

DOI:

УДК 621.762.4: 54-19

¹**B.P. Sereda**, Doctor of Technical Sciences, Prof., seredabp@ukr.net

²**Y.A. Belokon**, Ph.D., assoc., seredabp@ukr.net

¹**I.V. Kruglyak**, Ph.D., assoc., doktorant, seredabp@ukr.net

¹**D.B. Sereda**, assistant, seredabp@ukr.net

¹Dniprovsky state technical university, Kamenskoe

²Zaporozhy state academy of engineering, Zaporozhye

MODELING THE PROCESS OF POROSITY FORMATION UNDER NON-STATIONARY TEMPERATURE CONDITIONS

In this paper, the simulation of the formation of porosity of titanium alloys under non-stationary temperature conditions was carried out. The purpose of the work is to establish the regularities of obtaining non-porous intermetallic alloys and products of a given form using the plastic properties of the product of synthesis at high temperatures. The mathematical modeling of the process was carried out in a specialized computer program. In solving the thermochemical pressing of intermetallic alloys in a two-way seal in a computer program, the properties of the rheology of the synthesized intermetallic alloy $\sigma = f(\epsilon, u, T)$ were integrated. Analysis of the obtained dependence shows that when the compression pressure is increased from 200 to 700 MPa, the porosity decreases and reaches the values less than 5%. With an increase in compression and aging effort of up to 20, the porosity also becomes less. The optimal ratio of selected factors of the research is at the pressure level of pressing — 630 MPa, the time of exposure is 20 seconds, and the dispersion of the titanium powder is 80 μm , the porosity of the sample is reduced to 1 ... 3%.

Keywords: process simulation, intermetallic alloys, porosity, thermochemical pressing, pressure, property

У даній роботі проведено моделювання процесів формування пористості титанових сплавів при нестационарних температурних умовах. Метою роботи є встановити закономірностей отримання беспористих інтерметалідних сплавів і виробів заданої форми з використанням пластичних властивостей продукту синтезу при високих температурах. Математичне моделювання процесу здійснювали в спеціалізованій комп'ютерній програмі. При вирішенні термодеформаційного завдання термохімічного пресування інтерметалідних сплавів при двосторонньому ущільненні в комп'ютерну програму були інтегровані властивості реології синтезованого інтерметалідного сплаву $\sigma = f(\epsilon, u, T)$. Аналіз отриманої залежності показує, що при збільшенні тиску пресування від 200 до 700 МПа пористість зменшується і досягає показників менше 5%. При збільшенні зусилля пресування і витримки до 20 с пористість також стає менше. Оптимальне співвідношення обраних факторів дослідження знаходиться на рівні тиск пресування — 630 МПа, час витримки — 20 с, і дисперсності порошку титану — 80 мкм, пористість отриманого зразка зменшується до показника 1 ... 3%.

Ключові слова: моделювання процесів, інтерметалідні сплави, пористість, термохімічне пресування, тиск, властивість.

Formulation of the problem

To date, the urgent task of modern metallurgy is the development of new technologies that provide new materials with the necessary operational characteristics with a minimum time of their formation. Such technologies can serve as methods for producing intermetallic alloys based on the method of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) [1]. SHS is a highly exothermic interaction of chemical reagents in the condensed phase occurring in the combustion mode. Thermochemical extrusion is a type of SHS technology, in which hot porous SHS products are compacted by external force actions (pressing, extrusion, etc.) [2].

The aim of the work is to establish patterns of obtaining non-porous intermetallic alloys and products of a given shape using the plastic properties of the synthesis product at high temperatures.

Materials and research methods

To obtain intermetallic alloys, metal powders of titanium PTX5-1 and UTEM-1, aluminum dispersity of 80 ... 150 microns were used as starting materials. Before mixing, the powders were dried at a temperature of 75 ... 120 °C for 3 hours. Powder mixing was carried out in steel ball mills for 2 hours. The ratio of the components was selected from stoichiometric calculations to obtain the intermetallic phases of γ -TiAl. Thus prepared, the mixed reaction mixture was weighed on an electronic scale and filled into the rector. For compacting the initial blanks used hydraulic press PSU-125. The samples formed a cylindrical shape with a diameter of 25 mm and a length of 30 mm. The porosity of the briquettes was evaluated by hydrostatic weighing. Hydrostatic weighing was performed for samples without surface protection and with surface protection, which made it possible to estimate the proportion of closed and open porosity. Weighing was performed in distilled water at a temperature of 25 °C with an accuracy of 0.01 g. The density of water was 0.997 kg / m³. In assessing the porosity, it was assumed that the density of compact samples for the γ -TiAl based alloy was 3600 kg/m³.

The calculation of the density of the samples was performed according to the formula:

$$\rho = \frac{M}{M - m} \cdot \rho_l, \quad (1)$$

where M — is the body mass in the air; m — is the body mass in a liquid.

Presenting main material

Experimental data on the change in the total porosity of P intermetallides Ti-Al and Ni-Al in the pressing process are shown in Fig. 1.

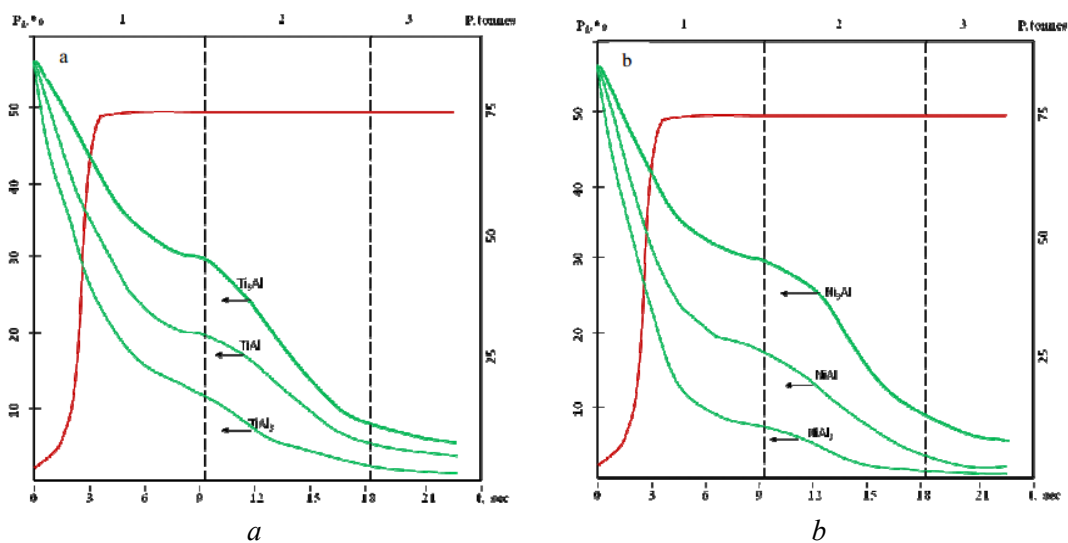


Fig. 1. Change in total porosity and pressure in the process of thermochemical compression of intermetallic alloys: *a* — TiAl, *b* — NiAl

The compression time τ is the sum of the values of the time of reaching the pressure $\tau_H = \text{const} = 1 \pm 0,1$ s and the holding time under pressure τ_V . The sample was not compressed and had a total porosity of 49.3 %, which indicates a definite self-compacting of γ -TiAl during the synthesis, probably under the action of surface tension forces [3, 4], since the calculated value of P after the completion of the synthesis is 56,6 %. The main difference between the obtained dependence on the traditional hot pressing curves is the appearance of a horizontal section on it at $1c < \tau < 2$ s. As can be seen from the data presented, the compression curve of Ti-Al and NiAl synthesis products, depending

on the material sealing speed, can be conditionally divided into four sections. This testifies to the complex nature of the sealing process [5].

According to experimental data of the densification of γ -TiAl alloy, the dependences (Fig. 2) of changes in the structure density during the loading process (compression curves) were obtained and the angles of inclination of the tangents to the curve of the seal in the characteristic points (zones) were determined. The angle of inclination of the tangent to the seal curve in the characteristic points (zones) was determined from the relation:

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{q_{i+1} - q_i}. \quad (2)$$

Tilt angle of the tangent to the seal curve:

$$\alpha_i = \operatorname{arctg} \left(\frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{(q_{i+1} - q_i)} \right), \quad (3)$$

where ρ — intermetallic density, г/см^3 ; q — pressure of pressing, МПа.

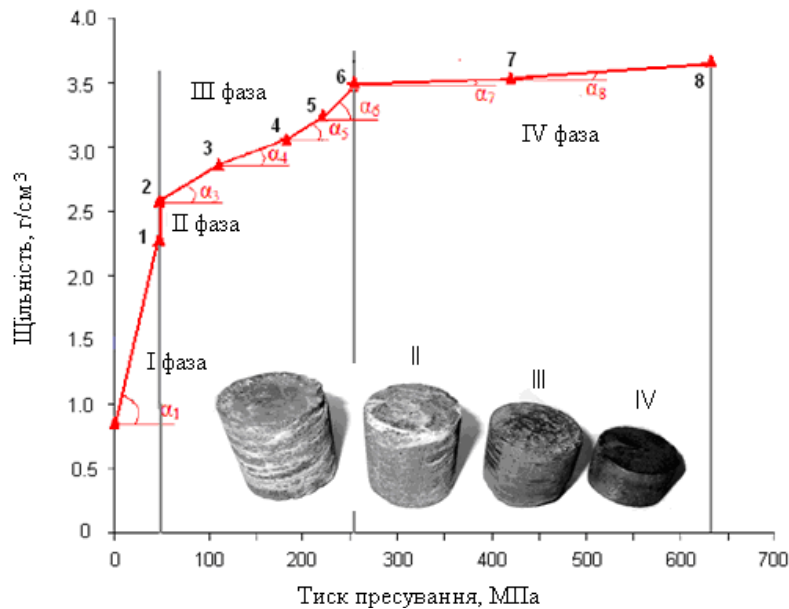


Fig. 2. Experimental packing curve of γ -TiAl alloy at thermochemical pressing

However, it should be noted that the nature of the curve: I—IV in the area corresponding to the pressure, is applied from 0 to 650 MPa — the same type: it increases monotonically; has a slight bend corresponding to a change in the angle of inclination of the tangent (in the pressure range applied, from 0 to 100 MPa — angle $\alpha > 50^\circ$ (from 58 to 73°); with thermal spontaneous combustion — angle α increases sharply to 90° ; synthesis due to the passage of chemical reactions, at a pressure of 100 ... 250 MPa — the angle α decreases (from 90 to 15°), at 250 ... 650 MPa — the angle α decreases slightly and is in the range (from 15 to 5°) Changes in the angle of inclination are of a general nature for the presented curve, values that are in the same range. Obviously, the nodal kink currents determine the boundaries of the compaction stages in this pressure range. self-consolidation of the synthesized product under the time of thermal self-ignition (by 10—15 %). Having reached a pressing pressure of more than 250 MPa, a change in the slope of the curves is noted, their character is monotonic, which increases (the angle α has a small value) [6, 7].

Mathematical modeling of the process was carried out in a specialized computer program. In solving the thermodeformation problem of thermochemical compression of intermetallic alloys with bilateral sealing into the computer program, the properties of the rheology of synthesized intermetallic

alloys $\sigma = f(\varepsilon, u, T)$, which were experimentally obtained on modern Plastometers, were integrated into the computer program.

The results of modeling the density distribution by volume of the synthesized product are presented in Fig. 3. According to the obtained results, it is evident that the central part of the workpiece is the most compressed, and the zones adjacent to the end and lateral surfaces of the workpiece are zones of complicated deformation and have a minimum density. The voltage scheme at the final stage of the process is as close as possible to comprehensive compression, which impedes the growth of the intensity of the shear strains and the corresponding finite density. An increase in the intensity of deformations is possible only with the use of a scheme of comprehensive non-uniform compression at all stages of the process, which will positively affect the growth of product density [7].

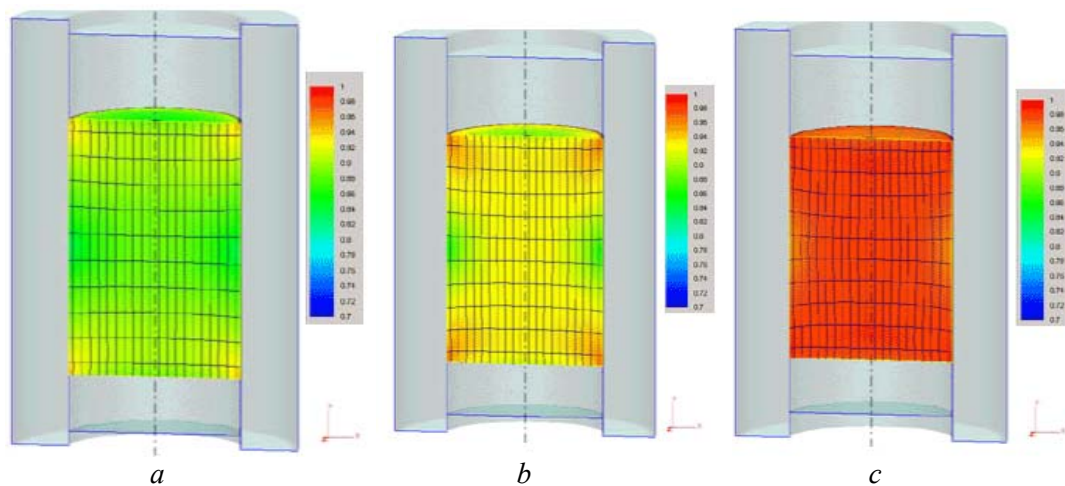


Fig. 3. Simulation of the process of sealing the synthesized intermetallic product during thermochemical compression: *a* is the first stage, *b* is the second stage; *c* — the third stage

Consequently, the experimental seal curves and the simulation results of the compression of the synthesized product make it possible to fix four distinct zones, which determine the degree of structure formation during thermochemical pressing:

The first stage of compression — from the bulk density (characteristic of the raw material) to the density of the vapor level, is characterized mainly by structural deformation, transfer of particles, change in steam space. The second stage — the stage of thermal self-ignition — shows a leap-like increase in relative density, which indicates a definite self-compacting of the alloy during the synthesis, probably under the action of the surface tension forces [8, 9]. The third stage is a seal, characterized by structural deformation. Threshold density of stage 85 ... 92 % [10].

The fourth stage — the final stage of structuring — is the alignment of the composition of intermetallic layers. Residual porosity of intermetallide is 1 ... 3 %.

In order to study the dependence of the porosity of the intermetallics on the compression force, the dispersion of the titanium powder and the aging time, a full factor experiment with the main level using the matrix method was used.

The first factor of the study ($X1$) is the compression pressure (p , MPa), the second factor ($X2$) is the dispersion of the titanium powder (D , μm), the third ($X3$) — the holding time (τ , c). The optimization parameter (Y) is the porosity of intermetallic alloys (Pd , %).

As a result of mathematical planning, we obtain the equation:

$$Pd = 40,375 - 0,057 \cdot P + 0,05 \cdot D - 0,28 \cdot \tau \quad (4)$$

The analytical estimate (4) is shown when it comes to the recovery of the economy from 200 to 700 MPa at the end of the show at 5 %. Taking into account all wishes and time till 20 with small. The optimal development of various factors of premature overcoming — 630 MPa, hourly time — 20 seconds, dispersion powder titanium — 80 microns, porous from 1 to 3 %.

Conclusions and perspectives of further researchs

1. Proposed technological Thermochemicals at production international alloys, competitive and economical, economically and economically more profitable, metered and meat industry.

2. to interact that, at a rising temperature of up to 630 MPa, the time of the display case 20 with dispersed powdered titanium is 80 μm , the porosity of the produced radiation is up to 1—3 %.

List of reference links

- [1] Sereda B.P. Treatment of metals under pressure at non-stationary temperature conditions: monograph /B.P. Wednesday, I.V. Kruglyak, O.A. Zherebtsov, Yu.O. Belokon – Zaporozhye: ZDIA, 2009. – 252 s. – ISBN 978-966-8462-15-3.
- [2] Belokon Yu.O. Thermo-chemical pressing of intermetallic alloys: monograph / Yu.O. Belokon – Zaporozhye: ZDIA, 2018. – 220 p. – ISBN 978-617-7120-15-4.
- [3] Cheylitko, A. The effect of synthesis of the initial mixture and blowing agents on the formation of a porous structure / A. Cheylitko // EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – No. 5/8. – P. 35–38.
- [4] Sereda B.P. Simulation of SVS-pressing processes / B.P. Wednesday, I.V. Kruglyak, A.A. Zherebtsov, Yu.A. Belokon // Metallurgy: Sb. sciences works. – 2007. – Vip. 16. – C. 89–96.
- [5] Sereda B.P. Investigation of the synthesis synthesized intermetallic process Alloys with SVS-pressovaniya / B.P. Wednesday, Yu.A. Belokon, E.V. Babachenko // Vestnik National Technical University "KhPI": Sat. scientific of labor. – Extract 43 (1086). – Kharkiv: KhPI, 2014. – P. 158–164.
- [6] Pavlenko A.M. Research of effective thermal conductivity and its porosity in porous metallic materials with different parameters of porosity / A.M. Pavlenko, H.V. Koshlak, A.O. Cheilytko [and et.] // Metallurgical and Mining Industry. – 2016 – № 12. – P. 66–75.
- [7] Sereda B. The influence of deformation process on titanium aluminides retrieving by SHS-compaction technologies / B. Sereda, I. Kruglyak, A. Zherebtsov, Y. Belokon // Metallurgical and Mining Industry. – 2011. – No. 7. P. 59–63.
- [8] Sereda B. The modeling and processes of titanium aluminides structured by SHS technology / B. Sereda, A. Zherebtsov, Y. Belokon // TMS 2010. – Seattle. Washington USA, 2010. – P. 99–105.
- [9] Belokon, Yu.O. Theoretical and experimental determination of energy of activation of formation Intermetallics in nickel-aluminum and titanium-aluminum systems / Yu.O. Belokon, Y.K. Oginsky K.V. Belokon, OA Stallions // Metallurgy: Sb. sciences works. – 2017 – Voip. 1 (37). – P. 81–85.
- [10] Belokon, Y. The investigation of nanostructure formation in intermetallic-TiAl alloys / Y. Belokon, A. Zherebtsov, K. Belokon // 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2017). – 2017. – P. 311–314.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ПОРИСТОСТІ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ УМОВАХ Середа Б.П., Бєлоконь Ю.О., Кругляк І.В., Середа Д.Б.

Реферат

Метою роботи є встановити закономірностей отримання беспористих інтерметалідних сплавів і виробів заданої форми з використанням пластичних властивостей продукту синтезу при високих температурах.

Для отримання інтерметалідних сплавів в якості вихідних матеріалів застосовували металеві порошки титану ПТХ5-1 і ПТЕМ-1, алюмінію АСД1 дисперсність 80...150 мкм. Перед змішуванням порошки просували при температурі 75...120 °С протягом 3 годин. Змішування порошків проводили в сталевих кульових млинах протягом 2 годин. Співвідношення компонентів вибиралося з стехіометричних розрахунків для отримання інтерметалідних фаз γ -TiAl. Під-

готовлену таким чином, змішану реакційну суміш зважували на електронних вагах і засипали в ректор. Для компактування початкових заготовок використовували гідравлічний прес ПСУ-125. Зразки формували циліндричної форми діаметром 25 мм і довжиною 30 мм. Пористість брикетів оцінювали шляхом гідростатичного зважування.

Математичне моделювання процесу здійснювали в спеціалізованій комп'ютерній програмі. При вирішенні термодформаційного завдання термохімічного пресування інтерметалідних сплавів при двосторонньому ущільненні в комп'ютерну програму були інтегровані властивості реології синтезованого інтерметалідного сплаву $\sigma = f(\varepsilon, u, T)$, отримані експериментально на сучасному пластометрі.

Згідно з отриманими результатами видно, що найбільш ущільненою є центральна частина заготовки, а зони, прилеглі до торцевих і бічних поверхонь заготовки, є зонами ускладненої деформації та мають мінімальну щільність. Схема напруження на завершальній стадії процесу максимально наближається до всебічного стискування, що перешкоджає зростанню величини інтенсивності деформацій зсуву та відповідною їй кінцевій щільності. Збільшення інтенсивності деформацій можливе тільки з використанням схеми всебічного нерівномірного стискування на всіх стадіях процесу, що позитивно позначиться на зростанні щільності виробів.

Таким чином, експериментальні криві ущільнення та результати моделювання пресування синтезованого продукту дозволяють зафіксувати чотири виразно виражених зони, які визначають стадійність структуроутворення при термохімічному пресуванні:

Перша стадія пресування — від насипної щільності (характеристика початкового матеріалу) до щільності парового рівня, характеризується переважно структурною деформацією, перекладанням частинок, зміною парового простору.

Друга стадія – стадія теплового самозаймання — спостерігається стрибкоподібне зростання відносної щільності, що свідчить про певне самоущільнення сплаву в процесі синтезу, вірогідно, під дією сил поверхневого натягіння.

Третя стадія — ущільнення, характеризується структурною деформацією. Порогова щільність стадії 85...92 %.

Четверта стадія – завершальна стадія структуроутворення – це вирівнювання складу інтерметалідних шарів. Залишкова пористість інтерметаліду складає 1...3 %.

З метою вивчення залежності пористості інтерметалідів від зусилля пресування, дисперсності порошку титану і часу витримки використовували повний факторний експеримент з основним рівнем за матричним методом.

Першим фактором дослідження (X_1) є тиск пресування (p , МПа), другим фактором (X_2) — дисперсність порошку титану (D , мкм), третім (X_3) — час витримки (τ , с). Параметр оптимізації (Y) — пористість інтерметалідних сплаву (Pd , %).

В результаті математичного планування отримано рівняння:

$$Pd = 40,375 - 0,057 \cdot P + 0,05 \cdot D - 0,28 \cdot \tau . \quad (4)$$

Аналіз отриманої залежності (4) показує, що при збільшенні тиску пресування від 200 до 700 МПа пористість зменшується і досягає показників менше 5 %. При збільшенні зусилля пресування і витримки до 20 с пористість також стає менше. Оптимальне співвідношення обраних факторів дослідження знаходиться на рівні тиск пресування — 630 МПа, час витримки — 20 с, і дисперсності порошку титану — 80 мкм, пористість отриманого зразка зменшується до показника 1...3 %.

Література

1. Серета Б.П. Обробка металів тиском при нестационарних температурних умовах: Монографія / Б.П. Серета, І.В. Кругляк, О.А. Жеребцов, Ю.О. Белоконь. – Запоріжжя: ЗДІА, 2009. – 252 с. – ISBN 978-966-8462-15-3.
2. Белоконь Ю.О. Термохімічне пресування інтерметалідних сплавів: монографія / Ю.О. Белоконь. – Запоріжжя: ЗДІА, 2018. – 220 с. – ISBN 978-617-7120-15-4.

3. Cheylitko, A. The influence of synthesis of the initial mixture and blowing agents on the formation of a porous structure / A. Cheylitko // *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*. – 2015. – No. 5/8. – P. 35–38.
4. Серєда Б.П. Моделирование процессов СВС-прессования / Б.П. Серєда, И.В. Кругляк, А.А. Жеребцов, Ю.А. Белокоњ // *Металургия: зб. наук. праць*. – 2007. – Вип. 16. – С. 89–96.
5. Серєда Б.П. Исследования процесса уплотнения синтезированных интерметаллидных сплавов при СВС-прессовании / Б.П. Серєда, Ю.А. Белокоњ, Е.В. Бабаченко // *Вестник Национального технического университета «ХПИ»: сб. науч. трудов*. – Вып. 43 (1086). – Харьков: ХПИ, 2014. – С. 158–164.
6. Pavlenko A.M. Research of effective thermal conductivity and its parts in porous metallic materials with different parameters of porosity / A.M. Pavlenko, H.V. Koshlak, A.O. Cheilytko [and et.] // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2016. – № 12. – P. 66–75.
7. Sereda B. The influence of deformation process at titan aluminides retrieving by SHS-compaction technologies / B. Sereda, I. Kruglyak, A. Zherebtsov, Y. Belokon' // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2011. – No. 7. – P. 59–63.
8. Sereda B. The modeling and processes research of titan aluminides structurization received by SHS technology / B. Sereda, A. Zherebtsov, Y. Belokon' // *TMS 2010*. – Seattle. Washington USA, 2010. – P. 99–105.
9. Белокоњ, Ю.О. Теоретичне та експериментальне визначення енергії активації утворення інтерметалідів у системах нікель-алюміній та титан-алюміній / Ю.О. Белокоњ, Й.К. Огинський, К.В. Белокоњ, О.А. Жеребцов // *Металургия: зб. наук. праць*. – 2017. – Вип. 1(37). – С. 81–85.
10. Belokon, Y. The investigation of nanostructure formation in intermetallic-TiAl alloys / Y. Belokon A. Zherebtsov, K. Belokon // *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2017)*. – 2017. – P. 311–314.