

РОЗПОДІЛ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО НАГРІВУ У КРИСТАЛІЗАТОРІ ПРИ ВИПЛАВЦІ ЗЛИВКІВ-СЛЯБІВ МЕТОДОМ ЕПП

В.О. Березос, С.В. Ахонін, О.Г. Єрохін, Є.І. Ліпчанчук, Ю.Т. Ішук

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11

РЕФЕРАТ

Виплавка титанових слябів прямокутного перерізу методом електронно-променевої плавки з проміжною ємністю є високоефективною альтернативою традиційному вакуумно-дуговому перепау. Вона повністю виключає капіталомістку стадію гарячого ковальського переділу та підвищує коефіцієнт використання металу з 0,65 до 0,90. Проте прямокутна геометрія кристалізатора створює зону двовимірної відведення тепла у водоохолоджувані мідні стінки. За даними моделювання, локальний тепловий потік у кутових зонах в 1,4...1,7 рази вищий, ніж на плоских ділянках периметра. Термічне переохолодження меніска загрожує появою ливарних дефектів: заворотів скоринки гарнісажу, глибоких гофр та діагональних несплавлень. Для компенсації крайових ефектів проведено комплекс робіт з обґрунтування та оптимізації параметрів просторово-часового сканування периферійного електронного пучка при виплавці слябів сплаву Ti–6Al–4V. Показано, що введення технологічної затримки тривалістю 0,5 с у кутових координатах траєкторії є оптимальним компромісом. За потужності пучка 54 кВт питома пікова щільність становить 5,48 кВт/см². Цей режим забезпечує усереднену щільність потужності в кутку на рівні 0,82 кВт/см². Експериментальною перевіркою підтверджено формування рівних кутів слябів повністю вільних від дефектів ливарного походження, заворотів скоринки, несплавлень та гофр. Бібліогр. 16, табл. 2, рис. 13.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: електронно-променева плавка, проміжна ємність, сляб, титановий сплав, потужність, технологічні режими

ВСТУП

У традиційній металургії титану базовим методом є вакуумно-дугова плавка (ВДП). Проте технологія ВДП фізично здатна формувати зливки тільки круглого перерізу [1, 2].

Традиційно листові напівфабрикати з титану і його сплавів виробляють шляхом виплавки зливків круглого перерізу методом ВДП, їх перековку на квадрат та наступної прокатки в плиту або лист [3, 4].

В Україні відсутні печі ВДП, тому металургійна переробка титану базується на технології електронно-променевої плавки з проміжною ємністю (ЕПП) [5]. Технологія ЕПП має ряд переваг перед традиційною технологією ВДП, однією з яких є можливість одержувати зливки прямокутного перерізу [6, 7]. Виробництво титанових зливків-слябів прямокутного перерізу методом ЕПП має колосальні економічні та технологічні переваги порівняно з традиційним ВДП [8].

Для виготовлення листових напівфабрикатів з титанових сплавів доцільніше виплавляти зливки-сляби прямокутного перерізу, що дозволяє усунути енергозатратну стадію проміжного перековування зливка круглого перерізу для подальшої прокатки у плиту або лист [9]. Перехід до прямо-

кутних слябів за допомогою ЕПП докорінно змінює всю виробничу схему — від підготовки шихти до отримання готового листового прокату [10].

Оскільки дуговий перепад дає круглий зливков, для отримання плоского листа або плити його необхідно відправити на потужний ковальський прес або блюмінг. Заготовку багаторазово нагрівають у газових печах до температур понад 1000 °C і деформують (кують), перетворюючи круглий переріз на прямокутний. Це призводить до колосальних витрат енергії та утворення товстого шару окалини, який потім повністю обточують (рис. 1).

Електронно-променева технологія одержання зливків-слябів дозволяє формувати прямокутний зливков безпосередньо з рідкої фази у кристалізаторі [11]. Отриманий сляб після мінімального поверхневого обточування відразу готовий до завантаження у прокатний стан для отримання титанових плит та листів. Виключення ковальського переділу знижує собівартість кінцевого прокату на 20...30 %.

Через геометричну відповідність форми сляба формі кінцевого плоского прокату ЕПП забезпечує значне заощадження дорогого титану: при куванні круглого зливка у прямокутну заготовку неминуче виникають великі відходи: обрізь, вигорання металу в печі за багаторазових нагрівів та глибоке обточування тріщин. Коефіцієнт використання металу (КВМ) у ланцюжку ВДП-кування

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

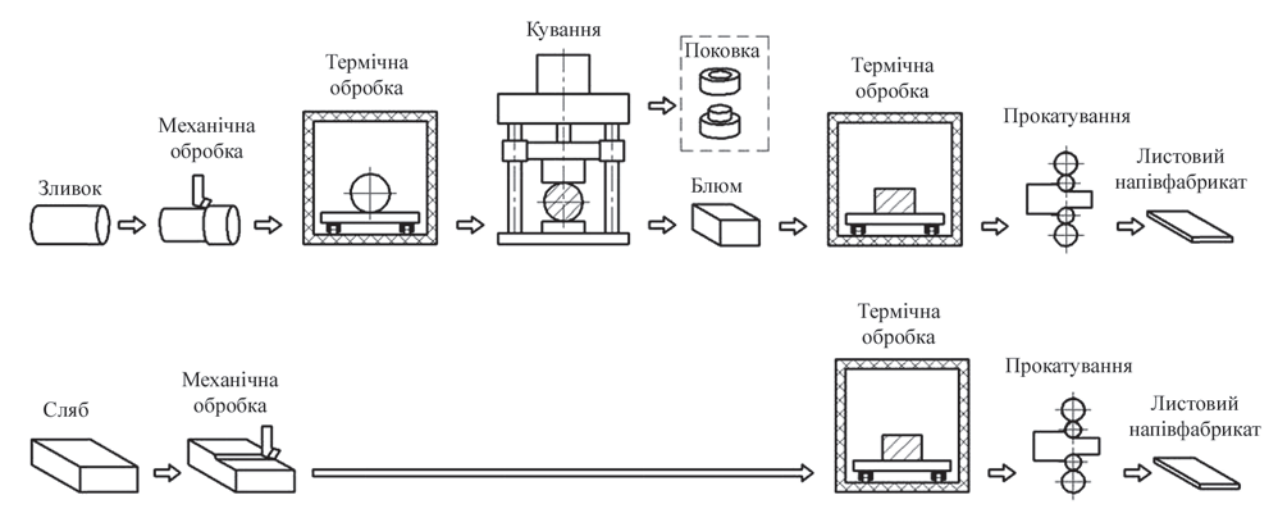


Рис. 1. Схема технологічних переходів для отримання листового прокату

рідко перевищує 0,65...0,70 [4]; при безпосередньому виплавленні сляба методом ЕПП відходиться до мінімуму. Якісний підігрів периферії забезпечує задовільну литу поверхню зливка, що потребує лише поверхневої механічної обробки на глибину 4...7 мм. КВМ зростає до 0,85...0,92.

Окрім того, за кристалізації великих круглих зливків ВДП, через великий об’єм рідкої ванни, виникає небезпечна зональна ліквіація легуючих елементів та домішок [12].

Технологія ЕПП дозволяє усунути ці негативні явища завдяки тому, що у кристалізаторі прямокутного перерізу глибина рідкої ванни є невеликою (охолодження через вузьку сторону відбувається дуже інтенсивно), а завдяки керованому розподілу енергії нагріву (периферійний прогрів + центральний растр) забезпечується плоский неглибокий фронт кристалізації [13]. Це повністю усуває макроліквіацію за легуючими елементами, забезпечуючи високу однорідність механічних властивостей по всьому перерізу майбутнього сляба.

Але зміна форми перерізу одержуваного зливка тягне за собою суттєві зміни в технологічних режимах ведення процесу плавки. Тому технологія ЕПП зливків-слябів сплавів титану потребує додаткових досліджень з точки зору особливостей

формування поверхні, структури та розподілу легуючих елементів по перерізу зливка-сляба.

Так під час виплавки зливків прямокутного перерізу постає складне теплофізичне завдання забезпечення рівномірного термічного поля по всьому периметру кристалізатора.

Геометрія прямокутного сляба накладає жорсткі обмеження на розподіл потужності, що вводиться. На відміну від круглих зливків, кутові зони прямокутного водоохолоджуваного кристалізатора піддаються двовимірному (двокоординатному) відведенню тепла в мідні стінки. Без спеціалізованого компенсуючого нагріву це неминує призводить до локального переохолодження розплаву в кутах, передчасного намерзання кірок, виникнення дефектів поверхні (гофр, несплавлень) та порушення макроструктури зливка.

Актуальність проблеми керування термічними градієнтами та розподілом потужності при ЕПП зливків прямокутного перерізу сплавів титану зумовлена суворими вимогами до якості та надійності матеріалів.

У класичній металургії круглих зливків відведення тепла у водоохолоджувану мідну стінку є радіально симетричним. Прямокутна геометрія сляба порушує цю симетрію.

Таблиця 1. Порівняльна таблиця технологій

Показник	Традиційний метод: ВДП + кування	Оптимізований метод: ЕПП (сляб)
Форма первинного зливка	Тільки кругла (циліндр)	Прямокутна (сляб)
Енерговитрати на деформацію	Високі (багаторазовий нагрів під прес)	Відсутні (пряма прокатка сляба)
Можливість використання стружки	Обмежена (потребує пресування в електрод)	До 100 % у сипкому вигляді
Коефіцієнт використання металу (КВМ)	0,65...0,70	0,85...0,92
Ризик появи тугоплавких включень (НДІ)	Високий (переходять з електроду в зливок)	Повністю відсутній (рафінування в проміжній ємності)

Двовимірний тепловідвід. На прямих ділянках тепло йде лінійно (в одному напрямку). У кутах розплав віддає тепло одночасно у дві перпендикулярні мідні стінки.

Дефіцит енергії. Без додаткового компенсуючого нагріву кутові зони охолоджуються у 1,4...1,7 рази швидше, ніж плоскі ділянки периметра.

Наслідки переохолодження. Це призводить до надмірного розростання твердого гарнісажу в кутах, деформації меніска рідкого металу, «завороту» скоринки та утворення глибоких гофр на поверхні зливка. У гірших випадках виникають несплавлення (непровари), які вимагають глибокої механічної обробки сляба, що переводить до 10...15 % дорогого титанового сплаву в стружку.

Тому оптимізація параметрів сканування електронного променя у кристалізаторі та вирішення проблеми кутового ефекту без перегріву розплаву дозволяє збільшити вихід придатного металу на 8...12 % за рахунок ідеальної геометрії та якості поверхні сляба та забезпечити сувору хімічну однорідність за легуючими (зокрема алюмінієм) по всьому перерізу.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України були проведені роботи з обґрунтування оптимізованого режиму двопробеневого нагріву зливка-сляба перерізом 600×170 мм з технологічною затримкою периферійного пучка в кутах тривалістю 0,5 с.

ВИХІДНІ ДАНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ БУЛИ НАСТУПНІ

Переріз сляба — 600×170 мм; матеріал — титановий сплав ВТ6 ($\rho \approx 4430 \text{ кг/м}^3$); продуктивність — 250 кг/год; висота порції — 5 мм;

контур 1 (периферійний): струм променя $I = 2 \text{ А}$, прискорювальна напруга $U = 27 \text{ кВ}$; швидкість руху променя по прямих ділянках $v = 1 \text{ м/с}$; захід ефективного краю пучка на мідь 3 мм;

контур 2 (центральный): струм променя $I = 2 \text{ А}$, напруга $U = 27 \text{ кВ}$, рівномірна растрова розгортка по дзеркалу ванни;

діаметр плями пучка D : 40 мм (ефективний радіус нагріву $R_n = 20 \text{ мм}$; затримка в кутах кристалізатора t_3 : 0,5 с.

КІНЕМАТИКА ТА ЧАСОВИЙ ЦИКЛ СКАНУВАННЯ

Периметр кристалізатора становить:

$$L = 2 \times (600 + 170) = 1540 \text{ мм} = 1,54 \text{ м.}$$

За швидкості променя $v = 1,0 \text{ м/с}$ час чистого руху по контуру становить 1,54 с. Сумарний час затримки в 4-х кутах: $4 \times 0,5 \text{ с} = 2,0 \text{ с}$.

Повний період одного обходу периферійного пучка становить:

$$t_{\text{цикл}} = 1,54 + 2,0 = 3,54 \text{ с.}$$

За продуктивності плавки 250 кг/год швидкість вертикального витягування сляба становить 9,22 мм/хв (0,154 мм/с). Порція металу висотою 5 мм наплавляється за $\Delta t = 32,5 \text{ с}$. За час формування однієї порції периферійний промінь здійснює рівно 9,18 повних циклів обходу, що гарантує високу квазістаціонарність підведення тепла.

МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ГАУССОВОГО РОЗПОДІЛУ ПОТУЖНОСТІ

Для одиночного електронного пучка локальна щільність теплового потоку $q(r)$ описується двовимірним законом Гауса. Середньоквадратичне відхилення σ розраховується з умови падіння потужності до $\approx 20 \%$ на межі ефективного радіуса $R_n = 2 \text{ см}$:

$$\sigma = \frac{R_n}{3} = 1,155 \text{ см.}$$

Приймаючи ефективний коефіцієнт корисної дії введення енергії електронів у титан $\eta \approx 0,85$, корисна теплова потужність кожного пучка становить:

$$P_{\text{эф}} = I \times U \times \eta = 2 \text{ А} \times 27 \text{ кВ} \times 0,85 = 45,9 \text{ кВт.}$$

Пікова щільність теплового потоку на осі нерухомого пучка:

$$q_{\text{max}} = \frac{P_{\text{эф}}}{2\pi\sigma^2} = \frac{45900}{2 \times 3,14 \times 1,155^2} = 5,48 \text{ кВт/см}^2.$$

Графік розподілу щільності теплового потоку для периферійного пучка потужністю 54 кВт (з урахуванням ефективного вводу енергії в метал 45,9 кВт) показано на рис. 2.

Шляхом інтегрування рухомого Гауссового джерела тепла та ділянок його фіксованої затримки отримано модифіковану карту усередненої за цикл щільності потужності (рис. 3). Локальний часовий розподіл показує, що в кутових зонах середня щільність теплового потоку становить

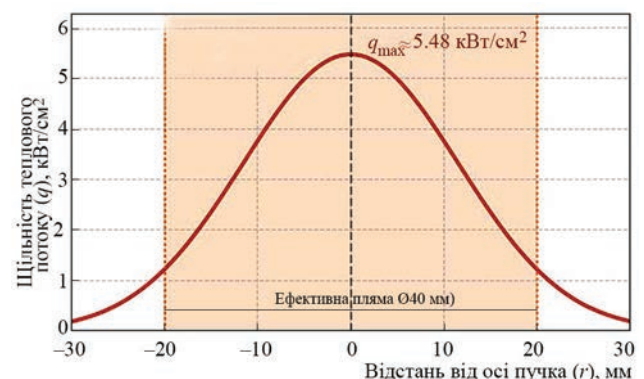


Рис. 2. Гаусів розподіл потужності периферійного пучка

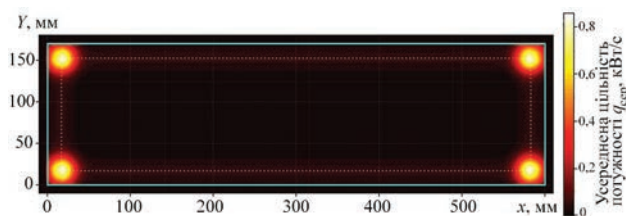


Рис. 3. Розподіл усередненої щільності потужності за цикл сканування, кВт/см²

0,82 кВт/см², тоді як на лінійних ділянках вона стабілізується на позначці 0,045 кВт/см², що забезпечує точкове фокусування енергії у зоні максимальних теплофізичних втрат прямокутного кристалізатора.

Оскільки пучок заходить краєм на мідну стінку кристалізатора на 3 мм координата центра пучка зміщена всередину ванни розплаву на відстань:

$$\delta_{\text{зм}} = R_{\text{н}} - 3 \text{ мм} = 17 \text{ мм від стінок.}$$

Даний режим є технологічно виправданим. Частковий захід пучка на водоохолоджуваний торець кристалізатора гарантує, що рідкий титан на самому меніску (стику з міддю) гарантовано розплавлений. Це виключає завороти скоринки гарнісажу та запобігає утворенню поверхневих дефектів (гофр, напливів) на слябі.

У момент півсекундної зупинки в кутовій точці кристалізатора тепловий потік на відстані 17 мм від центра (тобто точно на кромці мідної стінки) становить близько 2,5 % від пікового — порядку 0,14 кВт/см². Це забезпечує м'який прогрів мідної стінки без ризику її локального пропалювання.

РОЗРАХУНОК ІНТЕГРАЛЬНОГО БАЛАНСУ ТЕПЛА В КРИСТАЛІЗАТОРІ

Для кристалізатора ЕПП сумарний баланс теплової енергії формується з приходу енергії від двох незалежних електронно-променевих гармат та її подальшої витрати через канали теплопровідно-



Рис. 4. Інтегральний баланс витрат тепла у прямокутному кристалізаторі

сті, випромінювання та випаровування (тепло, що надходить із проміжної ємності з рідким металом не враховуємо).

Повна електрична потужність системи у цьому випадку:

$$P_{\Sigma} = P_1 + P_2 = 54,0 + 54,0 = 108,0 \text{ кВт.}$$

Ефективна теплова потужність, що вводиться в розплав (з урахуванням відбиття електронів $\eta = 0,85$):

$$P_{\text{еф.сумм}} = 91,8 \text{ кВт.}$$

У режимі із затримкою 0,5 с тепловий баланс периферійного променя розділяється математично на два етапи:

енергія затримки в кутах $E_{\text{кут}}$:

$$E_{\text{кут}} = 4 \text{ кути} \times 45,9 \text{ кВт} \times 0,5 \text{ с} = 91,8 \text{ кДж};$$

енергія лінійного сканування $E_{\text{рух}}$:

$$E_{\text{рух}} = 45,9 \text{ кВт} \times 1,54 \text{ с} = 70,69 \text{ кДж.}$$

Частка енергії, що цілеспрямовано виділяється в кутових зонах під час затримки 0,5 с, становить 56,5 % від загального балансу периферійного нагріву. Спираючись на данні раніше проведених досліджень [14] та додатково проведені розрахунки було одержано графік інтегрального балансу витрат тепла в кристалізаторі прямокутної форми (рис. 4).

Для проведення плавок зливків модельного сплаву титану Ti-6Al-4V використовувалася промислова електронно-променева установка УЕ-5812 (рис. 5) оснащена проміжною ємністю [15, 16].

Застосування проміжної ємності (рис. 6, 7) дозволяє не тільки провести очищення від шкідливих домішок і включень різної щільності, а й отримати зливки з однорідним хімічним складом і якісною структурою.

В процесі плавки застосовується кристалізатор прямокутного перерізу (рис. 8). А в якості шихто-



Рис. 5. Зовнішній вигляд промислової електронно-променевої установки УЕ-5812

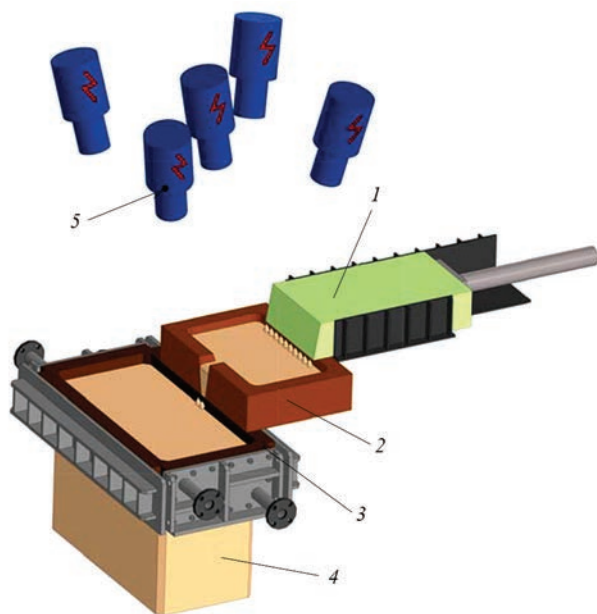


Рис. 6. Схема ЕПП з проміжною ємністю: 1 — витратна заготовка; 2 — проміжна ємність; 3 — кристалізатор; 4 — зливко-сляб; 5 — електронно-променеві гармати

вої заготовки — обрізь титану марки Ti-6Al-4V (рис. 9).

Чисельні значення технологічних параметрів плавки, що використовувалися при виплавці зливка-сляба сплаву титану Ti-6Al-4V наведено нижче:

Технологічний параметр, мм	170×600
Швидкість плавки, кг/год	250
Висота порцій, мм	5
Потужність в кристалізаторі, кВт	108
Потужність в проміжній ємності, кВт	390

Нагрівання розплаву металу згідно розрахунків проводилося двома електронними променями. Перший промінь потужністю 54 кВт проходить по всій поверхні ванни розплаву, другий промінь потужністю 54 кВт переміщується по периметру ванни із затримкою у кутах кристалізатора (рис. 10).

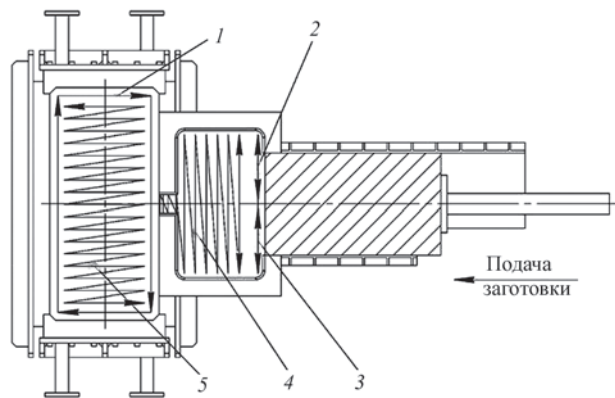


Рис. 7. Схема розташування та розгортки променів для плавки зливок сплавів титану: 1–5 траєкторії розгортки відповідних електронно-променевих гармат

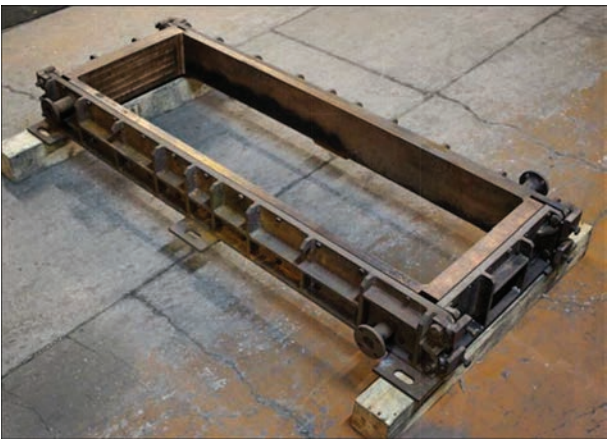


Рис. 8. Загальний вигляд кристалізатора прямокутного перерізу

В результаті дослідних плавок було отримано зливко-сляб перерізом 170 × 600 мм титанового сплаву Ti-6Al-4V (рис. 11). З метою визначення глибини залягання усадкової раковини усадку в кінці плавки не проводили.

Виготовлення повздовжнього темплету зі зливка-сляба перетином 170×600 мм сплаву титану Ti-6Al-4V показало, що усадкова раковина сконцентрована у головній частині зливка на глибині до 40 мм від поверхні (рис. 12). Даний факт свідчить про те, що при обраних режимах формується дрібна рідка ванна.

Макроструктура зливка-сляба перерізом 170×600 мм модельного сплаву титану Ti-6Al-4V, отриманого методом ЕПП, вивчалася на цьому ж повздовжньому темплеті. Виявлення структури проводилося травленням темплету в 15%-ому роз-



Рис. 9. Шихтова заготовка для виплавки зливка-слябу сплаву Ti-6Al-4V

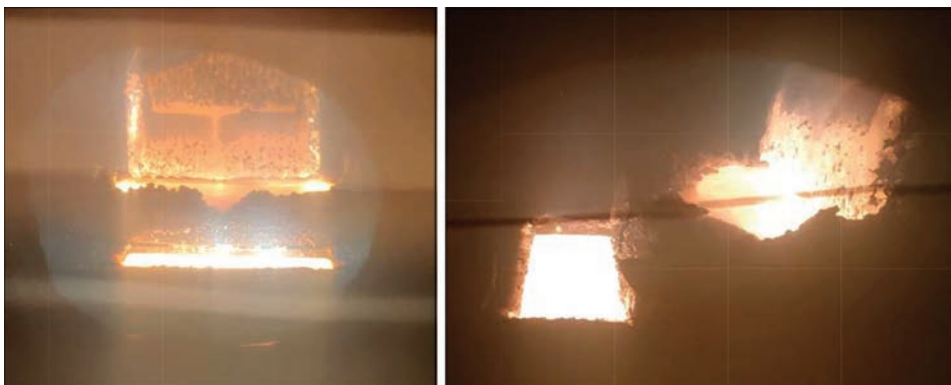


Рис. 10. Процес ЕПП зливка-сляба перерізом 170×600 мм титанового сплаву Ti-6Al-4V



Рис. 11. Зливко-сляб перерізом 170×600 мм сплаву титану Ti-6Al-4V

чині фтористої кислоти з додаванням 3%-ної азотної кислоти при кімнатній температурі.

Структура металу зливка (рис. 12) щільна, однорідна, з відсутністю зон, що по різному травляться по перерізу зливка. Істотної різниці в структурі центральної зони зливка і периферійної зони не спостерігається. Кристалічна будова металу однакова по всій довжині зливка і характеризується кристалами, формою близькими до рівноосних. Ділянки стовпчастої структури відсутні. Харак-

терною для зливків ВДП сегрегації легуючих елементів не виявлено.

Візуальний аналіз поверхні зливка-сляба перерізом 170 × 600 мм модельного сплаву титану Ti-6Al-4V, отриманого методом ЕПП, показали, що в процесі електронно-променевої плавки формуються рівні кутові зони, повністю вільні від дефектів ливарного походження (рис. 13).

У досліджених зразках не виявлено таких поширених для прямокутної геометрії дефектів, як завороти скоринки, несплавлення меніска розплаву з гарнісажем або глибокі гофри. Поверхня слябів у кутах характеризується високою щільністю та геометричною однорідністю.

Отримані результати експериментально підтверджують, що обрані теплофізичні параметри процесу, зокрема, траєкторія руху периферійного променя із заходженням на мідний торець на 3 мм та введення строго дозованої технологічної затримки в кутах тривалістю 0,5 с є оптимальними. Це свідчить про повну компенсацію двовимірного відведення тепла в мідну гільзу кристалізатора та правильність розрахованих технологічних режимів.

Для оцінки якості металу отриманих зливків-слябів проводилося дослідження хімічного складу зразків, відібраних по довжині та перетину. Результати аналізу хімічного складу металу отриманого зливка-сляба (табл. 3) показали, що розпо-

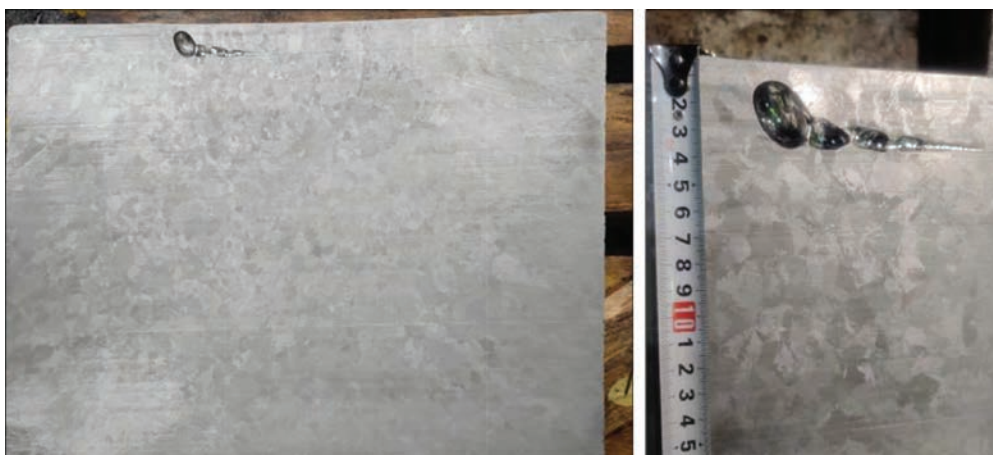


Рис. 12. Макротемплет зливка-сляба перетином 170×600 мм модельного сплаву титану Ti-6Al-4V, отриманого методом ЕПП

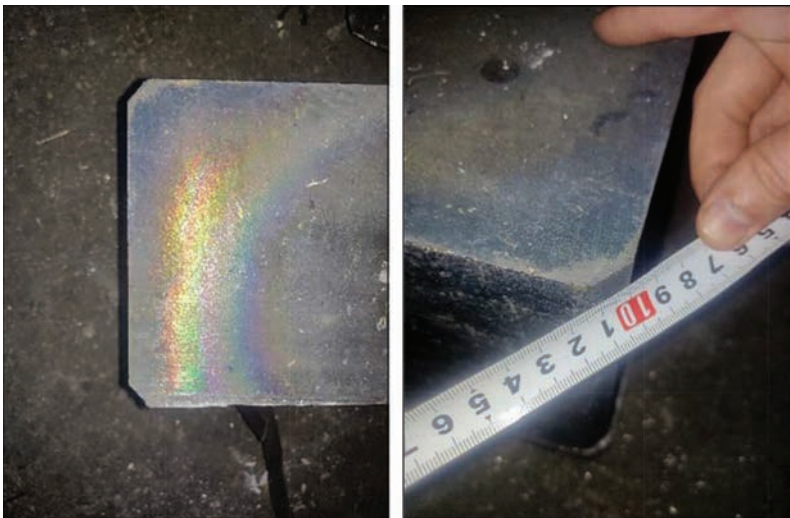


Рис. 13. Кутові зони отриманих зливків-слябів 170×600 мм

Таблиця 2. Розподіл легуючих елементів і домішок по довжині зливка-сляба титану марки Ti–6Al–4V, отриманого за розробленою технологією ЕПП

Частина зливка	Місце відбору проби*	Вміст, мас. %						
		Al	V	Fe	Si	Zr	O	N
Верхня	О	6,18	3,91	0,09	0,04	0,01		
	С	6,29	4,15	0,07	0,05	0,01	0,09	0,026
	П	6,25	4,25	0,09	0,04	0,01		
Середня	О	6,31	4,03	0,08	0,06	0,01		
	С	6,30	4,14	—»—	—»—	0,01	—»—	—»—
	П	6,36	4,18	0,06	0,04	0,01		
Нижня	О	6,43	4,19	0,09	0,05	0,01		
	С	6,62	3,87	0,08	0,06	0,01	0,11	0,024
	П	6,48	3,96	0,10	0,07	0,01		
ГОСТ 19807–91		5,3...6,8	3,5...5,3	<0,6	<0,1	<0,3	<0,2	<0,05

*О — поблизу осі зливка; С — поблизу середини радіусу; П — в периферійній зоні.

діл легуючих елементів рівномірний і відповідає марочному складу.

Таким чином, визначено технологічні режими одержання зливків-слябів перерізом 170×600 мм, які забезпечують необхідний хімічний склад та усувають дефекти ливарного походження поверхні.

Показано, що введення 0,5-секундної затримки периферійного пучка в кутах кристалізатора 170 × 600 мм є оптимальним технологічним компромісом. Режим забезпечує достатній приплив тепла для ліквідації кутової пастки двовимірного відведення тепла, але повністю запобігає перегріву дзеркала розплаву, що сприяє формуванню задовільної поверхні зливка-сляба.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ/REFERENCES

1. Cui, Jiajun, Li, Baokuan, Liu, Zhongqiu et al. (2022) Comparative investigation on ingot evolution and product quality under different arc distributions during vacuum arc remelting process. *J. of Materials Research and Technology*, **18**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.058>

2. Patel, A., Minisandram, R., Evans, D. (2004) Modeling of Vacuum Arc Remelting of Alloy 718 Ingots. In: *Proc. of the Inter. Symp. on Superalloys*. DOI: https://doi.org/10.7449/2004/Superalloys_2004_917_924

3. Lütjering, G., Williams, J.C. (2007) *Titanium*. 2nd Ed. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag.

4. (2015) *Titanium: Physical metallurgy, processing, and applications*. Ed. by F.H. Froes. Materials Park, ASM International.

5. Akhonin, S., Pikulin, O., Berezos, V. et al. (2022) Determining the structure and properties of heat resistant titanium alloys VT3-1 and VT9 obtained by electron beam melting. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **5(12–119)**, 6–12. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265014>

6. Wang, Y., Xin, Y., Gao, L. et al. (2024) The analysis of the compositional uniformity of a Ti–Al alloy during electron beam cold hearth melting: A numerical study. *Metals*, **14**, 884. DOI: <https://doi.org/10.3390/met14080884>

7. Cao, W., Ma, C., Li, Y. et al. (2024) Numerical simulation study on solidification process of titanium slab ingot by electron beam cold hearth melting. *Materials Research Express*, **11(8)**, 086514. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad71a3>

8. Nyakana, S., Fanning, J. (2007) *An overview of titanium alloys produced by electron-beam single-melting*. SAE Techni-

- cal Paper 2007-01-3884. DOI: <https://doi.org/10.4271/2007-01-3884>
9. Zhang, H.Z., Yi, J.H., Wang, J.S. et al. (2022) Effect of direct rolling process on microstructure and mechanical properties of the electron beam cold hearth melting Ti-6Al-4V alloy. *Metals*, **12**, 2018. DOI: <https://www.mdpi.com/2075-4701/12/12/2018>
 10. Zhang, Q., Hao, X.B., Li, B.B. et al. (2020) Microstructure and properties of TC4 alloy sheet by EB melting slab straight rolling. *Heat Treat. Met.*, **45**, 196–202.
 11. Chong, Ma, Wei, Cao, Benhua, Liu et al. (2024) Simulation prediction of CP-Ti slab ingot solidification structure based on the CAFE method. *Inter. Communications in Heat and Mass Transfer*, **159**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108155>
 12. Mitchell, A., Kawakami, A., Cockcroft, S.L. (2007) Segregation in titanium alloy ingots. *J. High-Temp. Mater. Proces.*, **26**(1), 59–77.
 13. Markovsky P.E., Akhonin, S.V., Berezos, V.O. et al. (2024) Layered titanium-based materials manufactured with cast and wrought: Production, composition, microstructure, and mechanical properties. *Prog. Phys. Met.*, **25**(4), 736–764. DOI: <https://doi.org/10.15407/ufm.25.04.736>
 14. Akhonin, S.V., Gorislavets, Yu.M., Glukhenkiy, A.I. et al. (2019) Modeling hydrodynamic and thermal processes in the mould in cold-hearth electron beam melting. *Suchasna Elektrometallurgiya*, **4**, 9–17. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2019.04.02>
 15. Akhonin, S.V., Berezos, V.O., Medvedev, M.I. et al. (2025) Mastering the technology of producing ingots from heat-resistant alloys KhN38VT and KhN60VT by the electron beam melting method. *The Paton Welding J.*, **1**, 21–27. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2025.01.04>
 16. Trigub, N.P., Zhuk, G.V., Kornejchuk, V.D. et al. (2007) Commercial electron beam installation UE-5812. *Advances in Electrometallurgy*, **1**, 9–11.

POWER DISTRIBUTION OF ELECTRON BEAM HEATING IN THE MOLD DURING EBCHM INGOT-SLAB MELTING

V.O. Berezos, S.V. Akhonin, O.H. Yerokhin, Ye.I. Lipchanchuk, Yu.T. Ishchuk

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine

ABSTRACT

The production of rectangular titanium slabs via electron beam cold hearth melting is a highly efficient alternative to conventional vacuum arc remelting. It completely eliminates the capital-intensive stage of hot breakdown forging and increases the material utilization coefficient (yield) from 0.65 to 0.90. However, the rectangular geometry of the mold creates a zone of two-dimensional heat dissipation into the water-cooled copper walls. According to modeling data, the local heat flux in the corner zones is 1.4–1.7 times higher than on the flat sections of the perimeter. Thermal supercooling of the meniscus poses a risk of casting defects, such as skull foldovers, deep ripples, and diagonal lacks of fusion. To compensate for edge effects, a comprehensive study was conducted to substantiate and optimize the space-time scanning parameters of the peripheral electron beam during the melting of Ti-6Al-4V alloy slabs. It is demonstrated that introducing a 0.5 s technological delay of the peripheral beam in the corner coordinates of the trajectory represents an optimal compromise. At a beam power of 54 kW and a peak specific density of 5.48 kW/cm², this mode provides a cycle-averaged power density in the corner at 0.82 kW/cm². Experimental verification confirmed the formation of smooth slab corners, entirely free from casting defects, skull foldovers, lacks of fusion, and ripples. 16 Ref., 2 Tabl., 13 Fig.

KEYWORDS: beam melting, cold hearth, slab, titanium alloy, power, technological modes

ORCID

V.O. Березос — <https://orcid.org/0000-0002-5026-7366>, С.В. Ахонін — <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>, О.Г. Єрохін — <https://orcid.org/0000-0003-2105-5783>, Є.І. Ліпчанчук — <https://orcid.org/0009-0000-3221-2575>, Ю.Т. Іщук — <https://orcid.org/0009-0004-6679-6977>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛІА ЛІСТУВАННЯ

В.О. Березос

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: titan.paton@gmail.com

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

В.О. Березос, С.В. Ахонін, О.Г. Єрохін, Є.І. Ліпчанчук, Ю.Т. Іщук (2026) Розподіл потужності електронно-променевого нагріву у кристалізаторі при виплавці зливків-слябів методом ЕПП. *Сучасна електрометалургія*, **03**, 3–10. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2026.03.01>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem>

Отримано 02.07.2026

Отримано у переглянутому вигляді 09.07.2026

Затверджено до друку 14.07.2026

Оприлюднено 24.07.2026