

## АНОТАЦІЯ

*Зворикін В. Л.* Технологічне забезпечення процесів зварювання титанових сплавів Ti-TiB між собою і з  $(\alpha + \beta)$  титановим сплавом типу T110 та із сталлю 12X18H10T. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 Прикладна механіка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2020.

Дисертація присвячена встановленню основних закономірностей і шляхів оптимізації режимів виконання зварних з'єднань сплаву Ti – 5%TiB<sub>2</sub> як між собою, так і з титановими сплавами та іншими матеріалами (сталі 12X18H10T, ніобій, ванадій), спрямована на досягнення високих механічних характеристик усіх елементів зварних конструкцій, виконаних електронно-променевим зварюванням.

Вперше досліджено технологічні особливості процесів зварювання титанових сплавів Ti-TiB, їх актуальність визначається необхідністю впровадження у промислове виробництво нових вітчизняних матеріалів на основі титану.

Розроблено методику виконання досліджень експериментальних зразків, зварюваних електронно-променевим способом на установці УЛ-144 за режимами зварювання:  $U_{\text{прск}}=60$  кВ,  $I_{\text{ел}}=90$  мА, швидкість переміщення електронного променя:  $v_{\text{ел}} = 7; 10, 13$  мм·с<sup>-1</sup>, розгортка променя для зварювання титанових сплавів – еліпсоподібна (3×4 мм), а для зварювання із тугоплавкими металами – кругла, діаметром 0,5 мм. Матеріали зварних з'єднань досліджували із застосуванням електронних мікроскопів JSM-840 (JEOL, Японія) із системою рентгенівського аналізу Noran-Quest, програмованою пробною станцією Tracor Northern 5600 revB та двома детекторами зворотного розсіяння, а також використовували Оже-мікрозонд JAMP-9500f (JEOL, Японія). Випробування на розрив проводили на машині для випробування на розтяг ЦД-4 відповідно до

ГОСТ 1497-84. Рентгеноструктурні дослідження зразків виконували із застосуванням рентгенівського дифрактометра ДРОН-УМ-1 в мідному К $\alpha$ -випромінюванні методом крокового сканування.

Встановлено шляхи вдосконалення структури сплаву Ti–TiB в зоні зварного шва, шляхом підбору відповідних параметрів підведення зовнішньої енергії електронного променя в зону формування зварного шва, вибору початкової температури зварюваних матеріалів, проведення термооброблення зварного з'єднання, використання технологічних прокладок з ніобію, ванадію та сталі 10Г2.

Визначено закономірності формування структури зварного шва під час зварювання плавленням сплаву Ti–TiB з різними матеріалами та створення сучасних уявлень щодо впливу нових структурних особливостей матеріалу зварного з'єднання на його механічні властивості.

Експериментальними дослідженнями структури зварного шва сплава Ti–TiB з титановими сплавами та механічних властивостей з'єднання встановлено, що електронно-променево зварювання за параметрів режиму  $U_{\text{прск}}=60$  кВ,  $I_{\text{ел}}=90$  мА, розгортка променя - еліпсоподібна, поперечна (3×4 мм), для всіх значеннях  $v_{\text{ел}}$  в інтервалі від 7 до 13 мм·с<sup>-1</sup> забезпечує отримання нерознімного зварного з'єднання зразків сплаву Ti–TiB, як із сплавами такого ж складу, так і з ( $\alpha + \beta$ ) титановим сплавом типу Т110.

Дослідження показали, що під час формування зварного шва вихідний матеріал зазнає структурних змін, що призводять до зниження товщини волокон, що вміщують бор, із 3-8 мкм до 0,1-0,9 мкм. При цьому втрачається їх характерна вихідна спрямованість і спостерігається значне збільшення співвідношення товщини волокон борвмісної фази з їх довжиною.

Експериментальні дослідження мікроструктури перехідної зони «основний метал»–«матеріал зварного шва» сплаву Ti–TiB показали, що вона має характерний розмір 40-50 мкм. У матеріалі цієї зони спостерігаються як первинні волокна TiB товщиною 3-8 мкм і довжиною від 8 мкм до 40 мкм, характерні для

вихідного матеріалу, так і вторинні тонкі та довгі борвмісні волокна товщиною до 0,1-0,9 мкм завдовжки 3-15 мкм, характерні для зварного шва.

Встановлено, що збільшення вихідної температури зварюваних зразків з 20°C до 400°C призводить до підвищення ступеня однорідності розподілу борвмісної фази в перехідній зоні сплаву Ti-TiB і збільшення розміру вторинних волокон цієї фази як за довжиною, так і за товщиною, як в перехідній зоні, так і в області зварного шва.

Експериментальні дослідження мікроструктури перехідної зони «основний метал»–«матеріал зварного шва» сплаву Ti-TiB з титановими сплавами показали, що за електронно-променевого зварювання збільшення  $v_{ел}$  із 7 до 13 мм·с<sup>-1</sup> призводить до двократного зменшення перехідної зони «основний метал»–«матеріал зварного шва» і до збільшення рівномірності розподілу в титановій матриці волокон, що вміщують бор.

Визначено вплив виконання фінішного термічного оброблення зварних з'єднань пластин товщиною 10 мм зі сплаву Ti-TiB у режимі 550°C (1 година, вакуум), яке дозволяє стабілізувати ступінь їх механічних властивостей на рівні  $\sigma_b=1050$  ГПа,  $\delta=4\%$ .

Встановлено, що зварні з'єднання пластин товщиною 10 мм «Ti-TiB»-«Ti-TiB» і «Ti-TiB»-«сплав типу T110», отримані електронно-променевим зварюванням за значень  $v_{ел}$  в інтервалі від 7 до 13 мм·с<sup>-1</sup> і вихідних температур від 20 до 600°C, за умов досягнення критичного рівня розтягуючих напружень руйнуються по області, що знаходиться поза зоною зварного шва з формуванням поверхонь руйнування з ознаками крихко-в'язкого руйнування.

Експериментальними дослідженнями структури зварного шва сплаву Ti-TiB зі сплавом типу T110, фрактографічної структури поверхонь руйнування та механічних властивостей з'єднання встановлено, що за умови зміни переважної орієнтації армуючих волокон TiB в сплаві Ti-TiB з повздовжньої на поперечну рівень механічних характеристик виконуваного з'єднання «Ti-TiB»–«сплав типу T110» зменшується. Критичним у такому зварному з'єднанні, з точки зору руйнування, є сплав Ti-TiB, у якому реалізується крихке руйнування з його

ініціюванням із області армуючих волокон. Проведення термічного відпалу зварного з'єднання за температури 750°C (1 година, вакуум) дозволяє досягати пластичності цього сплаву до  $\delta=2\%$ .

Вперше експериментально підтверджена можливість отримання зварних з'єднань зразків товщиною 10 мм зі сплаву Ti-TiB та сталі 12X18H10T із використанням режиму електронно-променевого зварювання  $U_{\text{прск}}=60$  кВ,  $I_{\text{ел}}=90$  мА,  $v_{\text{ел}}=7$  мм·с<sup>-1</sup> за умови застосування подвійної прокладки із ніобію та із сталі 10Г2. Для отримання якісних зварних з'єднань експериментальних зразків товщиною 10 мм із титанового сплаву Ti-TiB та ніобію електронно-променевим зварюванням необхідно забезпечувати розплавлення сплаву Ti-TiB за умов змочування ніобію розплавом Ti-TiB (температурний інтервал 1300-1700°C) і запобігати утворенню інтерметалевого прошарку в зварному шві (за температури  $T>1700^\circ\text{C}$ ), що дозволяє досягати рівню механічної міцності з'єднання не меншого  $\sigma_b=260$  МПа.

Показано, що електронно-променеве зварювання з'єднання титанового сплаву Ti-TiB із ванадієм через фольгу зі сталі 12X18H10T дозволяє забезпечити формування на поверхні сплаву Ti-TiB легованого прошарку на основі Ti (63-68 ат.%) V (18-25 ат.%) із збереженням армованої мікроструктури, що містить мікрОВОлокна TiB у металевій матриці Ti (63-68 ат.%) V (18-25 ат.%) з основними легуючими елементами сталі 12X18H10T. Характерною особливістю армуючих боридних мікрОВОлокна у матриці сплаву на основі Ti (63-68 ат.%) V (18-25 ат.%) є їх легування ванадієм та значне подрібнення у порівнянні із мікрОВОлокнами TiB у вихідному сплаві Ti-TiB.

Розроблена методика формування на поверхні сплаву Ti-TiB легованого прошарку забезпечує збереження армованої мікрОВОлокноної структури у покритті на основі Ti (63-68 ат.%) V (18-25 ат.%), сформованому на поверхні сплаву Ti-TiB, легування його металевої матриці добавками (Fe, Cr, Ni, B), і є перспективною для використання такого покриття у якості проміжної вставки для електронно-променевого зварювання сталі 12X18H10T зі сплавом Ti-TiB.

Показано, що для зварювання плавленням сплаву Ti-TiB із титановими сплавами доцільно зберігати у зварному шві та у зоні термічного впливу мікрокомпозиційну структуру. Створенню такої мікроструктури сприяє максимальна швидкість кристалізації і підвищена швидкість електронного променя під час електронно-променевого зварювання. Вперше експериментально підтверджена допустимість у зварному з'єднанні неупорядкованої або упорядкованої переважно перпендикулярно зварному стику орієнтації мікрволокон TiB.

Дослідження мікроструктури зони зварного шва і зони термічного впливу показали, що для сплаву Ti-TiB напрямок переважної орієнтації армуючих волокон TiB, утворених під час евтектичного перетворення визначається спрямуванням температурного градієнту в області кристалізації і це дозволило рекомендувати у подальшому – охолодження зварюваних елементів у напрямку від зварного стику та відсутність попереднього підігріву для запобігання переважної орієнтації армуючих волокон вздовж стику зварюваних деталей.

Вперше доведена можливість зварювання електронно-променевим способом сплаву Ti-TiB, який містить 5% TiB<sub>2</sub> в титановій основі, зі сталлю 12X18H10T, що було забезпечено завдяки збереженню армованої структури металу у зоні зварного шва у титанових сплавах та вирішенню проблем утворення прошарку інтерметаліду, який окричує зварний шов сплаву Ti-TiB зі сталями, та виникнення руйнівних термічних напружень, що виникають унаслідок значної різниці коефіцієнтів термічного розширення з'єднаних матеріалів, шляхом використанням подвійних проміжних вставок зі сталі 10Г2 та ніобію.

У результаті циклу проведених досліджень встановлено, що використання електронно-променевого зварювання із густиною потужності  $\sim 7 \times 10^9$  Вт·м<sup>-2</sup> забезпечує отримання якісного зварного з'єднання сплаву Ti-TiB, який містить 5% TiB<sub>2</sub> в титановій основі, із рівнем механічних властивостей матеріалу шва і зони термічного впливу, не меншим механічних характеристик основного металу.

Експериментальними дослідженнями структури зварного шва сплаву Ti-TiB із титановими сплавами та механічних властивостей зварних з'єднання встановлено, що використання електронно-променевого зварювання із густиною потужності  $\sim 7 \times 10^9$  Вт·м<sup>-2</sup> забезпечує отримання якісного зварного з'єднання сплаву Ti-TiB, який містить 5% TiB<sub>2</sub> в титановій основі, із ( $\alpha+\beta$ ) титановим сплавом типу T110 з рівнем механічних властивостей зони термічного впливу і матеріалу шва, не меншим механічних властивостей основного металу.

Вперше експериментально підтверджена можливість формування електронно-променевим зварюванням сплаву Ti-TiB з таким самим сплавом або із ( $\alpha+\beta$ ) титановим сплавом типу T110 (за параметрів режиму зварювання  $U_{\text{прск}}=60$  кВ,  $I_{\text{ел}}=90$  мА,  $v_{\text{ел}}=7; 10$  та  $13$  мм·с<sup>-1</sup>, розгортка променя еліпсоподібна  $3 \times 4$  мм) зварного шва із матеріалом, що має подрібнені у 3-10 разів та неупорядковані за переважною орієнтацією волокна TiB.

Визначено вплив подрібненої та неупорядкованої за орієнтацією структури волокон TiB, яка формується у матеріалі зварного шва та у зоні термічного впливу зварних з'єднань сплаву Ti-TiB із таким самим сплавом або із ( $\alpha+\beta$ ) титановим сплавом типу T110 і забезпечує їм більш високі характеристики міцності, ніж властивості основних матеріалів

Запропоновано зняття залишкових механічних напружень у матеріалі зварного з'єднання сплаву Ti-TiB шляхом проведення відпалу ( $550^\circ\text{C}$ , вакуум, 1 година), яке дозволяє підвищити і стабілізувати механічні характеристики зварних з'єднань, отриманих електронно-променевим зварюванням, для всіх використаних режимів зварювання ( $\sigma_b=1050$  ГПа,  $\delta=4\%$ )

Запропоновано застосування проміжних шарів з ніобію та із сталі 10Г2 для електронно-променевого зварювання сплаву Ti-TiB, яке забезпечує отримання якісного зварного з'єднання сплаву Ti-TiB, що містить 5% TiB<sub>2</sub> в титановій основі, із сталлю 12X18H10T із рівнем межі міцності в зоні термічного впливу і матеріалі шва, не меншим межі плинності сталі 12X18H10T

Розроблені технологічні рекомендації щодо виконання зварних з'єднань композиційного сплаву Ti-TiB із титановими сплавами та із сталлю 12X18H10T,

що були апробовані у ЦКіТБ «Точність» та впроваджені у виробничий процес Державного підприємства Науково-виробничий комплекс «Прогрес» (м. Ніжин), що підтверджено Актом впровадження.

**Ключові слова:** титан; титанові сплави, сталі, борид титану; композиційні матеріали, електронно-променеве зварювання, зварне з'єднання, параметри зварювання, мікроструктура; механічні властивості.

### ABSTRACT

*Zvorykin V. L.* Technological support of welding processes of Ti-TiB titanium alloys with each other and with ( $\alpha+\beta$ ) titanium alloy of T110 type, as well as with 12X18H10T steel. - Manuscript.

The thesis for receiving the Doctor of Philosophy Degree (Ph.D.) in program subject area 131 Applied Mechanics. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute» of MES of Ukraine, Kyiv, 2020.

The thesis pertains to establishing of the main regularities and ways of optimization of modes of welded joints fulfillment for Ti - 5 % TiB<sub>2</sub> alloy both with each other, and with titanium alloys and other materials (12X18H10T steel, niobium, vanadium), and is aimed at achieving of high mechanical characteristics of all elements of welded constructions, carried out by means of electron-beam welding.

For the first time it is investigated the technological peculiarities of welding processes of Ti-TiB titanium alloys; their actuality is determined by necessity of introduction of new domestic titanium-based materials to the industrial production.

The method of investigation fulfillment is developed for the experimental specimens welded by electron-beam manner by means of УЛ-144 plant with the following welding modes:  $U_{acc}=60$  kV,  $I_{eb}=90$  mA, electron beam movement velocity  $v_{eb}=7; 10, 13$  mm·s<sup>-1</sup>, beam sweep for titanium alloys welding was elliptical (3 4 mm), and for welding with refractory metals - circular, 0.5 mm in diameter. Materials of welded joints were investigated with utilization of JSM-840 (JEOL, Japan) electron microscopes with system of Noran-Quest X-ray analysis system, Tracor Northern 5600

revB programmed probe station and two back-scattered detectors, as well as JAMP-9500f (JEOL, Japan) Auger micro-probe was used. Rupture tests were carried out with ЦД-4 rupture test station according with the GOST 1497-84 state standard. X-ray diffraction study of specimens was carried out with utilization of ДРОН-УМ-1 diffractometer in copper  $K\alpha$ -radiation by step SCAN method.

By selection of proper parameters of electron beam external energy feeding into welded seam formation zone, selection of initial temperature of materials subject to welding, fulfillment of thermal treatment of welded joint and utilization of technological layings from niobium, vanadium and 10Г2 steel, the ways of structure improvement of Ti-TiB alloy in welded seam zone are established.

Regularities of welded seam structure formation during welding by melting of Ti-TiB alloy with various materials are determined and creation of modern ideas regarding influence of new structural features of welded joint material on its mechanical properties is carried out.

By experimental investigations of structure of welded joint of Ti-TiB alloy with titanium alloys and mechanical properties of the joint it was determined, that the electron-beam welding with utilization of the following operating modes:  $U_{acc}=60$  kV,  $I_{eb}=90$  mA, beam sweep - elliptical, transversal ( $3\times 4$  mm), for all values of  $v_{eb}$  in the range from 7 to 13  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  provides the obtaining of permanent welded joint of specimens of Ti-Ti-B alloy both with alloys of the same composition, and with  $(\alpha+\beta)$  titanium alloy of T110 type.

The investigations showed that during period of welded seam formation the final material undergo the structural changes, which result in reduction of boron-containing fiber thickness from 3-8  $\mu\text{m}$  to 0.1-0.9  $\mu\text{m}$ . At that, their typical final directionality is lost and considerable increase of thickness-to-length ratio for boron-containing phase fibers is observed.

Experimental investigations of microstructure of "basic metal"- "welded seam metal" transient zone of Ti-TiB alloy showed that it has typical size of 40 - 50  $\mu\text{m}$ . In material of this zone both initial TiB fibers of 3 - 8  $\mu\text{m}$  thickness and length from 8 to 40  $\mu\text{m}$ , which are typical for final material, and also secondary boron-containing fibers



of 0.1-0.9  $\mu\text{m}$  thickness and 3-15  $\mu\text{m}$  length, which are typical for welded seam, are observed.

It is established, that increasing of outlet temperature of subject to welding samples from 20°C до 400°C results in increasing the homogeneity extent of boron-containing phase distribution in transient zone of Ti-TiB alloy and increasing the dimensions of secondary fibers of this phase, both in length and in thickness, both in transient zone, and in welded seam zone.

Experimental investigations of microstructure of "basic metal"- "welded seam metal" transient zone of Ti-TiB alloy with titanium alloys demonstrated, that under electron-beam welding the increasing of  $\nu_{\text{eb}}$  from 7 to 13  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  results in twofold decreasing of "basic metal"- "welded seam metal" transient zone and increasing the distribution homogeneity of such fibers in titanium matrix, which contains the boron.

It is determined the effect of fulfillment of final thermal processing of welded joints for 10 mm thickness plates from Ti-TiB alloy in 550°C mode (1 hour, vacuum), which permits to stabilize the extent of their mechanical properties at the level of  $\sigma_{\text{B}} = 1,050 \text{ GPa}$ ,  $\delta=4\%$ .

It is established that welded joints of 10 mm plates of "Ti-TiB"- "Ti-TiB" and "Ti-TiB"- "T110 type alloy" kinds, obtained by electron-beam welding under  $\nu_{\text{el}}$  values in the range from 7 to 13  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  and outlet temperatures from 20°C to 600°C, under reaching of tensile stress critical level are ruptured along area, located out of welded seam zone, with formation of rupture surfaces with brittle-ductile rupture evidence.

By experimental investigations of structure of welded seam of Ti-TiB alloy with T110 type alloy and fractographic structure of rupture surfaces and mechanical properties of the joint, it is established, that under condition of changing of predominant orientation of TiB reinforcing fiber in Ti-TiB alloy from longitudinal to transversal, the level of mechanical characteristics of "Ti-TiB"- "T110 type alloy" joint is decreased. From the rupture point of view, the critical in such welded joint is Ti-TiB alloy, in which the brittle rupture is realized with its initiation from reinforcing fibers area. Fulfillment of thermal annealing of welded joint at the temperature 750°C (1 hour, vacuum) permits to reach the ductility of such alloy up to  $\delta=2\%$ .

The possibility of welded joints obtaining for 10 mm thickness samples from Ti-TiB alloy and 12X18H10T steel under electron-beam welding mode  $U_{acc}=60$  kV,  $I_{eb}=90$  mA,  $v_{eb}=7$  mm·s<sup>-1</sup> with condition of utilization of double laying from niobium and 10Г2 steel is confirmed experimentally for the first time. In order to obtain the high-quality welding joints of 10 mm thickness experimental samples from Ti-TiB titanium alloy and niobium, it is necessary to ensure the melting of Ti-TiB alloy under conditions of niobium wetting with Ti-TiB alloy (temperature range 1,300-1,700°C) and prevent from intermetallic laying formation in the welded seam (at the temperatures  $T>1,700$ °C), which permit to reach the level of mechanical strength of the joint not worse than  $\sigma_b=260$  MPa

It is demonstrated, that the electron-beam welding of Ti-TiB alloy with vanadium by means of 12X18H10T steel foil utilization permits to obtain the doped laying on base of Ti (63- 68 at.%) V (18-25 at.%) on Ti-TiB alloy surface with retaining of reinforcing microstructure containing TiB microfibers in Ti (63-68 at.%) V (18-25 at.%) metal matrix with main doping elements of 12X18H10T steel. Characteristic features of reinforcing boron-containing microfibers in matrix of alloy based on Ti (63-68 at.%) V (18-25 at. %) are their doping with vanadium and considerable sizes dimension in comparison with TiB microfibers in Ti-TiB final alloy.

The method is developed of doped laying formation on Ti-TiB alloy surface, which ensures the retaining of reinforced microfiber structure in coating on base of Ti (63-68 at.%) V (18-25 at.%), formed on the surface of Ti-TiB alloy, doping of its metal matrix with dopes (Fe, Cr, Ni, B), and which is perspective for utilization of such coating as an intermediate laying for electron-beam welding of 12X18H10T steel with Ti-TiB alloy.

It is demonstrated, that for welding by melting of Ti-TiB alloy with titanium allows it is expedient to preserve the micro-composition structure in welded seam and in heat affected zone. Such microstructure obtaining promote maximum rate of crystallization and increased velocity of electron beam movement during electron-beam welding. For the first time the permissibility in welded joint the TiB microfibers

disordered or well-ordered predominantly in perpendicular to welded joint direction is confirmed

Investigations of microstructure of welded seam zone and thermal affected zone demonstrated that for Ti-TiB alloy the direction of predominant orientation of TiB reinforcing fibers, formed during eutectic transformation, is determined by direction of temperature gradient in crystallization area and it permits to recommend for future the welded elements cooling in direction from the welding joint and avoiding of its preliminary heating in order to eliminate the predominant orientation of reinforcing fibers along joint of parts subject to welding.

For the first time it is proved the possibility of welding of Ti-TiB alloy, containing 5 % of  $\text{TiB}_2$  in titanium base, with 12X18H10T steel by electron-beam mode, which was provided owing to retaining of reinforcing structure of metal in welded seam in titanium alloys and deciding the problems of inter-metallide laying formation, which frame the welded seam of Ti-TiB alloy with steels, and occurrence of destroying thermal stresses, which are originated owing to considerable difference in thermal expansion coefficients of materials subject to welding, by means of using of double intermediate layings from 10Г2 steel and niobium.

In result of cycle of investigations carried out, it is established, that utilization of electron-beam welding with power density  $\sim 7 \times 10^9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  provides the obtaining of high-quality welding joint of Ti-TiB alloy, containing 5 % of  $\text{TiB}_2$  in titanium base, with such level of mechanical properties of material of seam and thermal affection zone, which is not worse than mechanical properties of basic metal.

By experimental investigations of structure of welded joint of Ti-TiB alloy with titanium alloy and mechanical properties of welded joints, it is established, that utilization of electron-beam welding with power density  $\sim 7 \times 10^9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  provides the obtaining of high-quality welding joint of Ti-TiB alloy, containing 5 % of  $\text{TiB}_2$  in titanium base, with  $(\alpha+\beta)$  titanium alloy of T110 type with the level of mechanical properties of material of seam and thermal affection zone, which is not worse than mechanical properties of basic metal.

For the first time it is confirmed experimentally the possibility of electron-beam welding of Ti-TiB alloy with the same alloy or with ( $\alpha+\beta$ ) titanium alloy of T110 type (welding parameters:  $U_{acc}=60$  kV,  $I_{eb}=90$  mA,  $v_{eb}=7, 10$  and  $13$  mm·s<sup>-1</sup>, beam sweep is elliptical 3×4 mm). In such joints such welded seam material is formed, in which TiB fibers are shortened by 3-10 times and TiB fibers are disordered regarding predominant orientation.

It is determined the influence of reduced by sizes and disordered structure of TiB fibers, which is formed in welded seam material and in heat affected zone of welded joints of Ti-TiB with the same alloy of with ( $\alpha+\beta$ ) titanium alloy of T110 type and which provide for them better strength characteristics in comparison with the basic materials.

Removal of mechanical stresses in material of welding joint of Ti-TiB alloy is proposed by means of annealing fulfillment (550°C, vacuum, 1 hour), which permit to increase and stabilize the mechanical characteristics of welded joints, obtained by electron-beam welding, for all used welding modes ( $\sigma_b=1,050$  GPa,  $\delta=4\%$ ).

It is proposed the utilization of intermediate layers from niobium and 10Г2 steel for electron-beam welding of Ti-TiB alloy, which provides the obtaining of high-quality welded joint for Ti-TiB alloy, containing 5% TiB<sub>2</sub> in titanium base, with 12X18H10T steel with such strength limit in the heat affection zone and seam material, which is not worse than yield limits of 12X18H10T steel.

Recommendations are developed regarding fulfillment of welding joints of Ti-TiB composite alloy with titanium alloy and with 12X18H10T steel, which were approved in the "Tochnist" Central Design and Technological Bureau and embedded into production process of the "Progres" Scientific and Production Complex (Nezhin town, Ukraine), which was confirmed with the Adoption Deed.

**Keywords:** titanium; titanium alloys, steels, titanium boride, composite materials, electron-beam welding, welded joint, welding parameters, microstructure, mechanical properties.

## Список публикацій здобувача за темою дисертації

в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Лобода, П. И., Зворыкин, К. О., Зворыкин, В. Л., Вржижевский, Э. Л., и Романенко, Ю. Н. (2017). Особенности структуры сплава Ti-TiB<sub>n</sub> в области сварного соединения, полученного электронно-лучевой сваркой. *Технологические системы*, 2(79), 50-54. <http://technological-systems.com/index.php/Home/article/view/127/135>. ISSN 2074-0603.
2. Лобода, П. И., Зворыкин, К. О., Зворыкин, В. Л., Вржижевский, Э. Л., и Романенко, Ю. Н. (2017). Влияние параметров электронно-лучевой сварки на структуру армированного композиционного материала Ti – TiB<sub>n</sub>. *Технологические системы*, 4(81), 75-81. <https://doi.org/10.29010/081.10>.
3. Loboda, P. I., Zvorykin, C. O., Zvorykin, V. L., Vrzhyzhevskiy, E. L., & Romanenko Yu. M. (2018). Peculiarities of mechanical properties and structure of area of Ti – TiB<sub>n</sub> alloy welding joint with titan alloys. *Технологические системы*, 4(85), 73-77. <https://doi.org/10.29010/085.14>.
4. Loboda, P. I., Zvorykin, C. O., Zvorykin, V. L., Vrzhyzhevskiy, E. L., Taranova, T. G., & Kostin V. A. (2019). Peculiarities of fracture of welded joints of Ti-TiB titan alloys with titan alloys. *Технологические системы*, 2(87), 60-65. <https://doi.org/10.29010/087.6>.
5. Loboda, P. I., Zvorykin, C. O., Zvorykin, V. L., Vrzhyzhevskiy, E. L., & Romanenko Yu. M. (2019). Influence of thermal processing and orientation of boride fibers in Ti+TiB alloy on mechanical properties and structure of materials of Ti+TiB AND (α + β) Ti alloys welded joint. *Технологические системы*, 4(89), 86-93. <https://doi.org/10.29010/89.13>.
6. Loboda, P., Zvorykin, C., Zvorykin, V., Vrzhyzhevskiy, E., Taranova, T., & Kostin, V. (2020). Production and properties of electron-beam-welded joints on Ti-TiB titanium alloys. *Metals*, 10(4), 522. <https://doi.org/10.3390/met10040522>.
7. Лобода, П. И., Зворыкин, К. О., Зворыкин, В. Л., Вржижевский, Э. Л., Таранова, Т. Г., и Костин, В. А. (2020). Особенности электронно-лучевой сварки

сплава Ti-TiB со сталью 12X18H10T. *Mechanics and Advanced Technologies*, 1(88), 141-148. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.88.204672>.

8. Loboda, P. I., Zvorykin, C. O., Zvorykin, V. L., Vrzhyzhevskiy, E. L., Taranova, T. G., & Kostin V. A. (2020). Structural regularities of welded seam between Ti-TiB and vanadium with 12X18H10T interlayer by using electron beam welding. *Mechanics and Advanced Technologies*, 2(89), 145-154. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.89.211400>.

які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Лобода, П. І., Зворикін, К. О., и Зворикін, В. Л. (2017). Обґрунтування вибору перспективних способів зварювання конструкційних елементів зі сплаву Ti – (5 мас.%)TiB<sub>2</sub>. *Зварювання та споріднені процеси і технології: Матеріали десятої всеукраїнської міжгалузевої науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 7-9 червня 2017 р.). Тези доповідей.* - Київ: НТУУ «КПІ».

10. Лобода, П. И. Зворыкин, К. О., Зворыкин, В. Л., Вржижевский, Э. Л., и Романенко, Ю. Н. (2018). Зависимость структуры сплава Ti – TiB в области сварного соединения, полученного электронно-лучевой сваркой, от ее технологических режимов. *Зварювання та споріднені процеси і технології: Матеріали одинадцятої всеукраїнської міжгалузевої науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 10-12 травня 2018 р.). Тези доповідей.* – - К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – С. 14.

11. Лобода, П. И., Зворыкин, К. О., Зворыкин, В. Л., Вржижевский, Э. Л., и Романенко, Ю. Н. (2018). Закономерности изменения структуры сплава Ti-TiB<sub>n</sub> в области сварного соединения, полученные при изменении параметров электронно-лучевой сварки. *XI Международные молодёжные научно-технические чтения им. А. Ф. Можайского (Запорожье, АО «Мотор Сич», 14-17 мая 2018 г.). Тезисы докладов.* – Запорожье: АО «Мотор Сич». – С. 207-211. - ISBN 978-966-2906-76-9.

12. Лобода, П. И., Зворыкин, К. О., Зворыкин, В. Л., Вржижевский, Э. Л., и Романенко, Ю. Н. (2018). Закономерности изменения структуры сплава Ti-TiV<sub>n</sub> в области сварного соединения, полученные при изменении параметров электронно-лучевой сварки. *Международная конференция «Титан 2018: Производство и применение в Украине» (г. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 11-13 июня 2018 г.). Тезисы докладов.* – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ.

13. Лобода, П. І., Зворикін, К. О., Зворикін, В. Л., та Вржижевський, Е. Л. (2019). Механічні властивості з'єднань сплаву Ti – TiV та (α + β) Ti сплаву, які отримані електронно-променевим зварюванням. *Зварювання та споріднені процеси і технології: Матеріали дванадцятої всеукраїнської міжгалузевої науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 20 червня 2019 р.). Тези доповідей.* – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського.

14. Лобода, П. И., Зворыкин, К. О., Зворыкин, В. Л., Вржижевский, Э. Л., Таранова, Т. Г., и Костин В. А. (2020) Особенности электронно-лучевой сварки пластин сплава Ti-TiV и стали 12X18H10T. *Зварювання та споріднені процеси і технології: Матеріали тринадцятої міжнародної міжгалузевої науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 13-15 травня 2020 р.). Тези доповідей.* – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С. 13-14.

які додатково відображають наукові результати дисертації:

15. Зворыкин, К. О., и Зворыкин, В. Л. (2014). Выбор способа получения неразъемного сварного соединения в системах железо-ниобий, сталь-ниобий. *Технологические системы*, 1(66), 83-89. <http://technological-systems.com/index.php/Home/article/view/213/219>. ISSN 2074-0603. ISSN 2074-0603.

16. Зворикін, В. Л., Зворикін, К. О., та Шматко, І. О. (2015). Особливості будови зони контакту після точкового зварювання сплаву АМц через проміжний

прошарок. *VIII Всеукраїнська міжгалузева науково-технічна конференція студентів, аспірантів та наукових співробітників «Зварювання та споріднені процеси і технології»*.: - Київ: НТУУ «КПІ».

17. Зворикін, В. Л. та Шматко, І. О. (2015). Масоперенесення Со-60 у зоні контакту зразків зі сплаву АМц при точковому зварюванні скрізь проміжні прошарки. *VIII Всеукраїнська міжгалузева науково-технічна конференція студентів, аспірантів та наукових співробітників «Зварювання та споріднені процеси і технології»*: - Київ: НТУУ «КПІ».

18. Мазанко, В. Ф., Храновська, К. М., Ворона, С. П., и Зворикін, В. Л. (2015). Вплив електроіскрового оброблення графітом на елементний склад титанової та мідної підкладок. *Металознавство та обробка металів*, 1, С.20-23.

19. Мазанко, В. Ф., Храновская, К. Н., Богданов, С. Е., и В. Л. Зворыкин (2015). Фазовые и структурные особенности формирования покрытий на стали 20 при электроискровом легировании сплавом ВК8. *Міжнародна науково-практична конференція «Структурна релаксація у твердих тілах»*. 26-28 травня 2015 р.: - Вінниця.

20. Velikoivanenko, E. A., Milenin, A. S., Rozynka, G. F., Vrzhyzhevskiy, E. L., Piskun, N. V., Taranova, T. G., Zvorykin, C. O., & V. L. Zvorykin (2019). Prediction of susceptibility of welded joints of titan  $\gamma$ -aluminide based alloy to cold cracking in electron-beam welding. *Технологические системы*, 3(88), 73-80. <https://doi.org/10.29010/88.13>.