.1515/htmp-2014-0052>.

19. Raney nickel-copper catalysts: I. Structure and leaching properties, Young D. J., Wainwright M. S., Anderson R. B., *Journal of Catalysis*. 1980. Vol. 64. P. 116–123.

#### TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT DEVELOPMENT PROSPECTS FOR SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS (SHS)

##### Y. Belokon

Zaporizhzhia National University

ORCID: 0000-0000-0000-0000

##### V. Kulynych, V. Drahobetskyi

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ORCID: 0000-0003-1702-2989; 0000-0001-9637-3079

##### D. Sereda

Dniprovsk State Technical University

ORCID: 0000-0003-4353-1365

**Purpose.** The work is aimed at building an algorithm and coating processing on structural steel, its detailed control at each stage and analysis in obtained material physical and technical characteristics. **Methodology.** The research of the mechanism of obtaining coatings, as well as operational tests of the obtained samples, computer simulation and spectral analysis are offered. **Findings.** The kinetics of protective coatings formation on steel 50 has been studied. Based on the obtained data, the conditions for obtaining the greatest coating thickness are predicted. The rational technology of obtaining alloyed chromium-alloy protective coatings on structural materials has been developed, which allows to use the spent charge as: ballast filler for SHS-charges, abrasive material for grinding, powder material for spraying. The study of the microstructure, phase composition of alloyed chromium-alloy protective coatings, their performance characteristics was carried out on the basis of the obtained material. The analysis of surfactant solutions (surfactants) use efficiency as lubricants in the course of SHS processes and development the forecast estimations system for efficiency use the surfactant solutions as lubricants in the course of SHS processes is carried out. **Originality.** On the basis of the conducted researches and the received results new alloyed chromium-alloyed protective coatings and compositions of powder charges for self-propagating high-temperature synthesis are developed. **Practical value.** The implementation of the developed recommendations will increase the service life by 2,7–3,2 times by increasing the wear resistance by 1,9–2,1 times. **Conclusions.** Boron and titanium alloy chromium-analytical protective coating is obtained on the parts in order to increase their wear resistance. Low cost of a covering in comparison with known methods of reception of coverings in isothermal conditions is provided by insignificant prime cost of components of SHS-charge, and also increase in service life of technological equipment.

**Key words:** self-propagating high-temperature synthesis, steel 50, alloying, microstructure, chemical-heat treatment.

#### REFERENCES

1. Sereda, B., Kruglyak, I., Sereda, D., Gaydaenko, A., Kruglyak, D. (2019). Development of wear-resistant coatings for automotive parts after processing in SHS conditions, *Journal of sustainable development*

of transport and logistics, 4(1), 2019, P. 25–30.

2. Zhongjie, Pu, Jiandong, Shi, Dunxu, Zou, Zengyong, Zhong (1993). *Microstructure and*

mechanical properties of TiAl-based alloy. *J. Mater. Sci. Technol.* Vol. 9. P. 449–457.

3. Sereda, B., Kruglyak, I., Sereda, D., Gaydaenko, A., Kruglyak, D. (2019). Development of wear-resistant coatings for automotive parts after processing in SHS conditions, *Journal of sustainable development of transport and logistics*, 4(1), P. 25–30.

4. Sereda, B., Sheyko, S., Kruglyak, I., Belokon', Y. (2008) Application of activation of substrate by aluminium and copper for increase of adhesive durability of sheetings received in self-propagating high-temperature synthesis conditions, 10th International Conference on the Science and Technology of Adhesion and Adhesives, P. 437–439.

5. Kulynych, V., Shapoval, A., Dragobetskii, V. (2022). Hard Alloys Recycling as a Promising Direction of Technological Equipment for Machine-Building Production, *Materials Science Forum*, Vol. 1052, pp 423–428. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-49mngo>.

6. Belokon K., Belokon Y. (2018). The usage of heat explosion to synthesize intermetallic compounds and alloys, *Ceramic Transactions*, Vol. 261, P. 109–115.

7. Vorobyov, V., Kulynych, V., Vorobyova, L., Pieieva, I., Salenko, Y., Matiukhina, A. (2021). To the Issue of the of Copper-Aluminum Elements Production for Conductive Assemblies in Electrometallurgy, *Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2021*, DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598770>.

8. Sereda, B., Belokon', Y., Zhrebtsov, A., Sereda, D. (2012). The researching and modeling of physical-chemical properties of Ni-base alloys in SHS conditions, *Materials Science and Technology Conference and Exhibition*, Vol. 1, P. 494–498.

9. Belokon, Y., Temin, H. (2021). The research thermoplastic deformation modes of dual-phase special alloys for obtaining rational intermetallic structure, *METAL 2021 – 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials*, P. 348–353.

10. Noebe, R. D., Bowman, R. R., Nathal, M. V. (1994). Physical and mechanical metallurgy of NiAl., *NASA Technical Paper*. Washington, 44 p.

11. Appel, F., Heaton, Paul J. D., Oehring, M., (2011). *Weinheim Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology*, Wiley-VCH Verlag GmbH, 762 p.

12. Kothari, K., Radhakrishnan, R., Wereley, N. M., Sudarshan, T. S. (2007). Microstructure and mechanical properties of consolidated gamma titanium aluminides, *Powder Metallurgy*, Vol. 50. P. 21–27.

13. Imayev, V. M., Imayev, R. M., Gaisin, R. A., Nazarova, T. I., Shagiev, M. R., Mulyukov, R. R. (2017). Heat-resistant intermetallic alloys and composites based on titanium: Microstructure, mechanical properties and possible application, *Materials Physics and Mechanics*. № 33. P. 80–96.

14. Kim, Y. W., Boyer, R. R. (1991). In *Microstructure: Property Relationships in Titanium Alloys and Titanium aluminides*, TMS, Warrendale, P. 91.

15. Kastenhuber, M., Klein, T., Clemens, H., Mayer, S. (2018). Tailoring microstructure and chemical composition of advanced  $\gamma$ -TiAl based alloys for improved creep resistance, *Intermetallics*, Vol. 97. P. 27–33.

16. Kastenhuber M., Rashkova, B., Clemens, H., Mayer, S. (2015). Enhancement of creep properties and microstructural stability of intermetallic  $\beta$ -solidifying  $\gamma$ -TiAl based alloys, *Intermetallics*. 2015. № 63. P. 19–26.

17. Liu, B., Liu, Y., Zhang, W., Huang, J. S. (2011). Hot deformation behavior of TiAl alloys prepared by blended elemental powders, *Intermetallics*. № 19. P. 154–159.

18. Alkan M., Sonmez M. S., Derin B. and oth. (2015) Production of Al-Co-Ni ternary alloys by the SHS method for use in nickel based super alloys manufacturing, *High Temperature Materials and Processes*. №34(3). P. 275–283. DOI: <https://doi.org/10.1515/htmp-2014-0052>.

19. Young, D. J., Wainwright, M. S., Anderson, R. B. (1980). Raney nickel-copper catalysts: I. Structure and leaching properties, *Journal of Catalysis*, Vol. 64. P. 116–123.

Стаття надійшла 17.12.2021