

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ТА ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ТИТАНОВИХ ЗЛИВКІВ ЕПП

С.В. Ахонін¹, В.О. Березос¹, О.І. Бондар²,
О.І. Глухенький², Ю.М. Гориславець², А.Ю. Северин¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Інститут електродинаміки НАН України. 03057, м. Київ, просп. Перемоги, 56. E-mail: bondar_o_i@ukr.net

Показано, що явище термогравітаційної конвекції при зазначенні продуктивності процесу ЕПП є вагомим фактором, що визначає тепловий стан зливка. Для усталеного режиму процесу електронно-променевої плавки титану в прохідний циліндричний кристалізатор сформульована математична модель пов'язаних гідродинамічних і теплових процесів в металі, що кристалізується, з врахуванням явищ термогравітаційної конвекції. Визначено тепловий стан зливка та положення фронту кристалізації при неперервній подачі рідкого титану з проміжної ємності в кристалізатор в залежності від температури металу на вході та швидкості витягування зливка для ламінарного режиму гідродинамічної течії в рідкій ванні. Встановлено, що при збільшенні температури металу на вході в кристалізатор в досліджуваному діапазоні (2040...2100 К) зменшується зміщення точки максимальної глибини ванни від осі зливка. За допомогою розрахунків в рамках побудованої математичної моделі досліджено вплив швидкості подачі рідкого металу з проміжної ємності в кристалізатор на форму та глибину рідкої ванни. Встановлено, що при збільшенні швидкості витягування зливка на 30 % глибина рідкої ванни зростає у 1,5 рази, а точка максимальної глибини рідкої ванни наближається до осі зливка. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 9.

Ключові слова: математичне моделювання; електронно-променеве плавлення; гідродинамічні та теплові процеси; зливки; титан; неперервне лиття

Твердіння металу в кристалізаторі під час електронно-променевого плавлення (ЕПП) супроводжується складними і швидкоплинними фізичними процесами перенесення тепла, гідродинамічними течіями, випромінюванням. На практиці часто є відсутньою можливість виміряти значення параметрів цих процесів, тим більше з достатньою точністю. Крім того в металургії натурні експерименти є трудомісткими та пов'язані з великими матеріальними витратами з огляду на високі енергозатратність та вартість металу, що виплавляється. Тому велике значення мають чисельні експерименти із застосуванням методів математичного моделювання та розрахунків на електронних обчислювальних машинах, що дозволяють при порівняно малих витратах і мінімальній кількості експериментальних даних скласти якісну і кількісну картину явищ, що відбуваються в металургійних процесах.

В роботах [1, 2] сформульовано основні принципи моделювання теплофізичних процесів в зливках, одержуваних способами спеціальної електрометалургії. Стосовно процесів, що описують різні стадії ЕПП, такі як плавлення вихідної шихти, перемішування і випаровування металу і домішок в проміжній ємності, формування зливка в кристалізаторі,

охолодження зливка, то їх було розглянуто в роботах [3–6]. Але в зазначених роботах, з урахуванням складності рішення пов'язаних тривимірних мультифізичних задач і обмеженості доступних обчислювальних ресурсів, математичне моделювання теплофізичних процесів при одержанні зливків титану переважно зводилося до розгляду теплового стану зливка без врахування тепло- та масопереносу за рахунок руху розплаву в кристалізаторі.

Сучасний розвиток чисельних методів та постійно зростаюча потужність обчислювальної техніки дає можливість для формулювання постановок більш повних і складних завдань моделювання технологічних процесів, а чисельний підхід є найбільш привабливим в дослідженні гідродинамічних процесів та процесів тепломасообміну, які протікають під час одержання зливків способом ЕПП. В роботі [7] було представлено та детально розглянуто тривимірну математичну модель пов'язаних гідродинамічних і теплових процесів твердіння металу в прохідному циліндричному кристалізаторі при електронно-променевому плавленні з проміжною ємністю. Ця математична модель дозволяє досліджувати процеси в квазівтомлювальному режимі безперервної виплавки зливка, при якому положення фронту твердіння сплаву в кристалізаторі не змінюється в часі.

С.В. Ахонін — <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>, В.О. Березос — <https://orcid.org/0000-0002-5026-7366>,

О.І. Бондар — <https://orcid.org/0000-0002-1678-8862>, О.І. Глухенький — <https://orcid.org/0000-0001-5053-5677>,

Ю.М. Гориславець — <https://orcid.org/0000-0003-1668-4972>, А.Ю. Северин — <https://orcid.org/0000-0003-4768-2363>

На прикладі зливка титанового сплаву Ti-6Al-4V, що твердне в циліндричному кристалізаторі діаметром 0,6 м, було показано, що вплив турбулентної теплопровідності на положення фронту кристалізації, а також на глибину рідкої ванни є незначним для заданої швидкості витягування зливка (4 мм/хв). Це дозволяє в такому випадку зробити припущення про наявність турбулентності лише в області входження струменя рідкого металу з проміжної ємності в кристалізатор та про переважаючий ламінарний характер руху розплаву в рідкій ванні загалом.

Більш суттєво на форму та глибину рідкої ванни може впливати температура перегріву рідкого металу, що подається з проміжної ємності, та продуктивність процесу неперервного лиття. Тому метою цього дослідження є визначення теплового стану зливка та положення фронту кристалізації при неперервній подачі рідкого титану з проміжної ємності в кристалізатор в залежності від температури металу на вході та швидкості витягування зливка для ламінарного режиму гідродинамічної течії в рідкій ванні. Дослідження цих питань проводилося на прикладі лиття чистого титану в прохідний циліндричний кристалізатор діаметром 0,4 м.

Для моделювання зазначеного процесу була сформульована наступна математична модель, що включає в себе закони збереження маси (1), імпульсу (2) та енергії (3):

$$\nabla(\rho \mathbf{u}) = 0; \tag{1}$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I}) + \rho \mathbf{g} + \frac{C(1-F_L)^2}{q + F_L^3} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_{cast}); \tag{2}$$

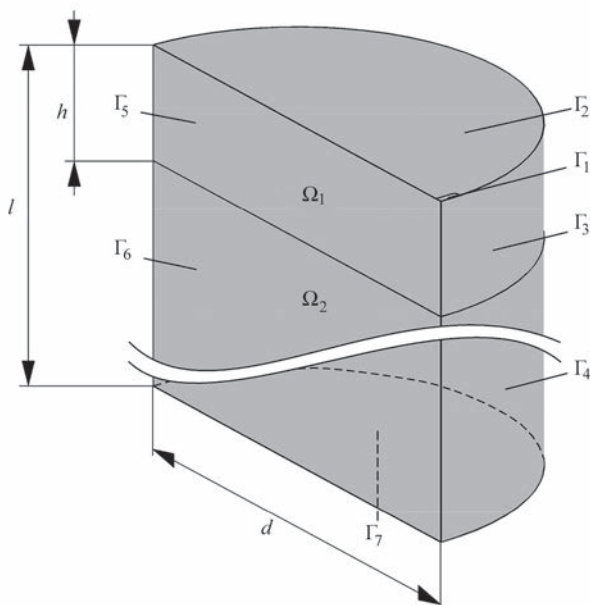


Рис. 1. Розрахункова область для чисельного моделювання

$$\rho C_p (\mathbf{u} \cdot \nabla) T = -(\nabla \cdot \mathbf{q}), \tag{3}$$

де ρ — густина; \mathbf{u} — швидкість; p — тиск; μ — динамічна в'язкість; \mathbf{I} — одинична матриця; \mathbf{g} — вектор гравітації; $C = 10^5$ та $q = 0,01$ — константи, співвідношення яких повинно бути достатнім, щоб придушити рух (за винятком швидкості лиття \mathbf{u}_{cast}) в твердій області; F_L — частка рідкої фази (змінюється в діапазоні від 0 до 1); \mathbf{u}_{cast} — вектор швидкості витягування зливка; C_p — питома теплоємність; T — температура; $\mathbf{q} = -k \nabla T$ — тепловий потік за рахунок теплопровідності; k — коефіцієнт теплопровідності.

Положення фронту кристалізації визначалося у відповідності до методу фазового поля. Суть методу полягає у тому, що фазовий перехід відбувається у певному температурному діапазоні $\Delta T = T_l - T_s$. Рідка область визначається температурою вище температури ліквідуса T_l , тверда область — температурою нижче температури солідуса T_s , а перехідна зона знаходиться між ними. Фронт кристалізації визначається по ізотермі температури плавлення $T_m = T_s + \Delta T/2$. Вирази для визначення частки рідкої фази F_L та відповідних фізичних властивостей матеріалів у перехідній зоні (області зміни фазового стану) представлені в роботі [7].

Розрахункова область для дослідження зазначених процесів представлена на рис. 1, на якому $\Gamma_1 \dots \Gamma_7$ — границі розрахункової області, $d = 0,4$ м, $h = 0,15$ м, $l = 2 \cdot d$, перетин струменя розплаву на вході в кристалізатор (Γ_1) становить 10×40 мм.

Граничні умови для представленої на рис. 1 розрахункової області наведені в таблиці, де \mathbf{n} — вектор нормалі до поверхні; u_{cast} — швидкість витягування зливка; q_{ev} — тепловий потік з поверхні рідкого металу за рахунок випаровування; ϵ — коефіцієнт випромінювання; h — коефіцієнт контактної тепловіддачі; $\sigma_{SB} = 5,67 \cdot 10^{-8}$ В/т($m_2 \cdot K_4$) — постійна Стефана-Больцмана; $T_{amb} = 293,15$ К — температура навколишнього середовища.

Фізичні характеристики титану наступні: температура плавлення $T_m = 1941$ К; прихована теплота плавлення $L = 295$ кДж/кг; коефіцієнт динамічної в'язкості для рідкої області $\mu_l = 0,0035$ Па·с; коефіцієнт динамічної в'язкості для твердої області $\mu_s = 1$ Па·с. Таким чином, при заданому температурному діапазоні фазового переходу $\Delta T = 60$ К температура ліквідуса становила $T_l = 1971$ К, температура солідуса — $T_s = 1911$ К. Характеристики перехідної області (області фазового переходу) визначали відповідно до методу повної теплоємності (apparent heat capacity formulation).

Граничні умови розрахункової області для чисельного моделювання

Границя	Умови для швидкості	Умови для теплового потоку
Γ_1	$\mathbf{u} - (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} = 0$	$T = T_{in}$
Γ_2	$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0$ $\mathbf{K} - (\mathbf{K} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} = 0$ $\mathbf{K} = \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)\mathbf{n}$	$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \varepsilon_2 \sigma (T_{amb}^4 - T^4) - q_{ev} + \frac{3P_{eb}}{\pi d^2}$ $\varepsilon_2 = 0,5$
Γ_3		$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \varepsilon_3 \sigma (T_{amb}^4 - T^4) + h_3 (T_{amb} - T)$ $\varepsilon_3 = 0,35(1 - F_l)$ $h_3 = h_s (1 - F_l) + h_l F_l$ $h_s = 60 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ $h_l = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
Γ_4		$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \varepsilon_4 \sigma (T_{amb}^4 - T^4)$ $\varepsilon_4 = 0,35$
Γ_5 Γ_6		$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0$
Γ_7	$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = u_{cast}$	$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = h_7 (T_{amb} - T)$ $h_7 = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

Температурні залежності питомої теплоємності $C_p(T)$, коефіцієнта теплопровідності $k(T)$ та густини $\rho(T)$ для твердої та рідкої фаз титану представлені на рис. 2, а-в відповідно [8]. Залежність втрат з поверхні рідкого титану за рахунок випаровування $q_{ev}(T)$ показано на рис. 2, з [9].

При розрахунках в якості базових вихідних даних приймали продуктивність витягування зливка

($G = 250$ кг/год), якій відповідає базова швидкість витягування зливка

$$u_{base} = \frac{4 \cdot G}{\rho_{T_{out}} \cdot \pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 250}{4400 \cdot \pi \cdot 0,4^2 \cdot 3600} = 1,256 \cdot 10^{-4} \text{ м/с (приблизно 7,5 мм/хв)},$$

температура рідкого металу на вході в кристалізатор $T_{in} = 2061$ К та нагрівання зливка рівномірно розподіленим по поверхні тепловим потоком за-

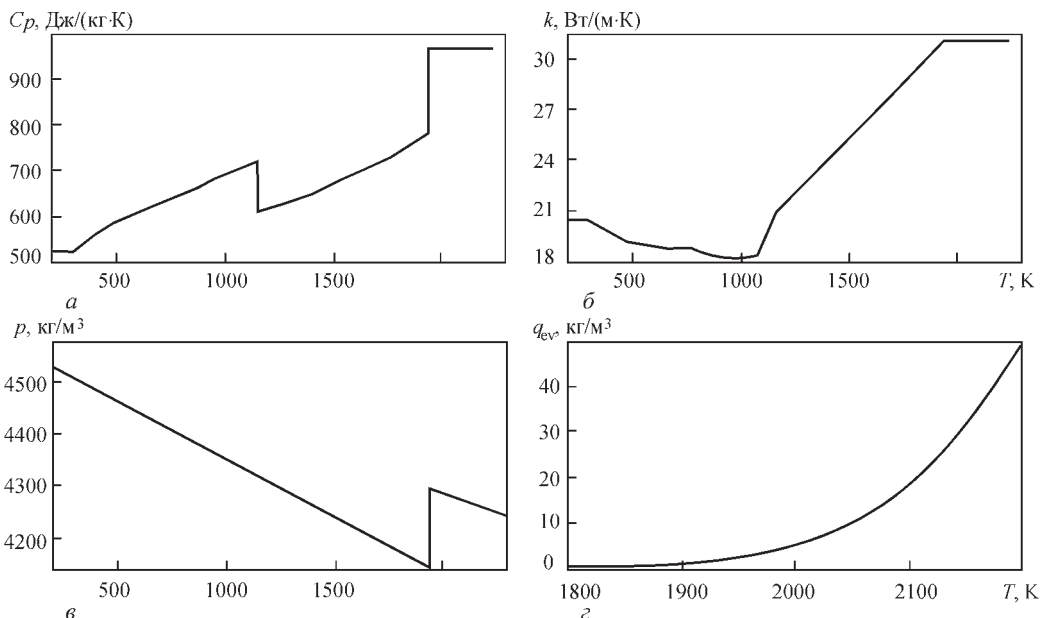


Рис. 2. Залежності питомої теплоємності (а), коефіцієнта теплопровідності (б), густини (в) та випаровування (з) від температури

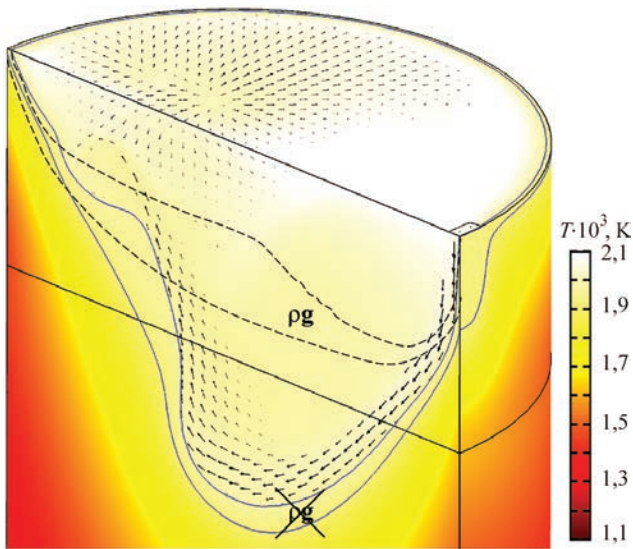


Рис. 3. Вплив явища термогравітаційної конвекції на положення міжфазної зони

гальною потужністю $P_{eb} = 90$ кВт з коефіцієнтом корисної дії електронно-променевого нагріву 75 %.

Важливість та необхідність врахування термогравітаційних сил в математичній моделі фізичних процесів в кристалізаторі визначалась та обґрунтовувалась шляхом порівняння результатів розрахунків з врахуванням та без цих сил між собою. Для дослідження ступеня впливу явища термогравітаційної конвекції на тепловий стан зливка та положення міжфазної границі було проведено моделювання зазначеного процесу без врахування складової ρg в рівнянні (2). Отримані при цьому розподіл температури, а також ізотерми солідуса та ліквідуса (суцільні лінії) представлені на рис. 3.

Глибина рідкої ванни при цьому складає 257 мм. Для порівняння на рисунку показано положення міжфазної зони (штрихові лінії), отриманої з врахуванням термогравітаційних сил.

Результати показують, що не врахування термогравітаційних сил призводить до збільшення глибини рідкої ванни більш ніж вдвічі (на 137 мм) і, відповідно, до зміни характеру руху рідкого металу. При цьому практично відсутнє зміщення точки максимальної глибини ванни від осі зливка, незважаючи на несиметричний вигляд самої ванни.

Таким чином, явище термогравітаційної конвекції при зазначеній продуктивності процесу ЕПП є вагомим фактором, що визначає тепловий стан зливка, тому подальші розрахунки виконували з його врахуванням.

Для визначення впливу температури перегріву рідкого металу, що подається з проміжної ємності, на глибину рідкої ванни були проведені розрахунки для різної температури рідкого металу на вході в кристалізатор (T_{in}), К: 2041, 2061, 2081, 2101. В результаті були отримані розподіли температури та швидкості в досліджуваній області, які представлені на рис. 4 та 5 відповідно.

Аналіз розподілу температур в зливку, отриманих за результатами моделювання, показав, що під дією електронно-променевого нагрівання поверхневий шар розплаву нагрівається до максимальної температури — приблизно 2085 К (рис. 4), що навіть може перевищувати в деяких випадках температуру рідкого металу, який надходить з проміж-

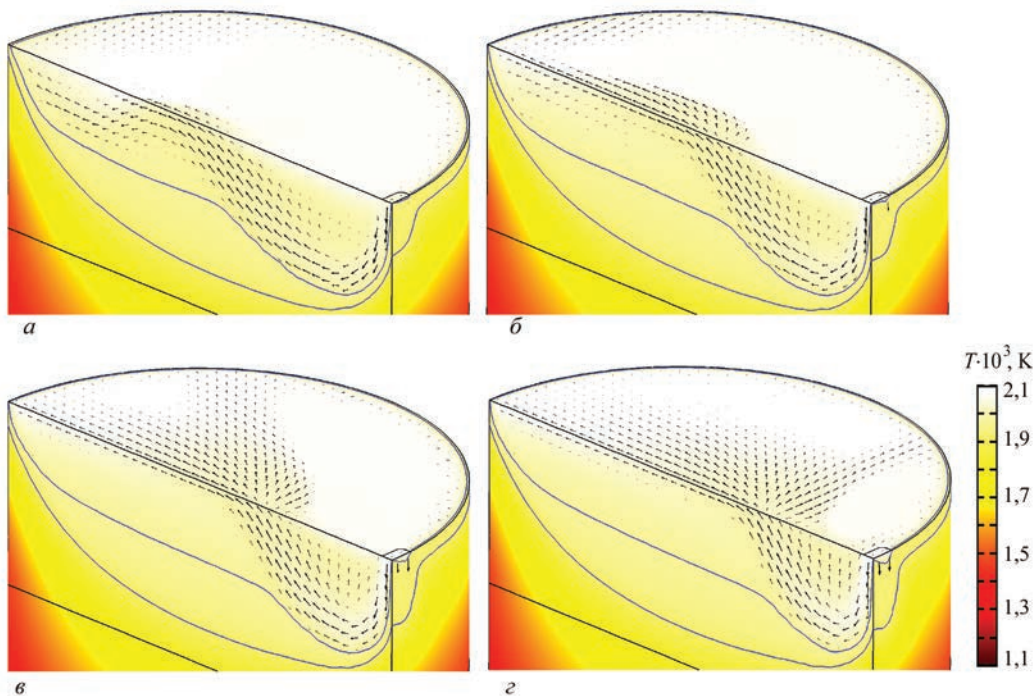


Рис. 4. Розподіл температури (T_{in}) у зливку при ЕПП, К: а — 2041; б — 2061; в — 2081; г — 2101

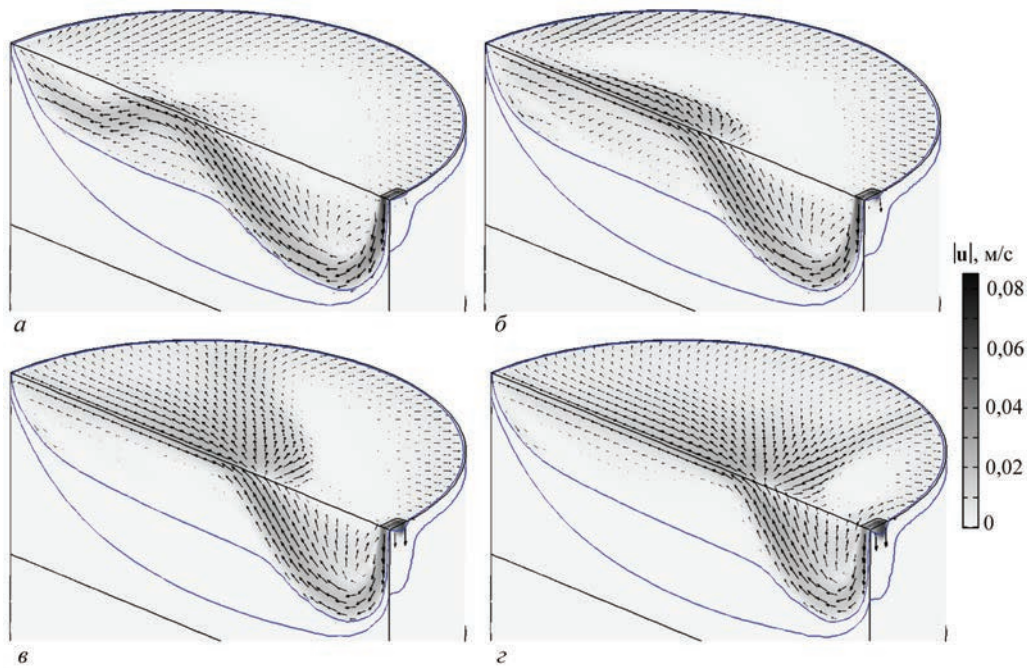


Рис. 5. Розподіл швидкості розплаву (T_{in}) у зливку під час ЕПП в залежності від температури, К: а — 2041; б — 2061; в — 2081; г — 2101

ної ємності з температурою 2040...2100 К (рис. 4, а, б). За рахунок інтенсивного охолодження рідкого металу стінками кристалізатора в ньому формується зовнішня поверхня зливка, товщина гарнісажу між рідким металом та стінкою кристалізатора в його верхній частині складає 5...7 мм. По довжині зливка температура зменшується з 2085 К на поверхні розплаву до 1000 К на його нижній границі розрахункової області. На виході зливка з кристалізатора температура його поверхні дорівнює близько 1500 К і слабо залежить від технологічних параметрів плавлення.

Аналіз розподілу швидкості руху рідкого металу в кристалізаторі показав, що потік розплаву

з проміжної ємності заглиблюється біля стінки кристалізатора на максимальну глибину, а потім віддзеркалюється від донної частини ванни, виходить на її поверхню та розтікається по всьому об'єму розплаву (рис. 5, а, б). Слід відзначити, що в місці заглиблення вхідного потоку товщина двофазної зони мінімальна та складає 3...6 мм. За умов низького перегріву розплаву, що надходить в кристалізатор з проміжної ємності, вище температури плавлення титану рух рідкого металу займає весь об'єм ванни, де температура перевищує температуру ліквідуса титану. Тоді як при підвищенні температури вхідного потоку металу рух розплаву зосереджується тільки біля вільної поверхні, фор-

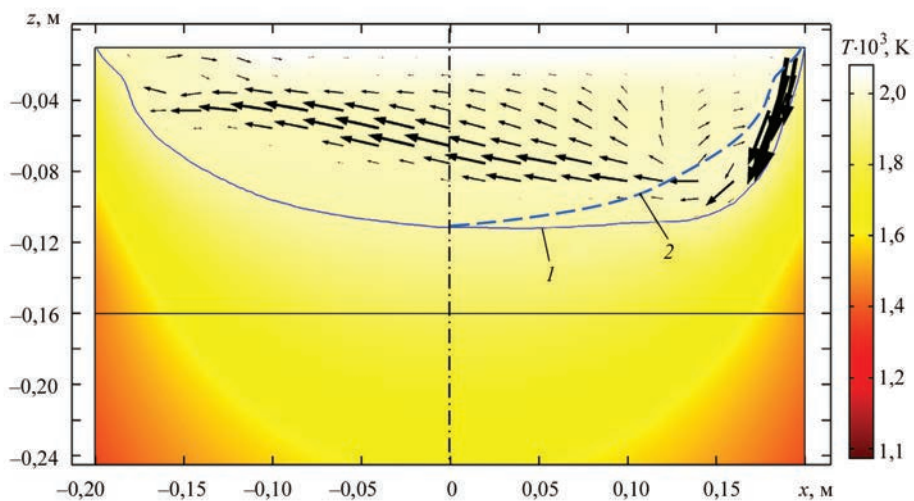


Рис. 6. Поздовжній переріз рідкої ванни у зливку титану діаметром 400 мм під час ЕПП: 1 — точка максимальної глибини рідкої ванни; 2 — дзеркальна проекція лівої половини ізотерми ($T_m = 1941$ К) відносно осі зливка для візуальної оцінки асиметрії рідкої ванни

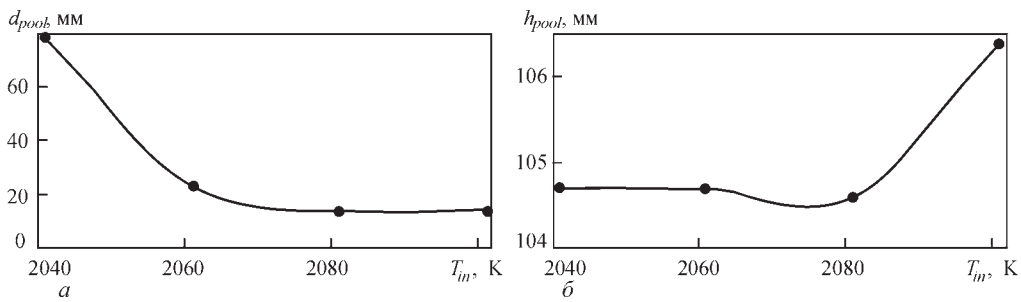


Рис. 7. Залежності зміщення точки максимальної глибини відносно осі зливка (а) та глибини рідкої ванни (б) від температури перегріву рідкого металу на вході в кристалізатор

муючи досить об'ємні застійні зони (рис. 5, в, з). Таке явище може бути обумовлено дією термогравітаційних сил.

В цілому розрахунки показали, що форма рідкої ванни є несиметричною (рис. 4, 5). Хоча фронт кристалізації наближається до плоского, в області входу струменя рідкого металу спостерігається промивання твердої фази біля стінки кристалізатора (рис. 6). Товщина гарнісажу в цій зоні складає 2...3 мм, що в 2...3 рази менше товщини гарнісажу в інших зонах кристалізатора. При русі зливка вниз такий тонкий гарнісаж може руйнуватися та формувати на поверхні зливка добре відомі характерні дефекти типу заплутування металу.

Зміщення точки максимальної глибини відносно осі зливка (d_{pool}) та глибина рідкої ванни (h_{pool}) в залежності від температури перегріву рідкого металу на вході в кристалізатор представлені на рис. 7. Дані параметри визначалися по ізотермі, що відповідає температурі плавлення титану ($T_m = 1941$ К).

Цікавим є те, що при збільшенні температури металу на вході в кристалізатор (в досліджуваному діапазоні) зменшується зміщення точки максимальної глибини ванни від осі зливка (рис. 7, а).

Хоча очікувалося, що при збільшенні температури перегріву рідкого металу, який подається з проміжної ємності, точка максимальної глибини рідкої ванни буде зміщуватися від осі зливка у бік вводу струменя рідкого металу.

Що стосується глибини рідкої ванни, то вона практично не змінюється в досліджуваному діапазоні температури рідкого металу на вході в кристалізатор (рис. 7, б), з чого можна зробити висновки про їх слабку залежність. Проте, як видно з рис. 4, зі збільшенням температури рідкого металу на вході в кристалізатор суттєво змінюється характер його руху.

При одержанні злиwkів способом ЕПП одним із важливих технологічних параметрів є продуктивність процесу. Тому подальші розрахунки були спрямовані на дослідження впливу швидкості подачі рідкого металу з проміжної ємності в кристалізатор на форму та глибину рідкої ванни.

При проведенні моделювання температура перегріву металу, що подається в кристалізатор, була прийнята $T_m = 2061$ К. Положення ізотерм, що відповідають температурі плавлення титану (T_m), для різних швидкостей витягування зливка в діапазоні $u_{cast} \dots 1,3 u_{cast}$ представлені на рис. 8.

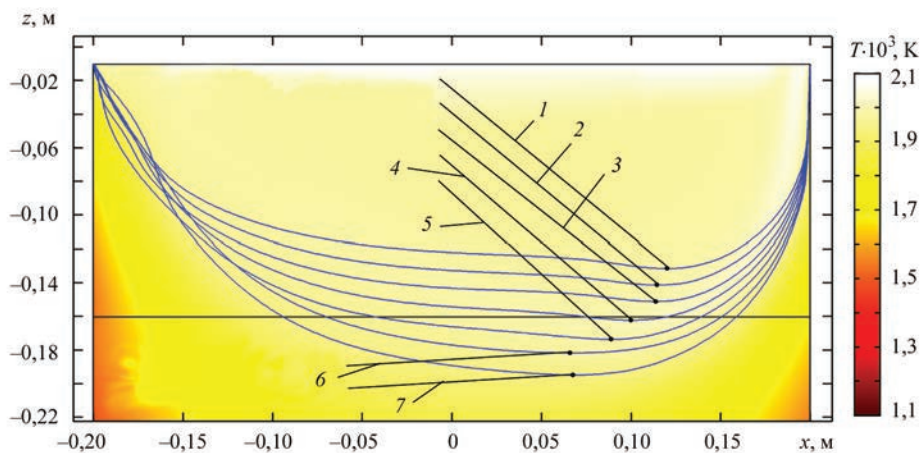


Рис. 8. Положення ізотерм температури плавлення титану для різних швидкостей витягування зливка з кристалізатора (крапкою позначено місце максимальної глибини рідкої ванни та вказано його параметри в форматі: $u_{cast}; d_{pool}; h_{pool}$, м): 1 — $1,00 u_{cast}; 0,120; 0,122$; 2 — $1,05 u_{cast}; 0,116; 0,131$; 3 — $1,10 u_{cast}; 0,114; 0,141$; 4 — $1,15 u_{cast}; 0,100; 0,152$; 5 — $1,20 u_{cast}; 0,088; 0,164$; 6 — $1,25 u_{cast}; 0,066; 0,172$; 7 — $1,30 u_{cast}; 0,068; 0,185$

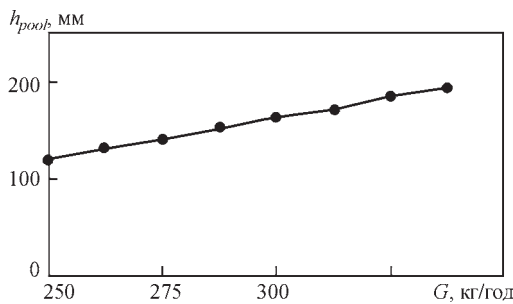


Рис. 9. Залежність глибини рідкої ванни від продуктивності при ЕПП зливка титану діаметром 400 мм

Як видно з рис. 8, зі зростанням продуктивності лиття конфігурація фронту кристалізації, не зважаючи на врахування термогравітаційних сил, наближається до конусоподібної. Це свідчить про те, що більш плоский фронт кристалізації розплаву може бути забезпечений шляхом зменшення продуктивності лиття зливка. Також зрозуміло, що зі зростанням продуктивності вплив термогравітаційних сил на тепловий стан зливка буде слабшати.

Для більш наглядної демонстрації результатів, одержаних за допомогою проведених в рамках математичної моделі розрахунків, побудовано залежність глибини рідкої ванни від продуктивності процесу при ЕПП зливка титану (рис. 9).

Як видно з рис. 9, при збільшенні швидкості витягування зливка на 30 % глибина рідкої ванни зростає більш ніж на 50 % (з 0,122 до 0,185 м).

Аналіз одержаних результатів показав, що збільшення продуктивності процесу, як і у випадку з підвищенням температури перегріву металу, що надходить у кристалізатор, спричиняє зміщення точки максимальної глибини (d_{pool}) рідкої ванни до осі зливка. Крім того, при збільшенні продуктивності процесу спостерігається суттєве зростання глибини рідкої ванни, що також підтверджується даними роботи [10].

Висновки

1. Методами математичного моделювання теплота масопереносу встановлено особливості кристалізації та конфігурації металевої ванни під час ЕПП злиwkів титану в кристалізаторі діаметром 400 мм. Тривимірні поля швидкості руху рідкого металу і його температури отримані з урахуванням дії термогравітаційних сил для ламінарного характеру руху розплаву.

2. Обґрунтовано необхідність врахування термогравітаційних сил при моделюванні гідродинамічних процесів в кристалізаторі при ЕПП титанових злиwkів. Показано, що термогравітація є вагомим фактором при визначенні теплового стану зливка, тому її врахування є обов'язковим. Зі зростанням

продуктивності ЕПП внесок термогравітаційних сил в тепловий стан зливка буде слабшати.

3. Встановлено, що вплив температури перегріву рідкого металу, що подається в кристалізатор з проміжною ємністю, на конфігурацію та глибину рідкої ванни є незначним. В досліджуваному діапазоні температур рідкого металу на вході в кристалізатор (2041...2101 К) зі зміною температури лише дещо змінюється характер його руху.

4. Встановлено, що вплив продуктивності електронно-променевого плавлення титану на розподіл температури і, відповідно, на форму та глибину рідкої ванни є суттєвим. При збільшенні швидкості витягування зливка на 30 % глибина рідкої ванни зростає у 1,5 рази (на 63 мм), а точка максимальної глибини рідкої ванни наближається до осі зливка.

Список літератури

1. Белло Ж.-П., Флори Е., Эсс Е., Аблизер Д. (1996) Математическое моделирование процесса электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью и его применение для производства титана. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **4**, 27–37.
2. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Козлитин Д.А. и др. (1997) *Электронно-лучевая плавка*. Киев, Наукова думка.
3. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В. (2006) *Электронно-лучевая плавка титана*. Киев, Наукова думка.
4. Лесной А.Б., Демченко В.Ф., Жадкевич М.Л. (2001) Моделирование гидродинамики и теплообмена при кристаллизации слитков электронно-лучевого переплава. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **2**, 17–21.
5. Жук Г.В., Калинюк А.Н., Тригуб Н.П. (2002) Моделирование режимов вывода усадочной раковины в цилиндрических слитках ЭЛПЕ. *Там же*, **1**, 23–25.
6. Жук Г.В., Ахонина Л.В., Тригуб Н.П. (1998) Математическое моделирование процессов кристаллизации титанового сплава Ti–6Al–4V при ЭЛПЕ. *Там же*, **2**, 21–25.
7. Ахонин С.В., Гориславец Ю.М., Глухенький А.И. и др. (2019) Моделирование гидродинамических и тепловых процессов в кристаллизаторе при электронно-лучевой плавке с промежуточной емкостью. *Сучасна електрометаллургия*, **4**, 9–17. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2019.04.02>
8. Mills K. (2002) *Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys*. Woodhead Publishing Limited.
9. *Физические свойства титана*. <https://libmetal.ru/titan/phisproptitan.htm>
10. Жук Г.В. (2008) О влиянии распределения мощности нагрева металла в кристаллизаторе в процессе ЭЛПЕ на структуру титановых слитков. *Современная электрометаллургия*, **2**, 17–20.

References

1. Bellot, J.-P., Flori, E., Ess, E., Ablizer, D. (1996) Mathematical modeling of electron beam melting process with cold hearth and its application for titanium manufacture. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **4**, 27–37 [in Russian].

2. Paton, B.E., Trigub, N.P., Kozlitin, D.A. et al. (1997) *Electron beam melting*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
3. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V., Zhuk, G.V. (2006) *Electron beam melting of titanium*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Lesnoj, A.B., Demchenko, V.F., Zhadkevich, M.L. (2001) Modeling of hydrodynamics and heat exchange in crystallization of ingots of electron beam remelting. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **2**, 17–21 [in Russian].
5. Zhuk, G.V., Kalinyuk, A.N., Trigub, N.P. (2002) Modeling of conditions of removal of shrinkage pipe from cylindrical ingots. *Advances in Electrometallurgy*, **1**, 19–21.
6. Zhuk, G.V., Akhonina, L.V., Trigub, N.P. (1998) Mathematical modeling of crystallization processes of Ti–6Al–4V titanium alloy in EBCH. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **2**, 21–25 [in Russian].
7. 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 Elektrometall.*, **4**, 9–17 [in Russian], DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2019.04.02>
8. Mills, K. (2002) *Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys*. Woodhead Publishing Limited.
9. Physical properties of titanium [in Russian]. <https://libmetal.ru/titan/phisproptitan.htm>
10. Zhuk, G.V. (2008) On influence of metal heating power distribution in mould in EBCHM process on structure of titanium ingots. *Advances in Electrometallurgy*, **2**, 15–18.

MATHEMATICAL MODELING OF HYDRODYNAMIC AND THERMAL PROCESSES AT CRYSTALLIZATION OF TITANIUM INGOTS PRODUCED BY EBM

S.V. Akhonin¹, V.O. Berezos¹, O.I. Bondar², O.I. Glukhenkii², Yu.M. Goryslavets², A.Yu. Severin¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine.

56 Peremohy Prosp., 03057, Kyiv, Ukraine. E-mail: bondar_o_i@ukr.net

It is shown that when specifying the productivity of EBM process, the phenomenon of thermogravitational convection is a weighty factor that determines the thermal state of the ingot. A mathematical model of interrelated hydrodynamic and thermal processes in the crystallizing metal, taking into account the phenomena of thermogravitational convection, was formulated for a steady-state mode of the process of electron beam melting of titanium into a straight-through cylindrical crucible. The thermal state of the ingot was determined, as well as the position of the solidification front at continuous feeding of liquid titanium from the cold hearth into the crucible, depending on metal temperature at the inlet and speed of ingot drawing for laminar mode of hydrodynamic flow in the liquid pool. It is found that at increase of metal temperature at the inlet to the crucible in the studied range (2040...2100 K) shifting of the point of maximum pool depth from the ingot axis becomes smaller. Calculations within the constructed mathematical model were used to study the impact of the rate of liquid metal feed from the cold hearth into the crucible on the liquid pool shape and depth. It is found that at increase of ingot drawing rate by 30 % the liquid pool depth increases 1.5 times, and the point of maximum depth of the liquid pool becomes close to ingot axis. Ref. 10, Tabl. 1, Fig. 9.

Key words: mathematical modeling; electron beam melting; hydrodynamic and thermal processes; ingot; titanium; continuous casting

Надійшла до редакції 03.02.2021

ЖУРНАЛИ для професіоналів



Видається з 1948 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0005-111X
doi.org/10.37434/as
Передплатний індекс 70031



Видається з 2000 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0957-798X
doi.org/10.37434/trwj
Передплатний індекс 21791



Видається з 1989 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 0235-3474
doi.org/10.37434/tdnk
Передплатний індекс 74475



Видається з 1985 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 2415-8445
doi.org/10.37434/sem
Передплатний індекс 70693

Журнали входять до Переліку наукових фахових видань України

(380-44) 200-8277
journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com