

Liutova O.V., Kapustian O.Ye.

INCREASING THE FOUNDRY PROPERTIES OF SECONDARY SILUMINS

The work is devoted to improving the casting properties of secondary silumins. The influence of the content of chips in the charge, the amount of iron in the alloy and the modifier used for processing the liquid melt on the liquid, linear shrinkage, crack resistance and porosity score of AK9M2 silumin is considered. Aluminum is a key material of modern industry, which is actively used in many industries due to its unique properties: lightness, high corrosion resistance, specific strength, thermal conductivity and manufacturability. Its application covers automotive, aviation, construction, electrical engineering and other areas. However, the production of primary aluminum is associated with significant energy consumption and a high level of environmental pollution. In this regard, the secondary processing of aluminum is gaining increasing importance, especially in the manufacture of silumins - alloys based on aluminum with silicon, which are characterized by wide application possibilities. However, secondary aluminum alloys have certain disadvantages. Due to the presence of impurities such as iron, calcium or other non-metals, their mechanical and technological properties can be significantly limited. Refining and modification are used to improve the characteristics of such alloys. Refining methods are aimed at purifying the metal from non-metallic inclusions and dissolved gases. The main approaches include settling, fluxing, inert gas purging and filtration through special systems.

The alloy structure is modified by introducing alloying components, in particular transition metals, strontium, titanium, boron, antimony. Such additives allow controlling the crystallization process, reducing grain size and evenly distributing the particles of the strengthening phase, which has a positive effect on strength, ductility and casting properties.

New methods, in particular the use of sulfur or multi-component alloys, show promise for creating secondary aluminum alloys with improved properties. These approaches allow more effectively solving the problem of metal reuse, improving product quality and reducing environmental impact.

Keywords: secondary silumins, foundry properties, modification.

Стаття надійшла 06.10.2024р.

УДК 669.295.054.85

doi.org/10.31498/2522-9990282024318359

Білоник Д.І., Грабовський В.Я., Капустян О.Є.,
Лаврись С.М., Лаптева Г.М., Білоник І.М.

СТРУКТУРА І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВТОРИННОГО ТИТАНУ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОЇ ВИПЛАВКИ У ВІДКРИТОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ ПІСЛЯ ГАРЯЧОГО КУВАННЯ

В роботі наведені результати дослідження структури та стандартних механічних властивостей вторинного титану в литому стані (електрошлаковий зливочок) та після його гарячого кування з коефіцієнтами деформації $\varepsilon = 40\%$ і $\varepsilon = 90\%$. Зливки отримали на електрошлаковій установці А-550 конструкцію якої удосконалили для переплаву витратних електродів виготовлених зі 100% листової обрізі титану ВТ1-0. На верхньому фланці відкритого кристалізатора встановили ковзний струмопідвід і пристрій, який захищав аргоном поверхню шлакової ванни і розігріту частину витратного електроду. Для виконання

Машинобудування і зварювальне виробництво

роботи виплавили електрошлаковий зливочок вторинного титану діаметром 85 мм. Поверхня зливка гладка, гофри та пережими відсутні. Хімічний склад зливка, мас. % Fe – 0,05 %; C – 0,030 %; Si – 0,06 %; O – 0,031 %; N – 0,058 %; H – 0,0012 %; Ti – основа. У порівнянні з титаном ВТ1-0 (ГОСТ 19807-91) вміст кисню та азоту в електрошлаковому зливку був вищим в 1,51 та 1,45 разів відповідно. З отриманого зливка виготовили зразки для досліджень макро – мікроструктури і механічних властивостей (σ_b , σ_T , δ , ψ , КСУ) у литому стані та після гарячого кування з коефіцієнтами деформації $\epsilon = 40\%$ та $\epsilon = 90\%$. Макроструктура злиwkів вторинного литого титану – крупнокристалічна, щільна, однорідна. Розмір литого зерна відповідає 9 – 10 балу. Мікроструктура типова для α – титанових сплавів і складається з пластин α -фази, які зібрані в пачки товщиною 15 – 20 мкм і довжиною 300 – 500 мкм. При таких структурних складових, характеристики пластичності литого вторинного титану виявились не дуже високими ($\delta = 11,5\%$; $\psi = 12,5\%$; $КСУ = 0,28 \frac{\text{кгс}\cdot\text{см}}{\text{см}^2}$), а зростання міцності ($\sigma_b = 560 \text{ МПа}$ та $\sigma_T = 505 \text{ МПа}$) можна пояснити впливом кисню і азоту. При гарячому куванні дослідних зразків електрошлакового титану встановлено, що вторинний титан добре піддається обробці тиском, яка також суттєво подрібнює структуру. Так, при деформації з коефіцієнтом $\epsilon = 40\%$ отримали 5 – 6 бал зерна, а при $\epsilon = 90\%$ 3 – 4 бал. Характеристики пластичності при цьому становлять $\delta = 20\%$; $\psi = 31,5\%$; $КСУ = 0,45 \frac{\text{кгс}\cdot\text{см}}{\text{см}^2}$ та $\delta = 24,5\%$; $\psi = 47,5\%$; $КСУ = 0,58 \frac{\text{кгс}\cdot\text{см}}{\text{см}^2}$ відповідно. На міцність вторинного гарячекованого електрошлакового титану впливають ступінь деформації і підвищений вміст кисню та азоту. При $\epsilon = 40\%$ $\sigma_b = 625 \text{ МПа}$; $\sigma_T = 540 \text{ МПа}$, а при $\epsilon = 90\%$ $\sigma_b = 700 \text{ МПа}$; $\sigma_T = 580 \text{ МПа}$.

Ключові слова: вторинний титан, електрошлакова технологія, гаряче кування, мікроструктура, макроструктура, механічні властивості, бал зерна.

Постановка проблеми. Титан вторинний – це титан, отриманий із вторинної сировини, тобто, із відходів, які виникають при виробництві титана первинного (отриманого з природної мінералогічної сировини), а також при виготовленні і експлуатації виробів із титану первинного та його сплавів [1].

Останні десятиліття питання ресурсозбереження й переробки металевих відходів стали дуже актуальними, і вторинний титан привернув увагу як перспективна сировина, що здатна суттєво знизити споживання ресурсів і зменшити вплив на навколишнє середовище. Основними перевагами вторинного титану є його висока корозійна стійкість, низька щільність і висока міцність, а також економічна вигода порівняно з первинним титаном.

Розробкою технологій рециклінгу відходів титану в Україні займаються такі провідні наукові установи як ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, ДП «Науково-виробничий центр «ТИТАН» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України», АТ «ІНСТИТУТ ТИТАНУ». Структуру, механічні та корозійні властивості титану та його сплавів, які виготовлені за новими перспективними технологіями, досліджують в Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України, провідних університетах НУ «Запорізька політехніка», НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», «Український державний хіміко-технологічний університет».

Промислове впровадження та подальше вдосконалення технології рециклінгу титанових відходів виконують ДП «Науково-виробничий центр «ТИТАН» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України», компаніями «АНТАРЕС», «ФІКО», АТ «Мотор СІЧ» та ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат».

Активно проводять роботи по отриманню титанових злиwkів із залученням відходів такі закордонні фірми як CARPENTER, ATI, Timet, корпорація «Titanium metals» та інші. Компанія «ЕСО Titanium» закінчує будівництво в Європі по рециклінгу лома і відходів титану для

Машинобудування і зварювальне виробництво

потреб авіакосмічної індустрії. Планується застосування сучасного обладнання, такого як плазмово-дугової та двох вакуумнодугових печей, що дозволить отримувати зливки легованих та високолегованих титанових сплавів високої якості.

Із вище наведеного можна зробити висновок, що на сьогодні актуальною тематикою є розробка технологій рециклінгу, які найбільш економічні та дозволяють залучати у злинок до 100% відходів титану. Не менш важливим є подальше комплексні дослідження властивостей вторинного титану (зливок, напівфабрикат), що дозволить визначити раціональні сфери його застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботах [2–6] доведено, що найбільш доречно залучати титанові відходи у шихту, або в пресовані витратні електроди для подальшого отримання злиwkів методами вакуумної гарнісажної плавки, електронно-променевої плавки, плазмово-дугової плавки, камерного електрошлакового переплаву. Такі технології дозволяють переробляти майже всю номенклатуру титанових відходів, наведених в ДСТУ 3211:2009 /ГОСТ 1639:2009/ «Лом та відходи кольорових металів і сплавів». Але, у вищезазначених технологіях, кількість титанових відходів, яку можна додавати в плавку, не перевищує 30–40% від маси зливка.

Титанові зливки, хімічний склад яких відповідає ГОСТ 19807-91, піддають обробці тиском. З них виготовляють такі напівфабрикати як лист, плита, смуга, фольга, пруток, поковки [6]. В результаті обробки тиском не тільки змінюється форма, розміри зливка, а й суттєво поліпшуються механічні властивості. Наприклад, для зливка титану ВТ1-Л $\sigma_b = 340$ МПа, $\delta = 10\%$, $\psi = 38\%$, $KCU = 0,5 \frac{\text{кгс}\cdot\text{см}}{\text{см}^2}$, а для напівфабрикатів із титану ВТ1-0, наприклад прутків діаметром 120–140 мм $\sigma_b = 510$ МПа, $\psi = 40,2\%$, $KCU = 0,7 \frac{\text{кгс}\cdot\text{см}}{\text{см}^2}$ [7,8]. Тому, можна очікувати, що гаряче кування електрошлакових злиwkів вторинного титану, отриманих з залученням 100% відходів теж повинно забезпечити підвищення механічних властивостей.

Нажаль, у науковій літературі майже не наведено інформації стосовно якості злиwkів, отриманих зі 100% титанових відходів, а питання наступної обробки тиском та її вплив на структуру і механічні властивості вторинного титану потребують додаткових досліджень.

Мета дослідження. Метою роботи є: з'ясувати здатність електрошлакових злиwkів вторинного титану виплавлених у відкритому кристалізаторі до гарячого кування; дослідити структуру і механічні властивості електрошлакового зливка вторинного титану, виплавленого у відкритому кристалізаторі з використанням витратних електродів, виготовлених зі 100% відходів листової обрізи титану ВТ1-0; литого титану; визначити вплив гарячого кування з коефіцієнтами деформації 40% та 90% на структуру і механічні властивості вторинного титану електрошлакової виплавки у відкритому кристалізаторі.

Для цього потрібно виконати наступні завдання:

1. Виготовити витратні електроди зі 100% листової обрізи титану ВТ1-0;
2. Виплавити електрошлаковий злинок вторинного титану у відкритому кристалізаторі, дослідити структуру та механічні властивості;
3. Підготувати зі зливка зразки та обробити їх тиском методом вільного гарячого кування з коефіцієнтами деформації $\varepsilon=40\%$ та $\varepsilon=90\%$. Дослідити структуру та механічні властивості деформованого титану.

Основний матеріал дослідження. 1. Матеріал витратного електрода.

Для електрошлакової виплавки вторинного титану в якості матеріалів, з яких виготовляли витратні електроди, застосовували кондиційні відходи листової обрізи титану ВТ1-0 (рис. 1), які виникали на підприємстві ВАТ «Южцветметгазоочистка» при виготовленні повітряводів, газоходів, різноманітних корпусів та іншого обладнання для хімічних комбінатів.

Машинобудування і зварювальне виробництво



Рисунок 1 – Відходи листової обрізі титану VT1-0

Слід зазначити, що на даному підприємстві застосовували титан тільки однієї марки – VT1-0. Хімічний склад смуг, з яких виготовляли витратні електроди, безумовно різнився між собою, але відповідав вимогам ГОСТ 19807-91: $Fe \leq 0,25\%$; $C \leq 0,07\%$; $Si \leq 0,1 \%$; $O \leq 0,2\%$; $N \leq 0,04\%$; $H \leq 0,01\%$; $Ti \ 99,24 - 99,7\%$.

2. Виготовлення витратних електродів.

Відходи листової обрізі титану (рис.1) являють у своїй більшості смуги довжиною до 2000 мм, шириною 30–50 мм та товщиною від 2 до 8 мм. Це дозволило майже без додаткової обробки збирати їх у пакет для подальшого зварювання у витратні електроди. Між собою полоси зварювали аргонодуговим методом неплавким електродом (спосіб TIG ГОСТ 14771-76) з двох протилежних сторін з кроком 50–60 мм. На одному з кінців електроду свердлили отвір для різьбового з'єднання з інвентарною головкою, яка встановлювалась у електродотримач електрошлакової установки.

3. Обладнання та режим плавки.

Переплавлення витратних електродів виконували на електрошлаковій установці А-550 з трансформатором ТШС – 3001. Враховуючи, що електричний опір титану майже у 10 разів вище ніж у сталей, то в процесі електрошлакової плавки в квазістаціонарний період при проходженні електричного струму по витратному електроду він нагрівається до температури 700–800 °С. Це призводить до насичення його поверхні киснем та азотом повітря, що в подальшому небажано впливає на якість титанового зливка. Щоб виключити це явище провели удосконалення конструкції установки А-550. Взагалі, застосували ковзний струмопідвід, який встановлювали на верхньому фланці кристалізатора. Поверхню шлакової ванни та частину розігрітого витратного електроду захищали аргоном. Для цього було розроблено спеціальний пристрій.

Параметри електрошлакової виплавки вторинного зливка титану наступні: струм плавки – 2600 – 2700 А, напруга на шлаковій ванні – 27 В, флюс – 100% CaF_2 , кристалізатор діаметром 85 мм, переріз електроду – 40x35мм; довжина електроду – 2000 мм. Робочий момент електрошлакової виплавки вторинного титану наведено на рис. 2.

4. Методики досліджень вторинного титану.

Хімічний склад отриманих зливок визначали спектральним методом з використанням прибору «SPECTROMAX» фірми «СПЕКТРО» по стандартним методикам (ГОСТ 19863.1-91; 19863.6-91; 19863.8-91; 19863.10-91; 19863.13-91). Вміст домішок (азоту, кисню та водню)



Рисунок 2 – Електрошлакове виплавлення вторинного титану

визначали згідно ГОСТ 190013-86, для чого застосовували газоаналізатор моделі ON900 фірми «ELTRA» з використанням виготовлених циліндричних зразків діаметром 5 мм та довжиною 3,5 мм. Данні дослідження виконали в акредитованих лабораторіях «Send Lab» м. Дніпро та ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» м. Запоріжжя.

Дослідження макроструктури зливок та зразків після гарячого кування проводили візуальним оглядом, а також з використанням стереометричного мікроскопу «Stemi» 200-с (фірма «Karl Zeiss», Німеччина) на травлених макротемплетях. Розмір литого зерна визначали лінійним методом січних А.А. Глаголева [9]. Макроструктуру вторинного титану після деформації оцінювали згідно Інструкції № 1054-76 «Металографічний аналіз титанових сплавів». Додатково виконували дефектоскопію зливок та зразків після кування ультразвуковим методом з використанням дефектоскопа УД4-1 і датчика 5К6 в акредитованій лабораторії ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат».

Зразки для досліджень мікроструктури готували послідовним шліфуванням з застосуванням паперу різної зернистості (від № 40 по ГОСТ 5009-75 до мікронної М20 ГОСТ 10054-75) та поліруванням на сукні, змоченому суспензією «DialDuo» (фірма «STRUERS») на основі алмазних часток фракції 3 мкм. Травлення шліфів виконували у реактиві наступного складу: HF – 10 мл, HNO₃ – 25мл, гліцерин – 65 мл, а також в реактиві Крола: H₂O – 100 мл, HNO₃ – 6 мл, HF – 3 мл.

Мікроструктуру досліджували після відпалу зразків при T=650°C на оптичному металографічному мікроскопі «Axio Observer. Dlm» (фірма «Karl Zeiss», Німеччина), оснащеного камерою ARTCAM-300MI (3M pixels progressive USB2/0 COLOR CMOS CAMERA); зйомка виконана у відбитому світлі за методами світлового поля. Також застосовували металографічні мікроскопи MIM-8, NEOFOT-32.

При дослідженні механічних властивостей зразків литого та гарячекованого вторинного титану визначили:

– межу плинності, межу міцності, відносне звуження, відносне подовження згідно ГОСТ

Машинобудування і зварювальне виробництво

1497-84 (СТСЭВ 471-88) на стандартних циліндричних зразках діаметром 5 мм і довжиною робочої частині 30 мм на розрівній машині Instrom 8801;

– ударну в'язкість за ISO 6892-84 на зразках 55x10x10 мм з U-образним концентратором на маятниковому копрі МК-30;

– твердість стандартними методами Роквелла та Бринеля (ГОСТ 9013-69, ГОСТ 9013-59) твердомірами ТК-2М та ТШ-2М, мікротвердість – прибором ПМТ-5.

Для оцінювання здатності вторинного електрошлакового титану до обробки тиском застосували стандартні методики [10, 11]. Зі зливка діаметром 85 мм після обточування альфірованого шару виготовили зразки діаметром 80 мм і товщиною 50 мм (Рис.3) для гарячого кування.

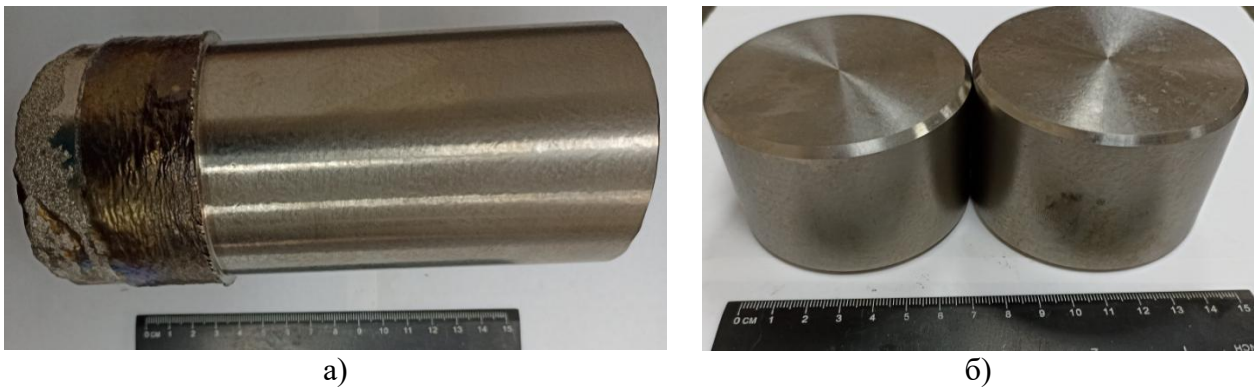


Рисунок 3 – Дослідний електрошлаковий зливкок вторинного титану та зразки для кування: а) електрошлаковий зливкок вторинного титану після обточування альфірованого шару; б) зразки для гарячого кування

В інституті УкрНДІСпецсталь за діючою технологією на гідравлічному пресі ОКП-500 зусиллям 250 тон зразки на гарячо відкували з коефіцієнтами деформації $\epsilon = 40\%$ та $\epsilon = 90\%$. Досліджували структуру та механічні властивості деформованого вторинного титану за методиками, наведеними вище.

5. Отримані результати та їх обговорення.

Хімічний склад електрошлакового вторинного зливка наступний, мас. %: С – 0,030; Fe – 0,05; Si – 0,06; O – 0,31; N – 0,058; H – 0,0012. Результати свідчать, що отриманий вторинний електрошлаковий титан у порівнянні з ГОСТ 19807-91 містить більш високу кількість кисню та азоту. На наш погляд, це можливо викликано недостатньо ефективним захистом розігрітої частини витратного електроду та поверхні шлакової ванни. Але слід зазначити, що в сучасному машинобудуванні застосовується нелегований титан, у якому вміст кисню та азоту ще більше ніж у отриманому електрошлаковому зливку, наприклад RT-18, 3.7055, Ti3, 3.7065, Ti4 (Німеччина), Class 3 (Японія), Ti-P.03, T-50, Ti-P.04, T-60 (Франція) [12, 13].

Макроструктура зливка вторинного титана крупнокристалічна, щільна, однорідна, дефекти металургійного та технологічного походження відсутні. Ультразвуковий контроль також не виявив дефектів. Розмір литого зерна відповідає 9 – 10 балу (рис. 4).

Потрібно зазначити, що макроструктура характерна для електрошлакового зливка при поступовому плавленні витратного електроду і кристалізації розплавленого металу у водоохолоджуваному мідному кристалізаторі.

Машинобудування і зварювальне виробництво

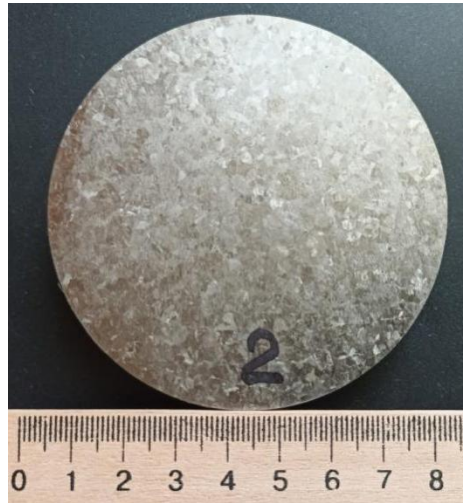
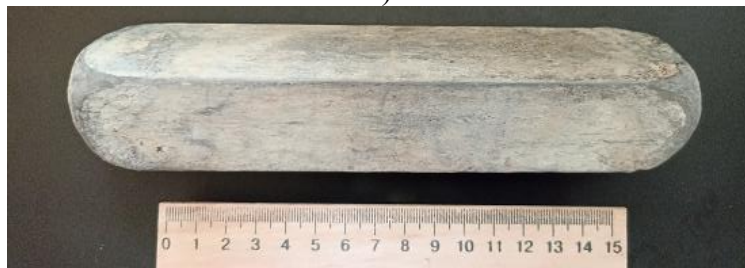


Рисунок 4 – Макроструктура зливка вторинного титану. Поперечний темплет

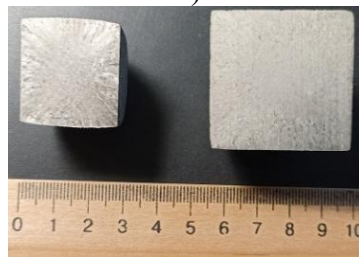
На рисунку 5 наведені зразки після гарячого кування з коефіцієнтами деформації 40% і 90% та їх макроструктура. Слід зазначити, що в процесі гарячого кування не виникало додаткових технологічних труднощів. На поверхні зразків відсутні тріщини, розриви та інші дефекти. Після ультразвукового контролю також не виявлено внутрішніх дефектів. Це дозволяє зробити висновок, що вторинний електрошлаковий титан можна обробляти тиском і взагалі гарячим куванням.



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Зовнішній вигляд гарячекованих зразків: а) з коефіцієнтом деформації 40%; б) з коефіцієнтом деформації 90%, та в) їх макроструктура

Машинобудування і зварювальне виробництво

Макроструктура (рис. 5) деформованого зразка електрошлакового зливку вторинного титану, ступінь деформації 40% характеризується:

- наявністю, переважно, макрозерен, витягнутих у напрямку деформації, в центральній частині зразка – макрозерна за формою наближені до рівновісної, діаметром до 2 мм (за шкалою величини макрозерна – відповідають 5–6 балів);
- фон макроструктури матовий, з елементами блиску;
- дефектів металургійного та деформаційного походження у дослідженому перерізі заготовки не виявлено.

Макроструктура (рис. 5) зразка, виготовленого з більшою деформацією ($\epsilon=90\%$), також має матовий фон травимості, макрозерна дрібні, однорідні та по перерізу відповідають 3–4 балам. Дефекти деформаційного походження не виявлено. Однорідні дрібні зерна свідчать про достатнє деформаційне опрацювання металу при температурах, що не перевищують температуру поліморфного перетворення титану.

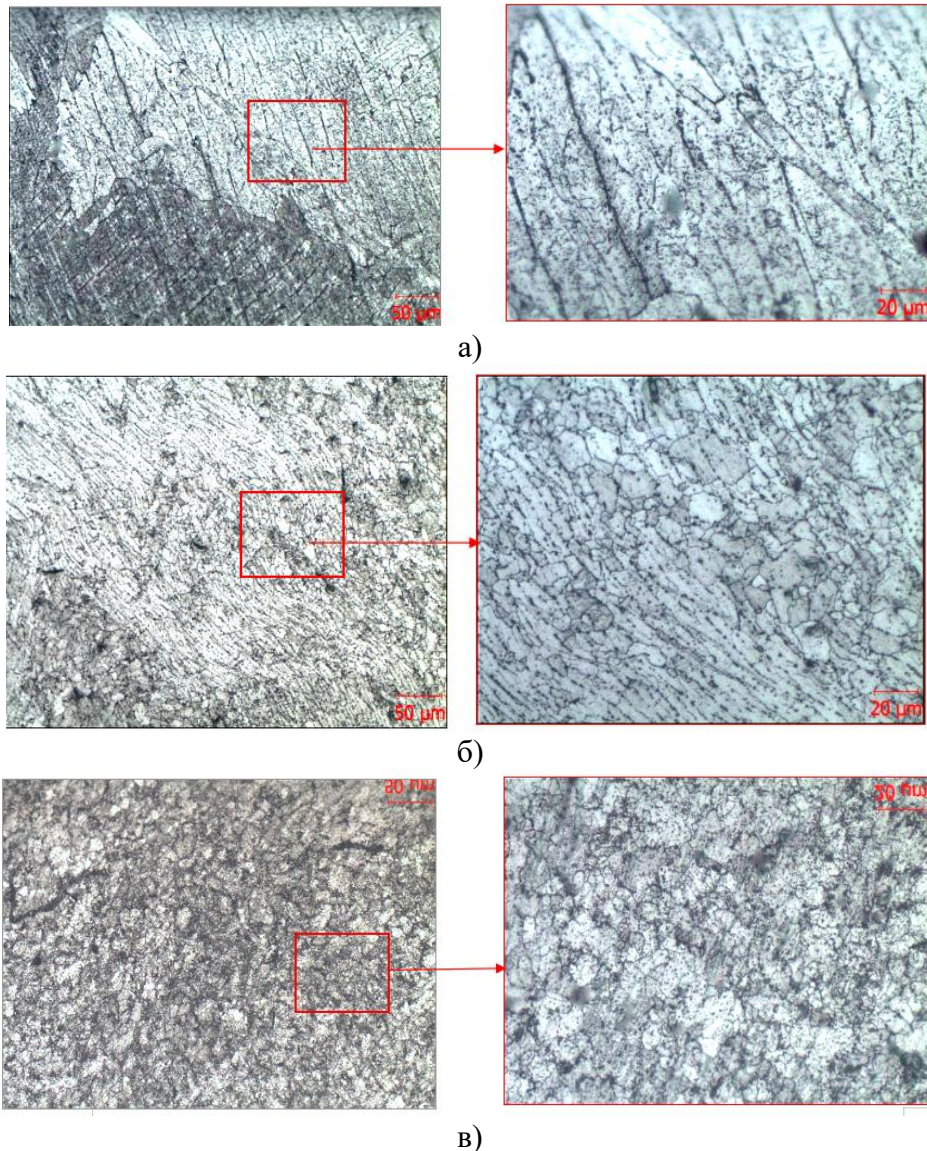


Рисунок 6 – Мікроструктура електрошлакового вторинного зливка титана: а) відпал 650°C; б) деформація 40%; в) деформація 90 % + відпал 650 °C

Машинобудування і зварювальне виробництво

Мікроструктура зливка електрошлакового вторинного титану (рис. 6, а) типова для литих α -титанових сплавів: складається з пластин α -фази різної орієнтації, зібраних у пачки, товщина яких становить $\sim 15\text{...}20$ мкм, а довжина їх – $300\text{...}500$ мкм.

Мікроструктура деформованого ($\epsilon=40\%$) з вторинного титану складається з двох типів зерен (рис. 6, б): деформованих і витягнутих у вигляді волокон, поряд з якими виявлено дрібні ($\sim 5\text{...}10$ мкм) рівновісні зерна, що свідчить про протікання процесу рекристалізації при нагріванні до температури початку рекристалізації Тп.р $\sim 500^\circ\text{C}$ та зародження нових зерен на фоні деформованої структури. При подальшому підвищенні температури до 650°C відбувається збільшення кількості рекристалізованих зерен. Судячи з вигляду деформованої мікроструктури, що зберіглася, з витягнутих і сплюснутих зерен, в зразку з $\epsilon=40\%$ при відпалі 650°C стадія збиральної рекристалізації пройшла не в повному обсязі.

Мікроструктура електрошлакового вторинного титану, виготовленого з більшим ступенем деформації ($\epsilon=90\%$) по всьому полю шліфа складається з рівновісних зерен α -фази, товщина яких становить $7 - 8$ мкм, а довжина $200 - 300$ мкм (рис. 6, в). Вочевидь, ступінь деформації ($\epsilon=90\%$) призвів до більшої енергії активації процесу рекристалізації при відпалі 650°C і, як наслідок – зростання нових рекристалізованих зерен, що мало місце по всій поверхні зразка.

Результати механічних випробувань зразків наведені в таблиці 1. Всі зразки піддавалися відпалу при температурі 650°C .

Таблиця 1 – Механічні властивості електрошлакового вторинного титану

Варіанти дослідних зразків	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, $\frac{\text{кгс}\cdot\text{м}}{\text{см}^2}$
$\epsilon=0\%$	560	505	11,5	12,5	0,28
$\epsilon=40\%$	625	540	20,0	31,5	0,45
$\epsilon=90\%$	700	580	24,5	47,4	0,58

Таким чином, застосування гарячого кування дозволяє суттєво підвищувати механічні властивості вторинного електрошлакового титану до рівня стандартних нелегованих α -титанових сплавів.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що електрошлакові зливки вторинного титану, отримані у відкритому кристалізаторі із залученням 100% відходів титану та які мають підвищений вміст кисню (0,31%) та азоту (0,058%), здатні до гарячого кування з $\epsilon = 40\%$, $\epsilon = 90\%$, про що свідчить відсутність зовнішніх та внутрішніх дефектів.

2. При дослідженні макроструктури зразків вторинного титану встановили, що гаряче кування суттєво подрібнює зерно з $9 - 10$ балу (литий стан) до $5 - 6$ балу при $\epsilon = 40\%$ і до $3 - 4$ балу при $\epsilon = 90\%$.

3. Будова мікроструктури кованих зразків також відображає інтенсивність деформації. Встановлено, що для литого вторинного титану мікроструктура складається з пластин α -фази різної орієнтації і зібраних у пачки товщиною $15 - 20$ мкм і довжиною $300 - 500$ мкм. Після деформації з $\epsilon = 40\%$ розмір зерен α -фази зменшився до $8 - 10$ мкм, при $\epsilon = 90\%$ – до $6 - 7$ мкм.

4. Доведено, що гаряче кування змінило структуру вторинного титану, яка забезпечила суттєве підвищення механічних властивостей і більш за все характеристики пластичності. Це дає можливість застосовувати вторинний електрошлаковий титан після гарячого кування на рівні зі стандартними марками нелегованого титану.

Список використаних джерел

1. Колобов Г.А., Пожуев В.И., Телин В.В. Титан вторичный. Часть 1. Монография. – Запорожье, ЗГИА. 2006. – 124 с.
2. Ахонин С.В., Северин А.Ю., Березос В.О. Дослідження якості деформованих напівфабрикатів титанового сплаву ВТ9, отриманого способом електронно-променевої плавки /Сучасна електрометалургія. – 2021. – №4. С.2 – 25
3. Бурнашов В.Р., Никитенко Ю.О., Барабаш В.В., Шаповалов В.О. Переплав відходів титану та титанових сплавів в умовах плазмодугової плавки/Сучасна електрометалургія. – 2021. – №4. С. 32–38
4. Патон Б.Є., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В. Электроннолучевая плавка титана / Киев: Наукова Думка. 2006. – 248 с.
5. Шейко И.В., Шаповалов В.А., Шестко И.В. Альтернативные технологии переплава промышленных отходов титана и его сплавов / Сучасна електрометалургія. – 2007. – №3 - С. 44-53
6. Колобов Г.А., Воденников С.А. Печерица К.А. Технологии использования оборотных литейных отходов в производстве титанового фасонного литья и слитков/ Металлургия/ № 2(38). – 2017. – С. 46–50.
7. Ильин А.А., Калачев Б.А. Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. М.: ВИЛС-МАТИ. – 2009. – 520 с.
8. Калачев Б.А., Буханова А.А. Механические свойства титана и его сплавы. М.: Металлургия. – 1976. – 544 с.
9. Салтыков С.А./ Стереометрическая металлография. М.: Металлургия. – 1976. – 270 с.
10. Сторожев М.В. Технологияковки и горячей штамповки цветных металлов [Текст]. М.: Высшая школа. – 1976. – 350 с.
11. Илларионов А.Г., Попов А.А. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2014. – 137 с.
12. Калачев Б.А., Польшкин И.С., Талалаев В.Д. Титановые сплавы разных стран. Справочник. М.: ВИЛС. – 2000. – 316 с.
13. ASTM B348/B348M-19 Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Bars and Billets. – 2019.

**Bilonyk D.I., Grabovskyi V.Ya., Kapustian O.Ye.,
Lavryts S.M., Lapteva H.M., Bilonyk I.M.**

STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF SECONDARY TITANIUM OF ELECTROSLAG SALT IN AN OPEN CRYSTALLISER AFTER HOT FORGING

The paper presents the results of the study of the structure and standard mechanical properties of secondary titanium in the cast state (electroslag ingot) and after its hot forging with deformation coefficients $\varepsilon = 40\%$ and $\varepsilon = 90\%$. The ingots were received at the A-550 electroslag plant, the design of which was improved for the remelting of consumable electrodes made from 100% VT1-0 titanium sheet cut. On the upper flange of the open crystallizer, a sliding current lead and a device were installed, which protected the surface of the slag bath and the heated part of the consumable electrode with argon.

To perform the work, an electroslag ingot of secondary titanium with a diameter of 85 mm was melted. The surface of the ingot is smooth, there are no corrugations and crimps. Chemical

composition of the ingot, wt. % Fe – 0.05%; C – 0.030%; Si – 0.06%; O – 0.031%; N – 0.058%; H – 0.0012%; Ti is the base. Compared to VT1-0 titanium (GOST 19807-91), the oxygen and nitrogen content in the electroslag ingot was 1.51 and 1.45 times higher, respectively. Samples were made from the obtained ingot for studies of macro-microstructure and mechanical properties (σ_B , σ_T , δ , Ψ , KCU) in the cast state and after hot forging with deformation coefficients $\varepsilon = 40\%$ and $\varepsilon = 90\%$.

The macrostructure of ingots of secondary cast titanium is coarse-crystalline, dense, and homogeneous. The size of the cast grain corresponds to 9–10 points. The microstructure is typical for α -titanium alloys and consists of α -phase plates, which are assembled into bundles with a thickness of 15–20 μm and a length of 300–500 μm . With such structural components, the plasticity characteristics of cast secondary titanium turned out to be not very high ($\delta = 11.5\%$; $\Psi = 12.5\%$; KCU = 0.28 $\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$), and the increase in strength ($\sigma_B = 560 \text{ MPa}$ and $\sigma_T = 505 \text{ MPa}$) can be explained by the influence of oxygen and nitrogen.

During hot forging of experimental samples, it was established that secondary titanium is well amenable to pressure treatment, which also significantly grinds the structure. Thus, at deformation with a coefficient of $\varepsilon = 40\%$, a grain score of 5–6 was obtained, and with $\varepsilon = 90\%$, a score of 3–4 was obtained. The characteristics of plasticity are $\delta = 20\%$; $\psi = 31.5\%$; KCU = 0.45 $\text{kgf}\cdot\text{m}/(\text{cm})^2$ and $\delta = 24.5\%$; $\psi = 47.5\%$; KCU = 0.58 $\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ respectively. The strength of secondary hot-forged electroslag titanium is affected by the degree of deformation and the increased content of oxygen and nitrogen. At $\varepsilon = 40\%$ $\sigma_B = 625 \text{ MPa}$; $\sigma_T = 540 \text{ MPa}$, and at $\varepsilon = 90\%$ $\sigma_B = 700 \text{ MPa}$; $\sigma_T = 580 \text{ MPa}$.

Keywords: secondary titanium, electroslag technology, hot forging, microstructure, macrostructure, mechanical properties, grain size.

Стаття надійшла 06.10.2024р.

УДК 674.164.02-.621.791

doi.org/10.31498/2522-9990282024318363

Савонов Ю.М., Капустян О.Є., Паракневич Є.М., Єршов А.В.

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЕЛЕКТРОДНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ХРОМОНІКЕЛЕВИХ СТАЛЕЙ

Великою проблемою залишається отримання зварних з'єднань з нержавіючих сталей, які експлуатуються в агресивних середовищах різноманітних виробництв, з високими характеристиками і тривалим терміном роботи. Вимоги до зварних з'єднань: корозійна стійкість і достатні механічні показники. Проблема полягає в тому, що експлуатація зварного обладнання в агресивних середовищах викликає, по-перше: вибіркоче руйнування наплавленого металу зварних швів, а по-друге: вибіркоче розчинення однієї з фаз в структурі металу, так зване, структурно-вибіркоче руйнування. Відомо, що властивості наплавленого металу зварних швів залежать від кількості легувальних елементів. Ця необхідна кількість визначає структурний стан та механічні характеристики наплавленого металу. Існує велика кількість електродних матеріалів для виготовлення зварного обладнання з нержавіючих сталей, наведені довідкові дані їх механічних властивостей, але дані про корозійну поведінку цих зварних з'єднань або недостатні, або зовсім відсутні. Метою цієї роботи було зробити порівняльну оцінку основних електродних матеріалів, які можуть бути використані при виготовленні зварного технологічного обладнання, яке експлуатується в лужних середовищах. Для цього досліджували вплив хімічного складу на структурний стан та корозійну стійкість наплавленого металу зварних з'єднань. На першому етапі визначали