

УДК:621.762:621.77:54-19

РЕСУРСОЗБЕРІГАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА НАПІВФАБРИКАТІВ ІНТЕРМЕТАЛІДНИХ γ -TiAl СПЛАВІВ ДЛЯ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

Д. В. ПАВЛЕНКО¹, Ю. О. БЄЛОКОНЬ², Д. В. ТКАЧ¹

¹ Національний університет "Запорізька політехніка";

² Запорізький національний університет

Розроблено комплексну ресурсозберігальну технологію виготовлення напівфабрикатів інтерметалідних γ -TiAl сплавів для авіаційної техніки, зокрема лопаток компресора. Описано структуру принципово нової проти існуючих технологій виробництва напівфабрикатів зі сплавів на основі алюмінідів титану з низькою собівартістю та поліпшеними механічними властивостями. Для цього застосовано і поєднано методи саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС) та інтенсивної пластичної деформації (ПД) вихідних заготовок. Виявлено, що розроблені склади СВС-сумішей і технологічні режими дають можливість створювати інтерметалідні γ -TiAl сплави, хімічний та фазовий склад яких такий самий, як і найкращих закордонних аналогів, за суттєво нижчої відносної собівартості отримання. На наступному етапі заготовки піддано ПД за комплексною технологічною схемою, що дало можливість усунути їх головні недоліки, притаманні СВС, зокрема, структурні неоднорідності, залишкову пористість, низьку пластичність.

Ключові слова: технологія, реакційна суміш, сплав на основі алюмінідів титану, саморозповсюджувальний високотемпературний синтез, ущільнення, інтенсивна пластична деформація, мікроструктура, субмікрокристалічна структура, напівфабрикат, авіаційна техніка.

Вступ. Газотурбінні двигуни (ГТД) для сучасних літальних апаратів неперервно удосконалюють, щоб підвищити питомі параметри, знизити масу та вартість. Для цього необхідні нові матеріали з високою питомою міцністю та низькою собівартістю отримання та подальшої механічної та оздоблювальної обробки. Тут одним з найперспективніших шляхів є створення інтерметалідних сплавів на основі алюмінідів титану. Заміною деталей із нікелевих сплавів, що працюють в інтервалі 600...900°C, на деталі зі сплавів на основі алюмінідів титану вдається у 1,5–2 рази знизити масу конструкції та на 20...35% зменшити матеріальні витрати. Таким чином, розробка ресурсозберігальної технології виготовлення відповідальних деталей ГТД з перспективних сплавів на основі алюмінідів титану є актуальною та своєчасною.

Аналіз технологій виробництва інтерметалідних γ -TiAl сплавів. Розвиток досліджень сплавів на основі алюмінідів титану [1, 2] викликаний необхідністю замінити в авіаційних двигунах традиційні нікелеві та залізонікелеві сплави на матеріали з високою питомою міцністю. Одним із перспективних способів отримання інтерметалідів є термохімічне пресування – різновид технології саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС), коли гарячі пористі продукти СВС, що не встигли охолонути, ущільнюються зовнішніми силовими діями (пресуванням, екструзією, вальцюванням, обробкою вибухом). Порошкова

Контактна особа: Д. В. ПАВЛЕНКО, e-mail: dvp1977dvp@gmail.com

СВС-технологія може виявитися дуже перспективною [3, 4], оскільки γ -TiAl сплави складнодеформовані і низькотехнологічні. Отримано [5–7] обнадійливі результати про їх механічні властивості. Зокрема, порошкові технології перспективні для виробництва листових напівфабрикатів із них. Проте через особливості СВС в отримуваних так заготовках хімічні елементи часто сегрегують та в об'ємі присутні пори. Усунути ці недоліки можна гвинтовою екструзією, коли вдається одночасно подрібнити структуру матеріалу та підвищити гомогенність сплаву [8, 9].

Нижче розроблено ресурсозберігальну технологію виробництва напівфабрикатів з інтерметалідних γ -TiAl сплавів для авіаційної техніки, в основі якої – виготовлення вихідних заготовок з порошкових сумішей методом СВС, їх ущільнення, гомогенізація та інтенсивне пластичне деформування (ПД). Для цього необхідно отримати заготовки з низькою собівартістю зі серійних інтерметалідних сплавів типу LMD OX 45-3 методом СВС, усунути в них пористість, гомогенізувати структурні складники, підвищити технологічну пластичність та комплекс механічних характеристик. Також для подовження довговічності лопаток слід сформуванню сприятливу мікроструктуру (збільшити міцність за змінних навантажень і підвищених температур) методами ПД з подальшою термічною обробкою.

Матеріали та методи випроб. Досліджували зразки, що за хімічним та фазовим складом відповідали інтерметалідному сплаву LMD OX 45-3 (61,59 mass% Ti; 30,57 Al; 7,68 Nb; 0,1 Fe), який отримують лазерним осадженням порошку OX 45-3 на металеву підкладку [10]. Як реакційне середовище використовували суміші порошків таких матеріалів: алюмінію марки ПА-4 або АСД1, титану марки ПТЕМ або ПТМ; ніобію марки Нб-1 дисперсністю 80...200 μm .

Мікроструктуру вивчали за допомогою оптичного та електронного растрового мікроскопів у відбитих електронах, застосовуючи зразки, вирізані з різних частин брикету електроерозійним способом. Фазовий склад – методом рентгенівського аналізу на установці ДРОН-3. Для хімічного мікроаналізу основних структурних складників матеріалу використовували растровий електронний мікроскоп SUPRA 40WDS. Досліджували за напруги прискорення 19 kV та роздільної здатності 1 nm. Для термодинамічного аналізу СВС використовували програми TERRA та ISMAN-THERMO. Розмір зерна і співвідношення структурних складників сплавів γ -TiAl та α_2 -Ti₃Al визначали за допомогою програмного комплексу Image Pro.

Результати та їх аналіз. Згідно з технологією виробництва напівфабрикатів інтерметалідних γ -TiAl сплавів для авіаційної техніки (рис. 1) вихідну заготовку пресували, формуючи відповідний фазовий склад. Далі її ущільнювали та гомогенізували, використовуючи гвинтову екструзію, реверсивний зсув та всебічне кування. Поєднуючи методи СВС та ПД, вдається усунути головні недоліки СВС і отримати принципово нову технологічну схему виготовлення напівфабрикатів, зокрема лопаток компресора.

Отриманий інтерметалідний γ -TiAl сплав апробували у лабораторних умовах. Як вихідні компоненти використовували чисті порошки титану та алюмінію дисперсністю 50...100 μm . Схема приготування шихти охоплювала дозування, змішування, заповнення форми і пресування прямокутної заготовки діаметром 20 mm і висотою 20 mm з відносною щільністю 0,65, яка помітно впливає на розмір зерна і умови високотемпературного синтезу. Зменшення щільності призводить до фронтального режиму горіння і послаблення інтенсивності екзотермічної реакції [11], а підвищення – до закупорення газів, яке перешкоджає ущільненню матеріалу, збільшує його залишкову пористість та змінює хімічний склад. Реак-

ційну прес-форму пристосували під двостороннє пресування (рис. 2). Встановлювали нижній пуансон, засипали порошок електрокорунду на висоту 30...40 мм. Розташовували заготовку вертикально та засипали зверху порошком електрокорунду. Встановлювали верхній пуансон та ущільнювали пресом за питомого тиску 10 МПа. Підготовлену прес-форму поміщали у вертикальну піч з робочим діаметром, який на 5...15 мм перевищував її діаметр. Піч разом з прес-формою встановлювали на гідравлічний прес П-250. Включали піч і піднімали температуру зі швидкістю 30...50°C/min до початку СВС. Газу, що виділялися за тиску 0,15 МПа, видаляли.

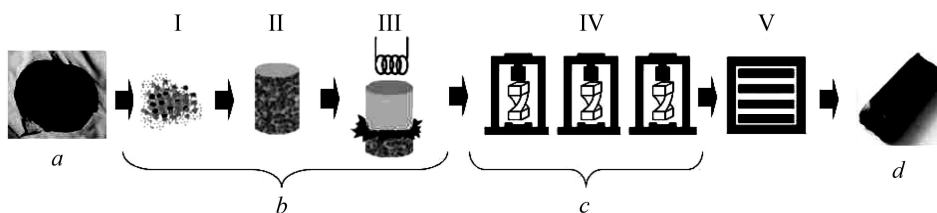


Рис. 1. Ресурсозберігальна технологія виробництва напівфабрикатів з інтерметалічних γ -TiAl сплавів для авіаційної техніки, що поєднує методи СВС та ІПД:
 I – шихтування, отримання реакційної суміші; II – пресування; III – СВС реакція;
 IV – комплексна ІПД; V – термічна обробка; a – вихідна сировина (порошок титану);
 b – некомпактна заготовка; c – компактна зі субмікроструктурною;
 d – компактний напівфабрикат.

Fig. 1. A chart of the resource-saving technology of the semi-finished intermetallic γ -TiAl alloys production for aviation engineering which is based on the self-propagating high-temperature synthesis (SHS) and severe plastic deformation (SPD) methods:
 I – ligation, preparation of the reaction composition; II – pressing; III – SHS reaction;
 IV – complex SPD. V – thermal treatment; a – raw material (titanium powder);
 b – non-compact billet; c – compact billet with a submicrocrystalline structure;
 d – compact billet.

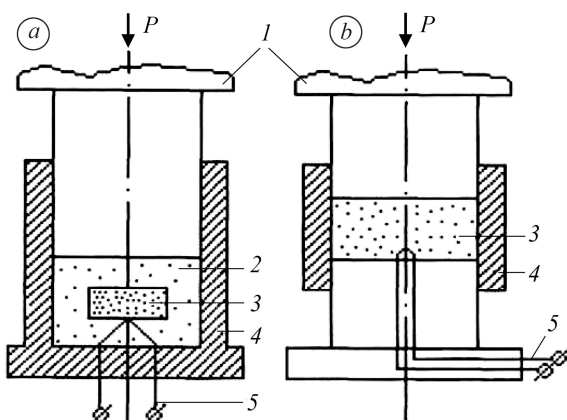


Рис. 2. Принципові схеми термохімічного пресування для малих (a) та великогабаритних (b) заготовок: 1 – пуансон; 2 – теплоізолятор; 3 – шихта СВС; 4 – прес-форма; 5 – ініціувальний пристрій.

Fig. 2. Principal charts of the process of thermo-chemical pressing for small (a) and large-scale (b) billets: 1 – punch; 2 – heat insulator; 3 – SHS charge; 4 – press form; 5 – initiating device.

Після теплового самозаймання заготовку пластично деформували з обтиском 27,8% та витримували при 1100°C упродовж 1,5 h за тиску 16 МПа. Далі реактор вакуумували 15 min до 26,7 Pa та охолоджували 2 h.

Результати рентгеноструктурного аналізу засвідчили, що синтезований γ -TiAl сплав містить дві фази – TiAl (γ -фаза) і Ti₃Al (α_2 -фаза) (рис. 3). Об'ємна частка α_2 -фази становить близько 20%. Тобто фазовий склад синтезованих γ -TiAl сплавів відповідає встановленому раніше [12].

Мікроструктура γ -TiAl сплаву двофазна: TiAl (сірого кольору) та Ti₃Al (білого) (рис. 4). Розподіл алюмініду титану TiAl рівномірний та дрібнодисперсний (рис. 4с). Мікротвердість сплаву *HV* становить 3000...4000 МПа. Крім того, утворюються дисперсні включення різної форми з підвищеним вмістом титану, які рівномірно розподілені в об'ємі матриці.

Для досягнення пластинчастої структури γ -TiAl сплави легували ніобієм. Таке легування і пластична деформація, очевидно, ефективні не тільки, щоб отримати дрібнозернисті напівфабрикати, але й контролювати параметри структури сплавів. Аналізуючи мікроструктуру синтезованого сплаву системи Ti-Al-Nb, виявили, що формування тонких структур відбувається за підвищеного вмісту Nb (β -стабілізуючого елемента). У результаті утворюється тонка композитна текстура, що складається з паралельних змінних ламелей двох різних кристалічних фаз: тетрагональної γ -фази (TiAl) та гексагональної α_2 -фази (Ti₃Al) (рис. 4b).

Таким чином, формується дворівнева структура: кожне полікристалічне α -зерно утворює обмежену пластинчасту колонію з міжпластинною відстанню 500 nm.

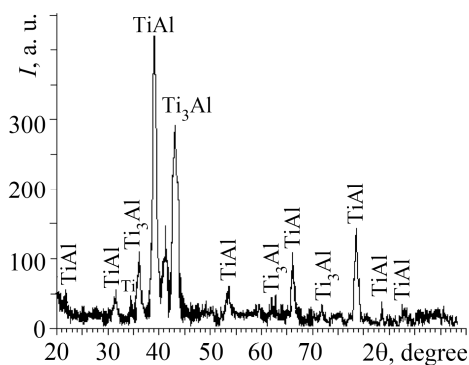


Рис. 3. Дифрактограма інтерметалідного сплаву γ -TiAl.

Fig. 3. Diffractogram of the intermetallic γ -TiAl alloy.

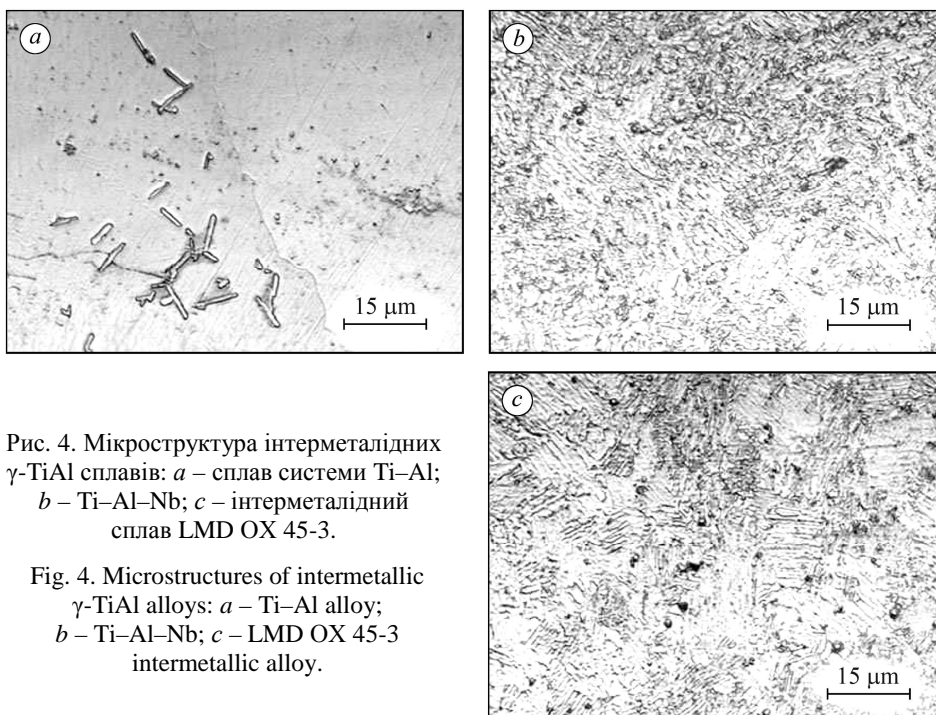


Рис. 4. Мікроструктура інтерметалідних γ -TiAl сплавів: *a* – сплав системи Ti-Al; *b* – Ti-Al-Nb; *c* – інтерметалідний сплав LMD OX 45-3.

Fig. 4. Microstructures of intermetallic γ -TiAl alloys: *a* – Ti-Al alloy; *b* – Ti-Al-Nb; *c* – LMD OX 45-3 intermetallic alloy.

Порівнювали зі сплавом LMD OX 45-3, який також має двофазну пластинчасту структуру з інтерметалідними фазами γ -TiAl і α_2 -Ti₃Al (рис. 4с). За допомогою мікрорентгеноспектрального аналізу визначали хімічний склад γ -TiAl сплаву

на різних ділянках мікрошліфа поверхні. Встановили, що його матриця (сіра область) містить 42,13 mass% Al і 57,52 Ti, що відповідає інтерметалідній γ -фазі. Витягнуті білі області – це інтерметаліди α_2 -Ti₃Al з 22,62 mass% Al і 77,38 Ti, поблизу яких, а в деяких випадках і всередині них, присутні дисперсні фази. За результатами локального хімічного аналізу їх ідентифікували як інтерметаліди α_2 -Ti₃Al з 28,77 mass% Al і 71,23 Ti, що узгоджується з відомими результатами [13, 14].

Головними причинами низької міцності та пластичності заготовок, одержаних СВС, є крихкі інтерметалідні фази та залишкова поруватість. Поліпшити характеристики інтерметалідних γ -TiAl сплавів, одержаних СВС, можна гвинтовою екструзією, коли вдається усунути залишкову поруватість, гомогенізувати хімічний склад, подрібнити крихкі вкраплення, а отже, суттєво підвищити їх міцність та пластичність [15–18].

Підвищення технологічної пластичності заготовок методом ІПД – в основі ресурсозберігальної технології одержання напівфабрикатів з порошків складнолегованих титанових сплавів, а також інтерметалідних γ -TiAl сплавів для авіаційної техніки. За цією технологією одержали напівфабрикати сплавів для виготовлення навантажених деталей ротора ГТД – лопаток компресора (рис. 5).

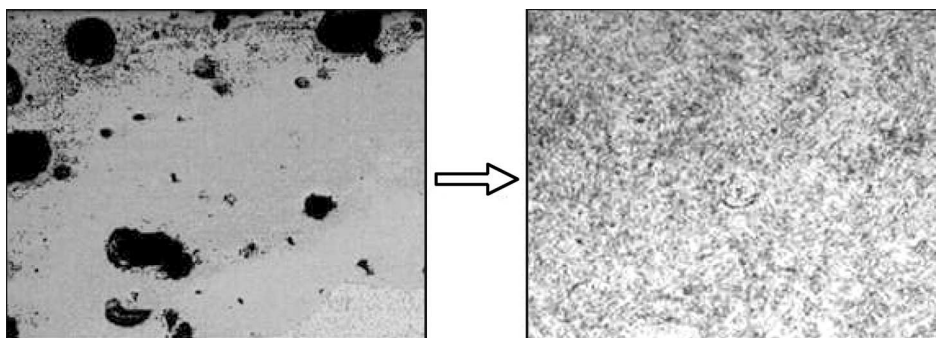


Рис. 5. Схема еволюції структури заготовок з інтерметалідних γ -TiAl сплавів під впливом інтенсивної пластичної деформації.

Fig. 5. A chart of the structure evolution in blanks from intermetallic γ -TiAl alloys under the influence of severe plastic deformation.

ВИСНОВКИ

Розроблено технологію виробництва напівфабрикатів з інтерметалідних γ -TiAl сплавів для авіаційної техніки, що поєднує методи СВС та ІПД. Вона дає можливість одержувати компактні напівфабрикати з субмікрокристалічною структурою, а отже, підвищувати комплекс механічних, фізичних та спеціальних властивостей матеріалу. При цьому собівартість напівфабрикатів удвічі нижча, ніж одержаних переплавом з подальшою деформацією.

РЕЗЮМЕ. Разработана комплексная ресурсосберегающая технология изготовления полуфабрикатов интерметаллидных γ -TiAl сплавов для авиационной техники, в частности лопаток компрессора. Описана структура принципиально новой, в сравнении с существующими, технологии изготовления полуфабрикатов из сплавов на основе алюминидов титана с низкой себестоимостью и улучшенными механическими свойствами. Для этого применены и интегрированы методы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и интенсивной пластической деформации (ИПД) исходных заготовок. Выявлено, что с помощью составов СВС-смесей и технологических режимов можно создавать интерметаллидные γ -TiAl сплавы, химический и фазовый состав которых такой же, как и наилучших иностранных аналогов при значительно меньшей относительной себестоимости получения. На следующем этапе заготовки подвергали ИПД по комплексной технологической схеме, что позволило устранить их основные недостатки, присущие

СВС, а именно: структурные неоднородности, остаточную пористость и низкую пластичность.

Ключевые слова: технология, реакционная смесь, сплав на основе алюминидов титана, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, уплотнение, интенсивная пластическая деформация, микроструктура, субмикроструктурная структура, полуфабрикат, авиационная техника.

SUMMARY. The integrated resource-saving technology for the production of semi-finished product from intermetallic γ -TiAl alloys for aeronautical engineering, in particular compressor blades, is developed. The structure of a fundamentally new, in comparison with existing, technology for manufacturing semi-finished products from titanium aluminide-based alloys with a low cost and high level of mechanical properties is described. This is achieved through the use and integration of the methods of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) and severe plastic deformation (SPD) of the initial blanks. It is shown that the developed compositions of the SHS-mixtures and the technological regimes of SHS-process make it possible to create intermetallic γ -TiAl alloys. Their chemical and phase compositions correspond to the level of the best world analogues at a much lower relative cost of production. At the next stage of the technological process, the blanks are processed by the complex SDP. This stage of the technological process allows to eliminate the main shortcomings of blanks, the production by SHS – structural heterogeneity, residual porosity and low plasticity. These shortcomings of the blanks are eliminated by the main effects of the SPD-specific methods – mass transfer and mixing of the material. These methods lead to homogenization of the alloy, as well as grinding of the grains and the formation of the submicrocrystalline structure of the material.

Keywords: technology, reaction composition, titanium aluminide-based alloy, self-propagating high-temperature synthesis, compaction, severe plastic deformation, microstructure, submicrocrystalline structure, semi-finished product, aeronautical engineering.

Публікація містить результати досліджень, виконаних за грантової підтримки Держаного фонду фундаментальних досліджень за конкурсним проектом (Ф75/29090).

1. *Modern refractory alloys based on titanium gamma-aluminide: prospects of development and application / N. A. Nochovnaya, P. V. Panin, A. S. Kochetkov, K. A. Bokov // Metal Sci. and Heat Treatment. – 2014. – 56, № 7–8. – P. 23–27.*
2. *Перспективные материалы и технологии для деталей ротора компрессора ГТД / Д. В. Павленко, Т. И. Прибора, В. Ю. Коцюба, С. Н. Пахолка // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков, 2016. – Вып. 8/135. – С. 128–138.*
3. *Heat-resistant intermetallic alloys and composites based on titanium: microstructure, mechanical properties and possible application / V. M. Imayev, R. M. Imayev, R. A. Gaisin, T. I. Nazarova, M. R. Shagiev, R. R. Mulyukov // Mater. Phys. and Mech. – 2017. – № 33. – P. 80–96.*
4. *Tailoring microstructure and chemical composition of advanced γ -TiAl based alloys for improved creep resistance / M. Kastnerhuber, T. Klein, H. Clemens, S. Mayer // Intermetallics. – 2018. – 97. – P. 27–33.*
5. *The influence of deformation process at titan aluminides retrieving by SHS-compaction technologies / B. Sereda, I. Kruglyak, A. Zhrebtsov, Y. Belokon // Metallurgical and Mining Industry. – 2011. – № 7. – P. 59–62.*
6. *The modeling of products pressing in SHS-systems / B. Sereda, A. Zhrebtsov, Y. Belokon, I. Kruglyak, S. Sheyko // Mater. Sci. and Technol. Conf. and Exhibition (October 2008). – Vol. 2. – P. 827–831.*
7. *Belokon K. and Belokon Y. The usage of heat explosion to synthesize intermetallic compounds and alloys // Ceramic Transactions. – 2018. – 261. – P. 109–115.*
8. *Twist Extrusion as a Potent Tool for Obtaining Advanced Engineering Materials: A Review / Yan Beygelzimer, Roman Kulagin, Yuri Estrin, Laszlo S. Toth, Hyoung Seop Kim, Marat I. Latypov // Adv. Engng. Mater. – 2017. – 19, № 8. – P. 24.*
9. *Pavlenko D. V., Beygelzimer Ya. E. Vortices in noncompact blanks during twist extrusion // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2016. – 54, № 9–10. – P. 517–524.)*

10. *Improvement of surface conditions of 36CrNiMo6 steel by ball burnishing process* / Hamid Hamadache, Z. Zemouri, L. Laouar, S. Dominiak // *J. of Mech. Sci. and Technol.* – 2014. – № 28 (4). – P. 1491–1498.
11. *Cheylytko A. A study of the rates of pore nucleation and pore growth in alumina-based thermal insulation materials* // *Eastern European J. of Enterprise Technologies.* – 2016. – 2 (8). – P. 56–62.
12. *Belokon Y., Zherebtsov A., and Belokon K. The investigation of nanostructure formation in intermetallic γ -TiAl alloys* // *IEEE Int. Young Scientists Forum on Appl. Physics and Engng, YSF 2017 (January 2017).* – P. 311–314.
13. *Sereda B., Sereda D., and Belokon Y. Investigation of corrosion and oxidation of γ -TiAl alloys obtained in self propagating high temperature synthesis* // *Mater. Sci. and Technol. Conf. and Exhibition (October 2015).* – Vol. 2. – P. 1249–1255.
14. *The retrieving of heat-resistant alloys on intermetallic base for details of gas turbine engine hot track in SHS conditions* / B. Sereda, A. Zherebtsov, I. Kruglyak, Y. Belokon, K. Savela, D. Sereda // *Mater. Sci. and Technol. Conf. and Exhibition (October 2010).* – Vol. 3. – P. 2097–2102.
15. *Павленко Д. В., Овчинников О. В. Вплив деформування методом гвинтової екструзії на структуру та властивості сплаву VT1-0 в різних станах* // *Фіз.-хім механіка матеріалів.* – 2015. – **51**, № 1. – С. 50–57.
(*Pavlenko D. V. and Ovchinnikov A. V. Effect of Deformation by the method of screw extrusion on the structure and properties of VT1-0 alloy in different states* // *Materials Science.* – 2015. – **51**, № 1. – P. 52–60.)
16. *Павленко Д. В. Повышение технологической пластичности спеченных титановых сплавов* // *Процеси механічної обробки в машинобудуванні.* – 2015. – Вип. 15. – С. 1–14.
17. *Деформационная обработка вторичного алюминия и алюминийсодержащих отходов* / А. И. Шевелев, Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, С. Г. Сынков, Л. А. Рябичева, А. В. Решетов. – Донецк: Ноулидж, 2010. – 270 с.
18. *The efficiency of twist extrusion for compaction of powder materials* / Y. E. Beygelzimer, D. V. Pavlenko, O. S. Synkov, O. O. Davydenko // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics.* – 2019. – **58**, № 1–2. – P. 7–12.

Одержано 07.08.2018