УДК 669.187 DOI: https://doi.org/10.37434/sem2023.01.04

СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ ЗЛИВКІВ, ОТРИМАНИХ З ВІДХОДІВ ЛИСТОВОЇ ОБРІЗІ ТИТАНУ ВТ1-0 ЕЛЕКТРОШЛАКОВИМ ПЕРЕПЛАВОМ У ВІДКРИТОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

Д.І. Білоник[1], О.Є. Капустян[1], І.А. Овчинникова[2], І.М. Білоник[1], Г.М. Лаптєва[1]

[1]Національний університет «Запорізька політехніка».
69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64. E-mail: aek@zntu.edu.ua
[2]Запорізький національний університет.
69600, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 66.

Проведено аналіз технологій, які дозволяють залучати відходи титана в плавильний процес при отриманні зливків. Показано, що для цього перспективною та економічно вигідною є схема, яка включає електрошлаковий переплав з попереднім виготовленням витратного електрода повністю з кондиційних відходів листової обрізі титану ВТ1-0. Досліджували структуру й властивості електрошлакових зливків титану перерізом 90×90 мм та діаметром 85 мм, отриманих з застосуванням електрошлакового переплаву у відкритому кристалізаторі з ковзаючим струмопідводом та захистом поверхні шлакової ванни аргоном. Хімічний склад електрошлакових зливків нелегованого титану практично не відрізняється від хімічного складу титану марки ВТ1-2, ВТ1-Л та цілого ряду марок нелегованого титану зарубіжних виробників, за винятком декілька підвищеного вмісту кисню та азоту. Ультразвуковий контроль зливків не виявив внутрішніх дефектів. Макроструктура, яку досліджували на поздовжніх та поперечних темплетах, крупнокристалічна, щільна, однорідна, дефекти технологічного походження відсутні. Кут нахилу стовпчастих кристалів до осі зливка 40…45°, розмір зерен — 1,8…2,5 мм. Мікроструктура — перетворені β-зерна розміром 140…175 мкм. Після відпалу (620 °С) механічні властивості електрошлакових зливків складали: *НВ* = 224; $\sigma_в$ = 590 МПа; $\sigma_{0,2}$ = 560 МПа; δ = 7,5 %; ψ = 13,5 %. Визначено технічні заходи для підвищення пластичності електрошлакового титану шляхом зменшення вмісту кисню і азоту в зливках та зменшення розміру литого зерна. Технологічні властивості електрошлакового титану (оброблюваність різанням та зварюваність) на рівні титану ВТ1-Л. Встановлена можливість обробки тиском (гаряче кування) з коефіцієнтами деформації 40 та 90 % титану електрошлакових зливків. Отримані напівфабрикати не мали внутрішніх та поверхневих дефектів. Бібліогр. 24, табл. 2, рис. 8.

Ключові слова: переробка; листова обрізь; титан; електронно-променеве плавлення; електрошлаковий процес; зливок; структура; хімічний склад; механічні властивості; технологічні властивості; гаряче кування

Вступ. Для розвитку сучасної електрометалургії з використанням вторинної сировини особливе значення набувають титанові відходи. Максимально повне і раціональне використання відходів — перспективний та пріоритетний шлях здешевлення титанової продукції, що, безперечно, зміцнить економічні позиції титанової промисловості. Залучення відходів титану та його сплавів у плавку для виробництва серійних титанових сплавів, фасонного лиття, феротитану та інших продуктів є найбільш раціональним та ефективним способом рециклінгу [1].

Незважаючи на додаткові витрати, зумовлені підготовкою відходів до плавки, що включають сортування, визначення хімічного складу та вмісту домішок, очищення від технологічних забруднень (змащувально-охолоджувальні рідини, масло, окислені в результаті термічного різання поверхні), кожні 10 % титанових відходів, додатково введені в шихту, знижуть її вартість на 5…8 %. Також при отриманні однієї тони зливка можна зекономити до 100 кг титанової губки та 5…10 кг легуючих елементів [2].

Основними способами плавки титану, які дозволяють залучати титанові відходи, є вакуумно-індукційна і вакуумно-гарнісажна плавки, електронно-променевий та електрошлаковий переплави. Вакуумно-індукційна плавка була розроблена О.О. Фогелем. Обладнання для цього процесу розроблялося в США (Retech Systems LLC) [3] та Німеччині (ALD Vacuum Technologies) [4]. В Україні ця технологія на даний час не застосовується.

В роботі [1] доведено, що найбільш ефективним агрегатом для плавки відходів титану та його сплавів є вакуумно-гарнісажна пічь, яка працює по технології гарнісаж–витратний електрод (ГВЕ). Найбільш важлива економічна перевага технології та печей ГВЕ — це суттєве зниження об'єму ро-

Д.І. Білоник — https://orcid.org/ 0000-0003-3274-0604, О.Є. Капустян — https://orcid.org/ 0000-0002-8979-8076,
І.А. Овчинникова — https://orcid.org/ 0000-0002-4035-129X, І.М. Білоник — https://orcid.org/ 0000-0002-3873-5307,
Г.М. Лаптєва — https://orcid.org/ 0000-0003-4475-2354

© Д.І. Білоник, О.Є. Капустян, І.А. Овчинникова, І.М. Білоник, Г.М. Лаптєва, 2023

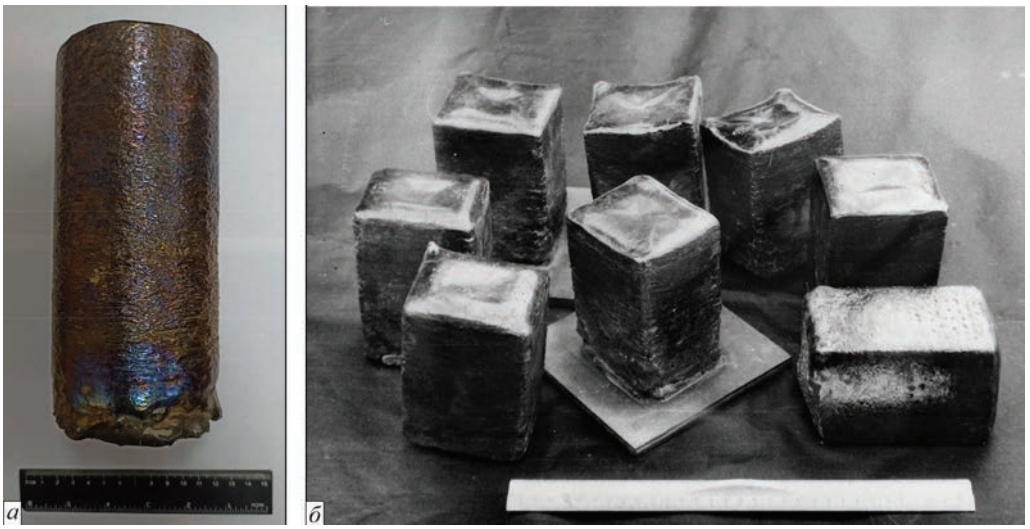

Рис. 1. Титанові напівфабрикати двох типорозмірів, мм: діаметром 85 (*а*), перерізом 90×90 (*б*)

біт по підготовці відходів титану до плавки. Технологія ГВЕ, яка залучає відходи титану, також забезпечує отримання витратних електродів для подальшого вакуумно-дугового переплаву (ВДП). Об'єднання технологій ГВЕ та ВДП замінює трикратний ВДП при виплавці зливків титанових сплавів Ti–10–2–3 і Ti–6Al–4V [1].

Завдяки інтенсивним науковим дослідженням в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України у розробці сучасного обладнання та технологій в галузі виробництва титанових зливків і слябів та іншої титанової продукції лідируюче положення зайняв процес електронно-променевої плавки [5–8]. Промислове впровадження та подальше вдосконалення технології електронно-променевої плавки титану здійснювалося на українських підприємствах: ДП «Науково-виробничий центр «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України», ТОВ «Міжнародна компанія «АНТАРЕС», ТОВ «ЗТМК», а також в Китаї, Німеччині, США та інших країнах. Технологічна гнучкість процесу електронно-променевої плавки дозволяє досить широко використовувати у виробництві титан різних марок, форми і розмірів, а також до 30…40 % низькосортної губки (ТГ-Тв, ТГ-оп). Наприклад, для одержання зливків нелегованого титану (СР-титану) марок ВТІ-0, Grad 2 розроблена технологія одноразової електронно-променевої плавки з проміжною ємністю. Також шихту можна доповнювати спеціально підготовленими відходами титану у вигляді стружки і донних частин слябів [9]. Це дає можливість ефективно знижувати собівартість продукції як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках.

У меншій мірі затребувана електрошлакова технологія, що зумовлено поки що не вирішеними деякими питаннями технічного та технологічного характеру отримання промислових титанових зливків. Хоча електрошлакову плавку та, особливо, камерний електрошлаковий процес успішно застосовують для виплавки зливків титану невеликої ваги при досить широких можливостях впливу на їх хімічний склад, структуру та властивості [10, 11].

Безумовно, як науковий, так і практичний інтерес представляє можливість залучення 100 % відходів листової обрізі титану при електрошлаковому переплаві. В роботі [12] обґрунтована доцільність та показана принципова можливість застосування електрошлакового процесу у відкритому кристалізаторі з ковзаючим струмопідводом для виплавлення титанових зливків з використанням витратних електродів, повністю виготовлених з кондиційних відходів листової обрізі титану ВТ1-0. Виплавлені титанові зливки перерізами 90×90 мм та діаметром 85 мм (рис. 1).

Подальший розвиток у цьому напрямку [12] полягав у визначенні якісних характеристик та технологічних властивостей даного матеріалу, до яких відносяться: хімічний склад, включаючи вміст газів; фізична однорідність (макроструктура), мікроструктура; стандартні механічні властивості. На підставі отриманих даних можливо дати рекомендації до виготовлення з електрошлакового титану конкретних виробів, а хімічний склад дозволить встановити перелік агресивних середовищ, у яких вироби з електрошлакового титану найбільш раціонально експлуатувати.

Слід також врахувати, що технологічна, економічна та в цілому можливість виготовлення виробів з електрошлакового титану визначається такими властивостями, як оброблюваність різанням, зварюваність та здатність титанових електрошлакових зливків до деформаційної обробки. Це потребує досліджень можливості застосування цих

процесів для виготовлення деталей та обладнання з електрошлакового титану.

Мета цієї роботи — визначити основні показники металургійної якості і технологічні властивості зливків титану, отриманих із застосуванням електрошлакового процесу у відкритому кристалізаторі з ковзаючим струмопідводом, захистом поверхні шлакової ванни аргоном та використанням витратних електродів, виготовлених цілком з кондиційних відходів листової обрізі титану ВТ1-0.

Матеріали і способи досліджень. Технологія, за якою були отримані титанові електрошлакові зливки (Ti — основа; C — 0,024 %; Fe — 0,06 %; Si — 0,05 %; O_2 — 0,25 %; N_2 — 0,058 %; H_2 — 0,0016 %), наведена в роботі [12].

В цій роботі досліджували якість зливків за наступними показниками: макро- і мікроструктура; механічні властивості; оброблюваність різанням та тиском; зварюваність.

Попередньо зливки були механічно оброблені на токарному верстаті на глибину 2,5 мм з метою зняття альфірованого шару (рис. 2, *а*) для подальшого ультразвукового контролю та дослідження оброблюваності тиском. Ультразвуковий контроль зливків виконували на ТОВ «ЗТМК» з використанням дефектоскопа УД4-Т і датчика 5К6.

Макроструктуру зливків досліджували на поздовжніх та поперечних темплетах після травлення розчином 20 % HF + 20 % HNO_3 + 60 % H_2O. Розмір литого зерна визначали лінійним методом січних А.А. Глаголєва [13]. Мікроструктуру виявляли тим самим реактивом на полірованих і травлених шліфах та досліджували на металографічному мікроскопі NEOPHOT-32 при збільшенні 300… 500 крат.

Механічні випробування литого електрошлакового металу [14] та зварного стикового з'єднання [15] виконували на комп'ютеризованій системі INSTRON–8862. Механічні властивості титанових електрошлакових зливків визначали після відпалу при температурі 620 °С. Отримані результати порівнювали з механічними властивостями, що наведені для технічного титану ВТ1-Л, а також α-сплавів ТЛ3 і ВТ5Л в роботі [16].

Оброблюваність різанням при точінні, свердлінні та нарізанні зовнішньої різьби оцінювали порівнянням при виготовленні технологічних проб з електрошлакових зливків титану та з титану ВТ1-Л. Виплавку зливків титану ВТ1-Л діаметром 80 мм для порівняльних характеристик оброблюваності різанням виконували способом вакуумно-дугового переплаву з невитратним електродом у вакуумно-дуговій гарнісажній печі [17]. Плавлення вели

Рис. 2. Зливок діаметром 85 мм зі знятим токарною обробкою альфірованим шаром (*а*) і виготовлені з цього зливка зразки для кування (*б*)

мідним водоохолоджуваним електродом із вольфрамовим наконечником у тиглі, який виготовлено з графіту марки МПГ-7. В якості вихідних шихтових матеріалів використовували відходи листових обрізків кондиційного титану ВТ1-0. Перед початком робіт надані матеріали попередньо механічно подрібнювали до фракції 5…15 мм.

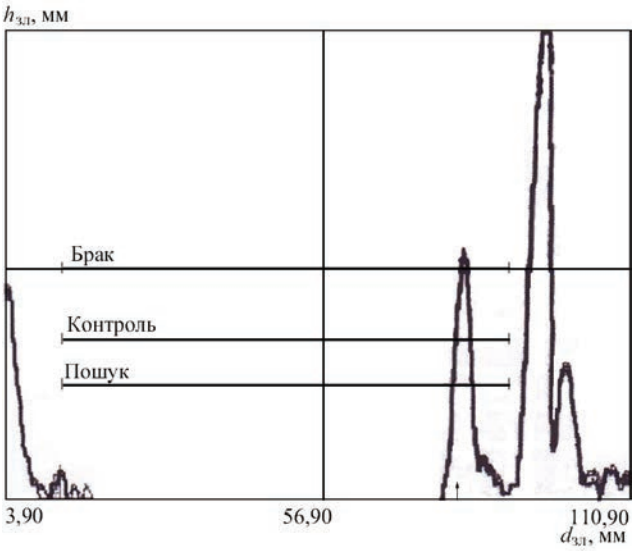

Рис. 3. Скан ультразвукового контролю: T_A = 27,6 мкс; y_A = = 86,2 мм

На технологічних пробах була передбачена чистова, напівчистова і чорнова обробки поверхні. Методики дослідження, обладнання, інструмент і режими різання обирали згідно рекомендацій [18, 19].

Точіння виконували різцями з твердосплавними пластинками зі сплаву ВК-8 з наступною геометрією: $\gamma = 0°$, $\alpha = 12°$, $\varphi = 14°$, $\varphi_1 = 45°$. Швидкість різання 30 м/хв, подача — 0,5 мм/об, глибина різання — 2,5 мм.

Свердління виконували свердлом діаметром 20 мм зі швидкорізальної сталі Р9Ф5 з наступною геометрією: $\gamma = 3°$, $\alpha = 12°$, $2\varphi = 120°$, $2\varphi_0 = 75°$, кут нахилу спіральної канавки 27°. Швидкість різання — 20 м/хв, подача — 0,1 мм/об.

Метричну різьбу нарізали різцями з твердосплавними пластинками зі сплаву ВК-8 зі швидкістю різання 25 м/хв.

Дослідження зварюваності виконували згідно рекомендацій [20] на зразках розміром 55×30×5 мм, виготовлених з електрошлакових зливків титану. Зразки зварювали встик двостороннім швом аргонодуговим зварюванням неплавким вольфрамовим електродом з титановою присадкою (дріт ВТ1-00 ГОСТ 27265–87) на режимах: струм — 110…130 А, напруга — 12…18 В, витрата аргону (клас А) — 12…16 л/хв. Механічні властивості зварного шва визначали за ГОСТ 6996–66, тип зразка XX IV. Отримані з'єднання були досліджені також на герметичність методом гасової проби за ГОСТ 3242–79. Одну із сторін покривали водною суспензією крейди та підсушували. Протилежну сторону змочували 2…3 рази гасом. Витримували протягом чотирьох годин.

Оброблюваність тиском виконували методом гарячого кування на ДП «УкрНДІспецсталь» на гідравлічному кувальному пресі зусиллям 2 МН. Для цього із одного зі зливків було виготовлено зразки (рис. 2, *б*), які піддавали різному ступеню деформації — 45 і 90 %. Технологія кування була прийнята як і для стандартних зливків титану ВТ1-0 [21] за наступним технологічним режимом:

підігрів бойків перед куванням, °С	200…220
нагрівання заготовок у печі до температури, °С	900…930
деформування заготовок за один прохід, %	20…22
температура закінчення кування не менш, °С	750
температура відпалу, °С	620…660
охолодження заготовок	на повітрі до температури навколишнього середовища

Результати досліджень та їх аналіз. Ультразвуковий контроль показав відсутність у зливках внутрішніх дефектів та крупних неметалевих включень. Зафіксовано наявність незначних за розміром усадочних раковин на верхніх торцях

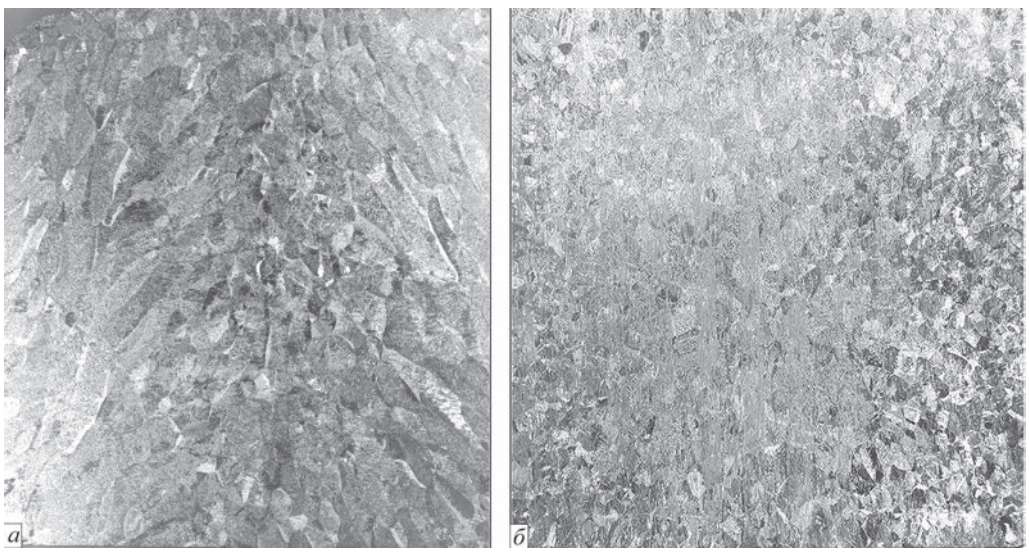

Рис. 4. Макроструктура електрошлакових зливків титану перерізом 90×90 мм: *а* — поздовжня, центр зливка; *б* — поперечна, 1/2 висоти зливка

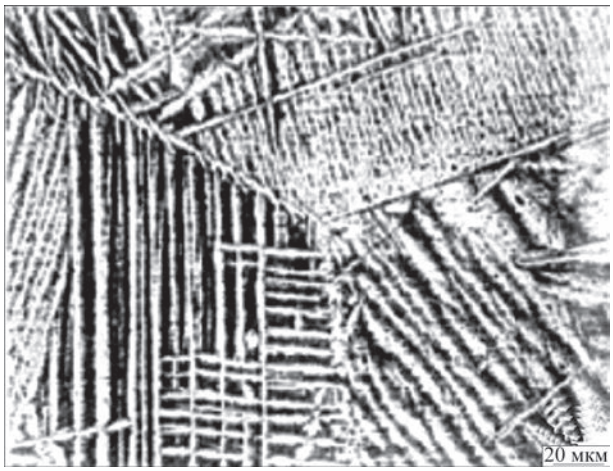

Рис. 5. Мікроструктура електрошлакового зливка титану

зливків (рис. 3), що обумовлено тим, що по закінченню плавок операцію усадки не виконували.

Макроструктура крупнокристалічна, щільна, однорідна, дефекти технологічного походження відсутні (рис. 4). Розмір литого зерна складав 1,8…2,5 мм. Кут нахилу стовпчастих кристалів до осі зливка — 40…45° (рис. 4, *а*), що характерно для електрошлакових зливків, отриманих на оптимальній швидкості наплавлення.

Мікроструктура (рис. 5) характерна для литого титану, тобто перетворені β-зерна розміром від 140 до 175 мкм складалися з α-пластин.

При дослідженні механічних властивостей електрошлакового титану встановлено, що характеристики міцності $\sigma_в$ та $\sigma_{0,2}$ вище у 1,7 та 1,8 раз відповідно, ніж у технічного титану ВТ1-Л (табл. 1). Але пластичністю електрошлаковий титан поступається. В α-сплавах ТЛ-3 та ВТ5-Л для підвищення міцності ($\sigma_в$ та $\sigma_{0,2}$) застосовують легування алюмінієм (4,1…6,2 %), але при цьому одночасно знижується їх пластичність (δ та ψ). Порівнюючи механічні властивості дослідного титану з механічними властивостями сплавів ТЛ-3 та ВТ5-Л можна зробити висновок, що їх різниця незначна.

Більш низькі характеристики пластичності дослідних зливків визначаються не тільки підвищеним вмістом кисню та азоту, а й крупнокристалічною будовою литого титану (рис. 4). Зменшити розмір литого зерна в зливках для наших умов можливо такими способами:

Рис. 6. Деталі з електрошлакового титану після механічної обробки різанням, ×0,5

скорегувати режим плавки (струм, напруга, швидкість наплавлення, кількість флюсу) для зменшення глибини металевої ванни та збільшення швидкості кристалізації;

модифікувати зливок бором, лантаном або ітрієм [22–24].

Також доцільно забезпечити більш ефективний захист від кисню і азоту повітря розігрітої частини витратного електрода та поверхні шлакової ванни. Застосування цих заходів поодинці чи в комплексі повинно значно підвищити показники пластичності литого електрошлакового титану.

При дослідженні технологічних властивостей встановлено, що електрошлаковий титан добре піддається механічній обробці різанням. Суттєвої різниці в оброблюваності різанням в порівнянні з титаном ВТ1-Л не виявлено. Про це свідчили як сам характер різання (дрібна кручена стружка), так і отримання необхідного класу шорсткості поверхні і конфігурації технологічних проб (рис. 6).

Таблиця 1. Механічні властивості литого електрошлакового титану, технічного титану ВТ1-Л і α-сплавів ТЛ-3, ВТ5-Л та кількість домішок в них

Сплав	Механічні властивості				Кількість домішок, %					
	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %	O_2	N_2	H_2	C	Fe	Si
Дослідний титан після відпалу	590	560	7,5	13,5	0,25	0,058	0,0016	0,12	0,28	0,10
ВТ1-Л* (технічний титан)	<343	<297	<10,0	<20,0	<0,20	<0,05	<0,015	<0,15	<0,30	<0,15
ТЛ-3* (Ti + 4,5 % Al)	<588	<539	<8	<16	<0,15	–»–	–»–	–»–	–»–	–»–
ВТ5-Л* (Ti + 6,2 % Al)	<586	<627	<6	<14	<0,20	–»–	–»–	<0,20	<0,35	<0,20
*За даними роботи [19].										

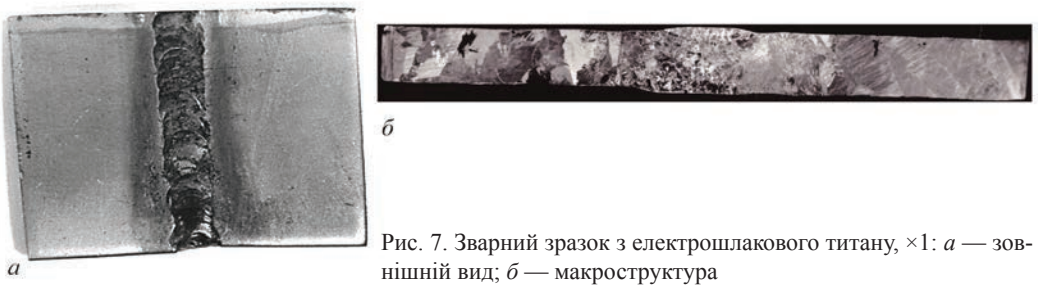

Рис. 7. Зварний зразок з електрошлакового титану, ×1: *а* — зовнішній вид; *б* — макроструктура

Таблиця 2. Механічні властивості зварного з'єднання литого електрошлакового титану

Зразок	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %	*HB*
Основний метал	590	560	7,5	13,5	224
Метал зварного шва	556	530	8,9	15,8	218

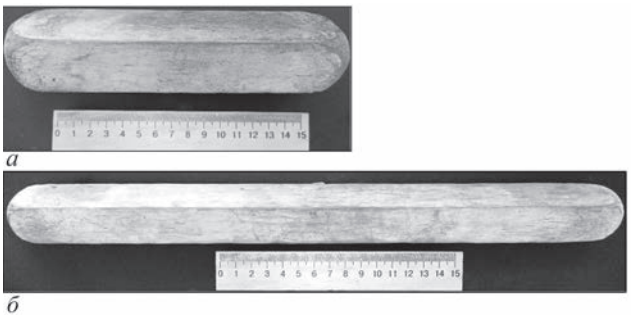

Рис. 8. Зовнішній вид деформованих титанових напівфабрикатів з різним ступенем деформації, %: *а* — 45; *б* — 90

Зовнішній вид зварного з'єднання зразків, отриманих з електрошлакових зливків, приведено на рис. 7, *а*.

Встановлено, що формування зварних швів та самого з'єднання відбувалося нормально, незважаючи на декілька підвищений вміст кисню і азоту в зразках, в зоні сплавлення пор не виявлено. При дослідженні макроструктури зварного з'єднання слід зазначити його структурну однорідність. Тобто, всьому з'єднанню притаманна структура литого титану (рис 7, *б*). Міцністні характеристики зварного шва декілька нижче, ніж основного металу (електрошлакового литого титану), а пластичність вище (табл. 2). Руйнування зварного з'єднання при дослідженні на статичне розтягнення відбувалося по зварному шву, що обумовлено більш високою чистотою присадного дроту у порівнянні з основним металом. Отже, при зварюванні литого технічного електрошлакового титану може бути отримано однорідне і рівноміцне з'єднання, якщо застосовувати леговані присадні дроти, наприклад ОТ4св або ОТ4-1св. Плями на крейдяному покритті не виступали, що свідчило про герметичність зварного шва. Це свідчить, що литий електрошлаковий титан може бути застосований в герметичних виробах.

Одним з основних видів обробки титану і титанових сплавів є обробка тиском. Різноманіття технологій та способів обробки тиском дозволяють отримувати широку номенклатуру титанових напівфабрикатів для потреб промисловості. Електрошлакові зливки титану мають декілька підвищений вміст кисню і азоту та низькі характеристики пластичності. Це може погіршувати деформаційну здатність литого електрошлакового титану, тому виникла необхідність її дослідити.

В процесі гарячого кування виготовлених зразків (рис. 2, *б*) не були виявлені технологічні труднощі, які б потребували спеціальних режимів та додаткових технологічних заходів. Отримані два напівфабрикати, зовнішній вид яких наведено на рис. 8. При зовнішньому огляді не виявлено поверхневих тріщин та інших дефектів поверхні. При УЗК деформованих напівфабрикатів також не було встановлено внутрішніх дефектів.

Таким чином, в ході проведених робіт по визначенню технологічних властивостей показано, що отриманий титан добре піддається деформаційній обробці (гарячому куванню), обробці різанням та має хорошу зварюваність.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку і застосування конструктивних та технологічних засобів поліпшення захисту титану від взаємодії з повітрям, удосконалення процесу плавки з метою підвищення пластичності титану, вивчення впливу гарячої деформації зливків на структуру та властивості отриманих титанових напівфабрикатів.

Висновки

1. При дослідженні структури отриманих зливків встановлено: макроструктура крупнокристалічна, щільна, однорідна, дефекти відсутні. Кут нахилу стовпчастих кристалів до осі зливка становив 40…45°, розмір зерен — 1,8…2,5 мм; мікроструктура — перетворені β-зерна розміром від 140 до 175 мкм, що складаються з α-пластин.

2. При порівнянні механічних властивостей титану електрошлакових зливків з аналогічними характеристиками найбільш поширених марок нелегованого литого титану було з'ясовано: характеристики міцності титану електрошлакових зливків ($\sigma_в$ = 610 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 580 МПа) вище на 70 %, ніж нелегованого титану ВТ1-Л; зниження пластичності в дослідному титані пояснюється підвищеним вмістом кисню і азоту, а також крупнокристалічною будовою; різниця в механічних властивостях електрошлакового титану і α-сплавів ТЛ-3 та ВТ5-Л незначна.

3. Дослідження технологічних властивостей титану електрошлакових зливків довели його гарну оброблюваність різанням і зварюваність.

4. Встановлена принципова можливість обробки тиском (гаряче кування) титану електрошлакового зливка діаметром 85 мм зі ступенями деформації 45 та 90 %.

Список літератури

1. Колобов Г.А. (2013) Рециклинг отходов титана и титановых сплавов. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні,* **1**, 138–140.
2. Гармата В.А., Петрунько А.Н., Галицкий Н.В., Олесов Ю.В. (1983) *Титан: свойства, сырьевая база, физико-химические основы и способы получения*. Москва, Металлургия.
3. https://www.retechsystemsllc.com
4. https://www.ald-vt.com
5. Патон Б.Е., Ахонин С.В., Березос В.А. (2018) Развитие технологий электронно-лучевой плавки металлов в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. *Современная электрометаллургия*, **4**, 19–35. DOI: http://dx.doi.org/10.15407/sem2018.04.01
6. Ахонин С.В., Кругленько М.П., Костенко В.И. (2010) Удаление тугоплавких включений из титана при электронно-лучевой плавке по механизму осаждения. *Там же*, **4**, 7–10.
7. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В. (2006) *Электронно-лучевая плавка титана*. Киев, Наукова думка.
8. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В. (2008) *Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокореакционных металлов*. Киев, Наукова думка.
9. Калинюк О.М., Дереча О.Я., Телін В.В. та ін. (2018) Особливості виробництва стрічкових литих заготовок марок ВТ1-0 та GRADE 2 з низькосортного губчастого титану. *Современная электрометаллургия*, **3**, 20–26. DOI: https://doi.org/10.15407/sem2018.03.03
10. Рябцев А.Д., Троянский А.А. (2001) Производство слитков титана, хрома и сплавов на их основе в камерных электрошлаковых печах под «активными» металлосодержащими флюсами. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **4**, 6–9.
11. Протоковилов И.В., Назарчук А.Т., Петров Д.А., Порохонько В.Б. (2018) Технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в электрошлаковых печах камерного типа. *Современная электрометаллургия*, **2**, 45–50. DOI: https://doi.org/10.15407/sem2018.02.06
12. Білоник Д.І., Овчинников О.В., Білоник І.М. та ін. (2022) Електрошлакова виплавка у відкритому кристалізаторі зливків з відходів листових обрізків титану ВТ1-0. *Сучасна електрометалургія*, **1**, 34–39.
13. Богомолова Н.А. (1978) *Практическая металлография*. Москва, Высшая школа.
14. (2019) ДСТУ ISO 6892-1:2019. *Металеві матеріали. Випробування на розтяг*. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури.
15. (1967) ГОСТ 6996–66. *Сварные соединения. Методы определения механических свойств*.
16. Бибиков Е.Л., Глазунов С.Г., Неуструев А.А. и др. (1983) *Титановые сплавы. Производство фасонных отливок из титановых сплавов*. Москва, Металлургия.
17. Овчинников О.В., Капустян О.Є. (2020) Технології виплавки зливків цирконієвого сплаву способом вакуумно-дугового переплаву з невитратним електродом у гарнісажній печі. *Сучасна електрометалургія*, **4**, 32–38. DOI: https://doi.org/10.37434/sem2020.04.06
18. Древаль А.Е., Скороходов Е.А., Агеев А.В. (2005) *Краткий справочник металлиста*. Москва, Машиностроение.
19. Глазунов С.Г., Важенин С.Ф., Зюков–Батырев Г.Л., Ратнер Я.Л. (1975) *Применение титана в народном хозяйстве*. Київ, Техніка.
20. Патон Б.Е. (1974) *Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением*. Москва, Машиностроение.
21. Никольский Л.А., Фиглин С.З., Бойцев В.В. (1975) *Горячая штамповка и прессование титановых сплавов*. Москва, Машиностроение.
22. Самсонов Г.В., Кащук В.А., Черкашин А.И. (1970) Влияние переходных металлов на размер зерна титана. *Металловедение и термическая обработка металлов*, **11**, 30–32.
23. Григоренко Г.М., Ахонин С.В., Лобода П.И. и др. (2016) Структура и свойства титанового сплава, легированного бором, полученного способом электронно-лучевого переплава. *Современная электрометаллургия*, **1**, 21–25. DOI: https://doi.org/10.15407/sem2016.01.03
24. Голтвянчук В.С., Баньковський О.Б., Цивірко Е.І. (2009) Модифікування бором литих титан-алюмінієвих сплавів. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, **1**, 86–88.

References

1. Kolobov, G.A. (2013) Recycling of titanium and titanium alloy wastes. *Novi Materialy i Tehnologii v Metalurgii ta Mashynobuduvanni,* **1**, 138–140 [in Russian].
2. Garmata, V.A., Petrunko, A.N., Galitsky, N.V., Olesov, Yu.V. (1983) *Titanium: Properties, raw materials, physical and chemical bases and methods for the preparation.* Moscow, Metallurgiya [in Russian].
3. https://www.retechsystemsllc.com
4. https://www.ald-vt.com
5. Paton, B.E., Akhonin, S.V., Berezos, V.A. (2018) Development of technologies of electron beam melting of metals at the E.O. Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine. *Sovrem. Elektrometal.,* **4**, 19–35 [in Russian]. DOI: http://dx.doi.org/10.15407/sem2018.04.01
6. Akhonin, S.V., Kruglenko, M.P., Kostenko, V.I. (2010) Removal of refractory inclusions from titanium in electron beam melting by the precipitation mechanism. *Advances in Electrometallurgy,* **4**, 232–236.
7. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V., Zhuk, G.V. (2006) *Electron beam melting of titanium*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
8. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V. (2008) *Electron beam melting of refractory and high-reactive metals*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].

9. Kalinyuk, A.N., Derecha, O.Ya., Telin, V.V. et al. (2018) Peculiarities of production of slab-type cast billets of VT1-0 and GRADE 2 types of low-grade spongy titanium. *Sovrem. Elektrometal.,* **3**, 20–26 [in Russian]. DOI: https://doi.org/10.15407/sem2018.03.03
10. Ryabtsev, A.D., Troyansky, A.A. (2001) Production of ingots of titanium, chromium and alloys on their base in chamber electroslag furnaces using “active” metal containing fluxes. *Problemy Spets. Elektrometallurgii***, 4**, 6–9 [in Russian].
11. Protokovilov, I.V., Nazarchuk, A.T., Petrov, D.A., Porokhonko, V.B. (2018) Technological and metallurgical peculiarities of melting the titanium alloy ingots in chamber-type electroslag furnaces. *Sovrem. Elektrometal.,* **2**, 45–50 [in Russian]. DOI: https://doi.org/10.15407/sem2018.02.06
12. Bilonik, D.I., Ovchynnykov, O.V., Bilonik, I.M. et al. (2022) Electroslag melting in an open mould of ingots from sheet scrap wastes of titanium VT1-0. *Suchasna Elektrometal.,* **1**, 34–39 [in Ukrainian].
13. Bogomolova, N.A. (1978) *Practical metallography.* Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
14. (2019) DSTU ISO 6892-1:2019. *Metallic materials. Tensile testing.* Pt 1. Method of test at room temperature [in Ukrainian].
15. (1967) GOST 6996–66. *Welded joints. Methods of determination of mechanical properties* [in Russian].
16. Bibikov, E.L., Glazunov, S.G., Neustruyev, A.A. et al. (1983) *Titanium alloys. Production of shaped castings from titanium alloys.* Moscow, Metallurgiya [in Russian].
17. Ovchynnykov, O.V., Kapustian, O.E. (2020) Technology for smelting zirconium alloy ingots by vacuum arc remelting with a non-consumable electrode in a skull furnace. *Suchasna Elektrometal.,* **4**, 32–38 [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.37434/sem2020.04.06
18. Dreval, A.E., Skorokhodov, E.A., Ageev, A.V. (2005) *Guick reference guide of metalworker.* Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
19. Glazunov, S.G., Vazhenin, S.F., Zyukov-Batyrev, G.L., Ratner, Ya.L. (1975) *Application of titanium in national economy.* Kyiv, Tekhnika [in Russian].
20. Paton, B.E. (1974) *Technology of fusion electric welding of metals and alloys.* Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
21. Nikolsky, L.A., Figlin, S.Z., Bojtsev, V.V. (1975) *Hot stamping and pressing of titanium alloys.* Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
22. Samsonov, G.V., Kashchuk, V.A., Cherkashin, A.I. (1970) Effect of transition metals on the grain size of titanium. *Metallovedenie i Termich. Obrabotka Metallov*, **11**, 30–32 [in Russian].
23. Grigorenko, G.M., Akhonin, S.V., Loboda, P.I. et al. (2016) Structure and properties of titanium alloy doped with boron, produced by the method of electron beam remelting. *Sovrem. Elektrometal.,* **1**, 21–25 [in Russian]. DOI: https://doi.org/10.15407/sem2016.01.03
24. Goltvyanchuk, V.S., Bankovskyi, O.B., Tsyvirko, E.I. (2009) Modifying titanium-aluminium cast alloys by boron. *Novi Materialy i Tehnologii v Metalurgii ta Mashynobuduvanni*, **1**, 86–88 [in Ukrainian].

STRUCTURE AND PROPERTIES OF INGOTS PRODUCED FROM SHEET CUTTINGS OF VT-1 TITANIUM BY ELECTROSLAG REMELTING IN AN OPEN MOULD

D.I. Bilonyk[1], O.Ye. Kapustyan[1], I.A. Ovchynnykova[2], I.M. Bilonyk[1], G.M. Lapteva[1]
[1]National University «Zaporizka politekhnika».
64 Zhukovskogo Str., 69063, Zaporizhzhya, Ukraine. E-mail: aek@zntu.edu.ua
[2]Zaporizhzhya National University.
66 Zhukovskogo Str., 69600, Zaporizhzhya, Ukraine.

Analysis of technologies, allowing titanium wastes to be used in the melting process in ingot production, was performed. It is shown that for this purpose a promising and cost-effective schematic is the one which includes electroslag remelting with preliminary manufacture of a consumable electrode completely from standard wastes of sheet cuttings of VT1-0 titanium. The structure and properties of electroslag ingots of titanium of 90×90 mm cross-section and 85 mm diameter was studied. The ingots were produced with application of electroslag remelting in an open mould with sliding current conduit and the slag pool surface protection by argon. Chemical composition of electroslag ingots of unalloyed titanium practically does not differ from that of titanium of VT1-2, VT1-L grades, and a whole range of grades of unalloyed titanium from foreign manufacturers, except for a somewhat higher content of oxygen and nitrogen. Ultrasonic testing of the ingots did not reveal any internal defects. Macrostructure, which was studied on longitudinal and transverse templates, is coarse-crystalline, dense, and homogeneous without any defects of technological origin. The angle of inclination of the columnar crystallites to the ingot axis is 40…45°, grain size is 1.8…2.5 mm. The microstructure consists of transformed β-grains of 140…175 μm size. After annealing (620 °C) the mechanical properties of electroslag ingots were as follows: *HB* = 224; σ_t = 590 MPa; $\sigma_{0.2}$ = 560 MPa; δ = 7.5 %; ψ = 13.5 %. Technical measures were determined to improve the ductility of electroslag titanium by reducing the content of oxygen and nitrogen in the ingots, and refining the cast grain size. Technological properties of electroslag titanium (cuttability and weldability) are on the level of VT1-L. The possibility of pressure treatment (hot forging) was established with deformation coefficients of 40 and 90 % of titanium from electroslag ingots. The obtained semi-finished products did not have any internal or surface defects. Ref. 24, Tabl. 2, Fig. 8.

Key words: processing; sheet cuttings; titanium; electron beam meting; electroslag process; ingot; structure; chemical composition; mechanical properties; technological properties; hot forging

Надійшла до редакції 26.12.2022