

Вплив періодичних коливань і флуктуацій рівня металу в кристалізаторі на процес безперервного розливання

О. М. Смірнов, доктор технічних наук, професор

О. П. Верзілов,

С. В. Куберський*, кандидат технічних наук, професор

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

*Донбаський державний технічний університет, Лисичанськ

Проаналізовано причини виникнення хвильових процесів на поверхні рідкого металу під час безперервного розливання слябів. Показано вплив флуктуацій рівня металу в кристалізаторі на виникнення аварійних ситуацій і якість заготовки. Запропоновано рекомендації для зниження вірогідності виникнення і розвитку хвильових процесів.

Явище періодичних коливань рівня металу в кристалізаторі є однією з актуальних проблем безперервного розливання слябів, оскільки воно може призводити до позаштатних та аварійних ситуацій, пов'язаних з відпрацюванням датчиком контролю рівня металу в кристалізаторі, команди на опускання стопора проміжного ковша і гальмуванням швидкості витяжки заготовки аж до повної зупинки струмка, що негативно впливає на продуктивність МБЛЗ. Крім того, коливання рівня металу є, як правило, причиною значного погіршення якості поверхні заготовки або навіть прориву твердої корки, внаслідок її прилипання до робочої поверхні кристалізатора або захоплення поверхневими шарами шлакоутворювальної суміші (ШУС).

На думку багатьох дослідників, розвиток флуктуацій рівня металу в кристалізаторі слід, перш за все, пов'язувати з високою швидкістю розливання, а також характером витікання потоків сталі з вихідних отворів зануреного стакану [1, 2]. З високим ступенем ймовірності можна стверджувати, що джерелом флуктуацій і періодичних коливань на дзеркалі металу в кристалізаторі може також бути вдування аргону через стопор-моноблок, а також прослизання заготовки в зоні привідних валків [3].

Тому основна мета представленої роботи полягала в аналізі причин виникнення хвильових процесів на поверхні рідкого меніска металу в кристалізаторі під час безперервного розливання, а також їх впливу на виникнення позаштатних ситуацій і якість металу.

Традиційно хвильові явища в кристалізаторі в основному вивчаються шляхом фізичного моделювання. За цих умов флуктуації часто розглядаються як стоячі хвилі, що розвиваються на вільній поверхні металу в кристалізаторі [4, 5]. Однак тільки теорії поверхневої стоячої хвилі, що

виникає внаслідок накладання на пряму хвилю відображеної, яка розповсюджується в зворотному напрямку, виявляється недостатньо для пояснення явища утворення великих за амплітудою стоячих хвиль. Це, на думку авторів, слід пов'язувати з наявністю на поверхні дзеркала металу рідкої ШУС, яка може перетікати по поверхні металу залежно від форми і розташування стоячих хвиль. Між тим, наявні в наукових публікаціях дані, в основному, відносяться до моделювання переважно несиметричних циркуляційних потоків в рідкій ванні кристалізатора слябової МБЛЗ.

Узагальнюючи відомі дані, можна стверджувати, що розвиток флуктуацій і хвиль на поверхні металу в кристалізаторі слід пов'язувати з заростанням або розмиванням випускних отворів заглибного стакану, порушенням симетрії циркуляційних потоків в рідкій ванні кристалізатора, розвитком стоячих хвиль на поверхні металу, прослизанням привідних валків, випинання твердої корки під кристалізатором та тощо [6].

В цілому за винятком будь-яких стохастичних чинників, присутніх під час розливання, поверхневі стоячі хвилі з великою амплітудою і зміна рівня металу в кристалізаторі (наприклад, під час операції «очищення» стакану-дозатора) є двома основними контрольованими причинами, які зумовлюють флуктуації поверхні металу в кристалізаторі.

На думку багатьох дослідників, утворенню стоячих хвиль на поверхні металу в кристалізаторі сприяють верхні циркуляційні потоки, що формуються при витіканні сталі з випускних отворів зануреного стакану і відбиваються від вузьких граней кристалізатора. Не зважаючи на можливе відбиття від зовнішньої поверхні зануреного стакану, можна допустити, що поверхнева і відбита хвилі мають однакову частоту і амплітуду, але протилежний напрямок руху.

Якщо відстань між вузькими гранями кристалізатора дорівнює або кратна деякій довжині хвилі, то накладення поверхневої і відбитої хвилі буде сприяти формуванню стоячих хвиль. Зважаючи на той факт, що амплітуда стоячих хвиль вдвічі більша за амплітуду когерентних хвиль, то при формуванні стоячих хвиль будуть спостерігатися великі коливання поверхні і сплески металу. Наприклад, коливання хвиль з великою амплітудою зазвичай спостерігається під час запуску процесу лиття, а також при зміні швидкості руху заготовки. Таким чином, виникнення і розвиток стоячих хвиль можна розглядати як динамічну систему, яка формується у верхній частині рідкої ванни кристалізатора і залежить від певної сукупності технологічних факторів.

Поведінка стоячих хвиль добре вивчена в численних дослідженнях. При цьому власна частота цих коливань залежить від ширини кристалізатора і добре описується рівнянням [7]:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{g \cdot \pi \frac{m}{b}},$$

де f – частота коливань, Гц; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; $\pi = 3,14$; $m = 1, 2, 3, 4 \dots$ (мода хвилі); b – ширина слябу біля дзеркала металу в кристалізаторі, м.

Плавлення і кристалізація

Відомо, що існують симетричні і несиметричні форми розташування стоячих хвиль. Прояв тієї чи іншої форми стоячих хвиль багато в чому залежить від динаміки розвитку переважаючих в верхній частині кристалізатора циркуляційних потоків металу.

З використанням фізичної моделі в лабораторних умовах було здійснено дослідження процесу утворення стоячих хвиль на поверхні рідини в кристалізаторі, а також дослідження маловивчених ефектів в стоячих хвилях, збуджуваних в двошаровій рідині [8].

Для цього на рухому платформу, що виконувала роль столу гойдання, була встановлена і жорстко закріплена прозора ємність, яка імітувала кристалізатор. В якості рідини, що імітувала рідку сталь, використовувалася вода (кінематична в'язкість – $0,01012 \text{ см}^2/\text{с}$; динамічна в'язкість – $0,00101 \text{ Па}\cdot\text{с}$). На поверхню води наливався тонкий (7 – 8 мм) шар трансформаторного масла (динамічна в'язкість $0,33 \text{ Па}\cdot\text{с}$), що дозволило імітувати взаємну поведінку рідкої сталі і розплаву ШУС. Зважаючи на те, що за утворення хвиль на поверхні рідини в результаті впливу зворотньо-поступального руху кристалізатора відбуваються процеси, що динамічно розвиваються, то умови гідродинамічної подібності були дотримані за рахунок рівності числа Фруда для моделі і натурального зразка.

Під час моделювання явища виникнення хвиль в середовищі «вода-масло» встановлено, що за певної частоти коливань платформи на поверхні моделюючого середовища спочатку виникали стоячі хвилі невеликої амплітуди (рис. 1 а).

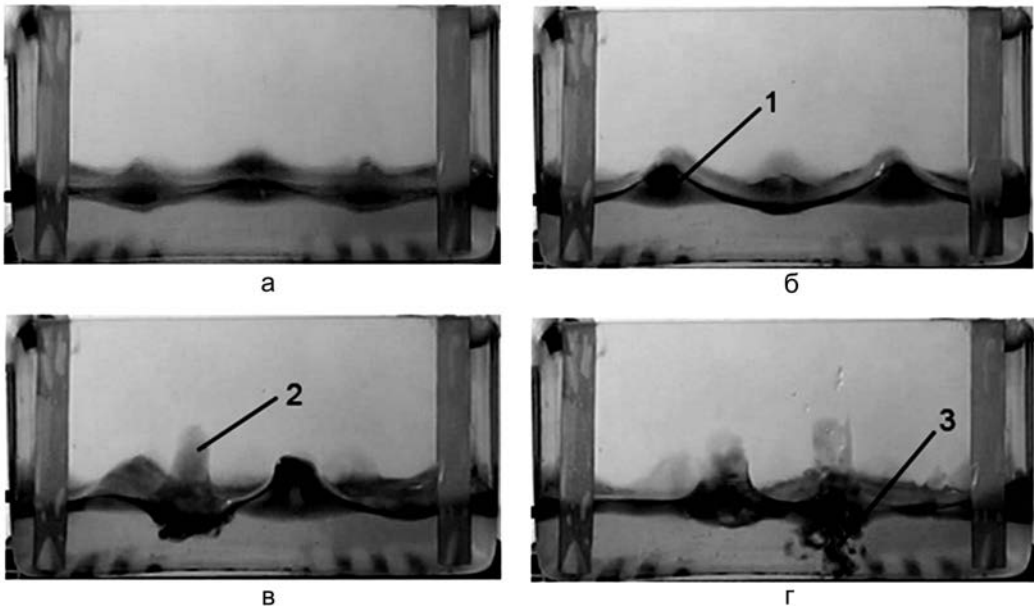


Рис. 1. Явище розвитку стоячих хвиль на поверхні рідини в кристалізаторі і зтягування частинок масла в результаті руйнування стоячих хвиль: 1 – гребінь стоячої хвилі на меніску; 2 – сплеск масла на поверхні меніску; 3 – залучення в рідку ванну масла з поверхні меніску.

Ці хвилі поступово переміщували масло до улоговин, що сформувалися при утворенні стоячих хвиль. При переході поверхні дзеркала

Плавлення і кристалізація

від улоговини до гребеня масло займало позицію в області верхньої частини гребеня (рис. 1 б). За цих умов в областях, близьких до вузлів стоячих хвиль, спостерігалось оголення поверхні води. У міру накопичення масла висота стоячих хвиль помітно зростала. За певної інтенсивності коливань стоячі хвилі досягали критичної висоти, після чого відбувалось їх руйнування, з утворенням струменів і бризок. Наслідком різкого збільшення хвилювань на поверхні рідини в кристалізаторі є затягування частинок масла всередину рідкої ванни, що на практиці призводить до забруднення сталі шлаковими включеннями (рис. 1 в, г).

Конфігурація шару масла уздовж широкої грані для двовузлових стоячих хвиль схематично проілюстрована на рис. 2. Схема отримана за допомогою відеозйомки процесу коливань системи «вода-масло» в кристалізаторі.

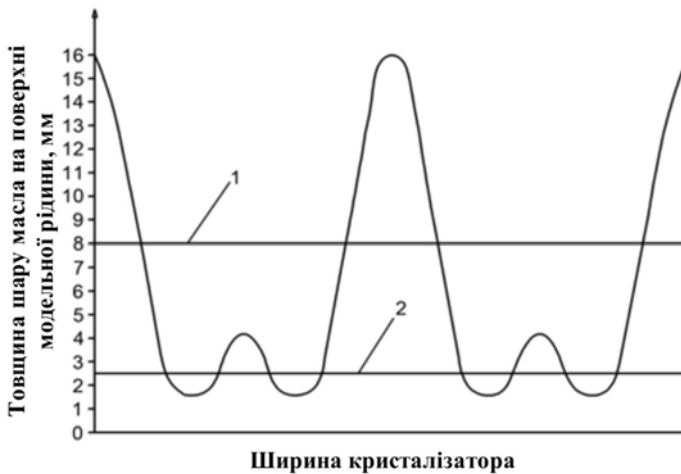


Рис. 2. Зміна товщини шару масла по довжині кристалізатора: 1 – рівень масла на поверхні модельної рідини за відсутності стоячих хвиль на меніску; 2 – рівень областей меніска з мінімальною товщиною шару масла.

В цілому найбільш важливим результатом моделювання слід вважати той факт, що в процесі розвитку стоячих хвиль рідка ШУС розподіляється по дзеркалу металу нерівномірно. Оскільки рідка ШУС повинна затікати в зазор між твердою коркою слябу і робочою поверхнею кристалізатора, виконуючи функцію мастила, можна стверджувати, що нерівномірний розподіл ШУС по периметру кристалізатора може призводити до того, що певні ділянки твердої корки слябу, зважаючи на недостатню кількість мастила, можуть контактувати безпосередньо зі стінками кристалізатора. У цьому випадку можливі негативні технологічні прояви, пов'язані з підвищенням інтенсивності відведення тепла і прилипанням окремих ділянок корки до робочої поверхні кристалізатора. Розвитком цієї ситуації може бути подальший прорив твердої корки і витікання з неї рідкої сталі.

Наступні дослідження виконувалися в промислових умовах на двоструменевій слябовій МБЛЗ, оснащений автоматизованою системою управління роботою кристалізатора «MoldExpert». Вона дозволяє фіксувати в безперервному режимі рівень металу в кристалізаторі, розташування

стопора в проміжному ковші, швидкість руху заготовки та ін. Характерна діаграма зміни рівня металу в кристалізаторі при розвитку стоячих хвиль представлена на рис. 3.

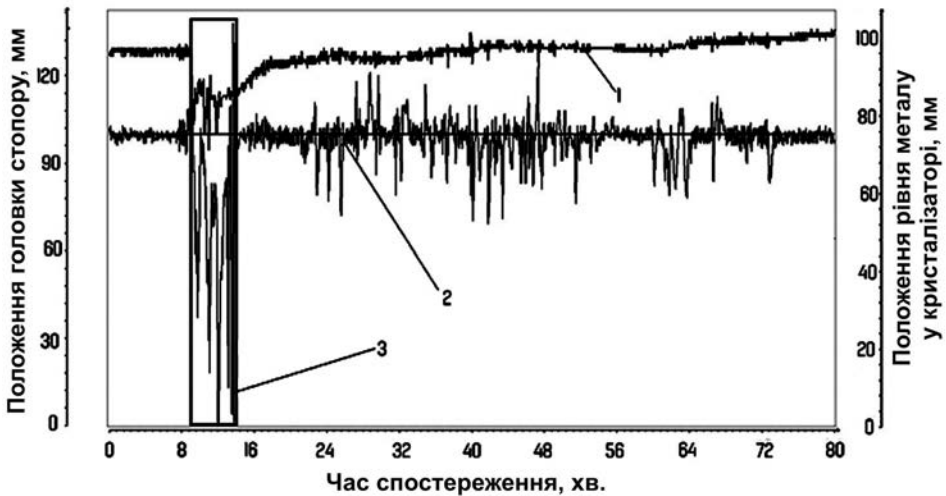


Рис. 3. Діаграма коливань рівня металу в кристалізаторі в процесі розливання, що фіксується системою «MoldExpert»: 1 – положення головки стопора; 2 – рівень металу в кристалізаторі; 3 – коливання рівня металу в кристалізаторі при значному зниженні швидкості лиття.

Для оцінки впливу основних технологічних факторів на розвиток стоячих хвиль в кристалізаторі зроблено вибірку з 458 плавок. Встановлено, що амплітуда коливань поверхні металу може змінюватися у межах (0,1 – 0,3 м), досягаючи в окремих випадках величини 0,35 – 0,45 м. Такий великий розмах коливань викликає аварійну ситуацію в роботі системи підтримки рівня і може призвести до зупинки струмка металу. Характерним є те, що стоячі хвилі виникають і розвиваються в кристалізаторі досить швидко і при цьому можуть існувати від кількох хвилин до кількох десятків хвилин. При цьому крім стабільних стоячих хвиль спостерігаються сплески з розмахом коливань в кілька разів більшим, ніж стоячі хвилі. На наш погляд такі сплески можуть суттєво впливати на характер проникнення рідкої ШУС в зазор між робочою стінкою кристалізатора і твердою коркою заготовки. Відповідно на деяких ділянках периметра заготовки в зазор може потрапляти недостатня кількість рідкої ШУС і захоплюватися певна кількість твердої і розм'якшеної суміші. Відповідно умови тепловідведення і твердіння корки на таких ділянках будуть відрізнятися від умов та наявності рідкого прошарку ШУС.

В результаті встановлено, що основні ситуації, які передували виникненню стоячих хвиль, в цілому зумовлені наступними факторами:

- різке зменшення швидкості витягування заготовки, пов'язане зі спрацьовуванням системи, що попереджає прорив корки;
- значні коливання стопора-моноблока (наприклад, під час «очищення» стакан-дозатора при його заростанні);
- збільшення швидкості витягування заготовки при переході на розливання вужчого сляба;

Плавлення і кристалізація

- збільшення витрат аргону, що вдувається через стопор;
- зменшення швидкості руху заготовки при заміні сталерозливального ковша;
- періодичне прослизання заготовки в привідних валках.

В ході досліджень було також проведено аналіз частоти виникнення хвиль в кристалізаторі при розливанні слябів різної ширини в діапазоні 1200 – 1900 мм з кроком 100 мм. Як видно з даних, наведених у таблиці, більше 60 % випадків виникнення стоячих хвиль слід відносити до розливання слябів меншої ширини (1200 – 1400 мм). На наш погляд, це слід пов'язувати з розвитком циркуляційних потоків у верхній частині рідкої ванни кристалізатора, які за певних умов (заростання вихідних отворів заглибного стакану і несиметричної течії) сприяють «розгойдуванню» дзеркала металу.

Частота виникнення стоячих хвиль для слябів різної ширини

Ширина сляба, мм	1200 – 1300	> 1300 – ≤ 1400	> 1400 – ≤ 1500	> 1500 – ≤ 1600	> 1600 – ≤ 1700	> 1700 – ≤ 1800	> 1800 – ≤ 1900
Частота виникнення стоячих хвиль, %	38,9	23,4	15,3	10,5	6,2	3,5	2,2

При подальшому дослідженні ситуації з розвитком стоячих хвиль в кристалізаторі встановлено, що в переважній більшості випадків проривів твердої корки під кристалізатором (досліджено 8 проривів) автоматична система фіксувала розвиток досить високих стоячих хвиль. На рис. 4 представлена діаграма зміни рівня металу в кристалізаторі з моменту старту МБЛЗ до прориву (всього 39 хвилин розливання). У наведеному випадку

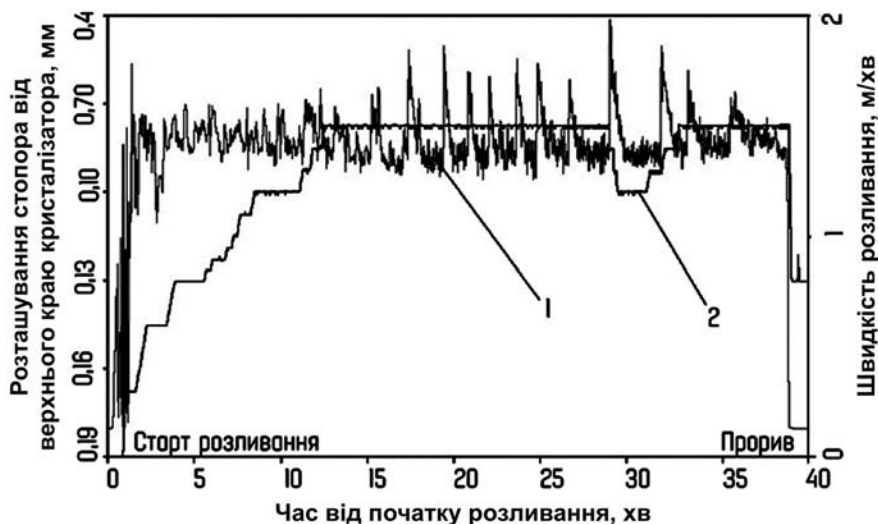


Рис. 4. Коливання рівня металу в кристалізаторі від старту розливання до утворення прориву: 1 – рівень металу в кристалізаторі; 2 – швидкість витягування заготовки.

стоячі хвилі і флуктуації спостерігалися протягом всього циклу розливання. Прориву передувало спрацьовування системи попередження прориву і зменшення швидкості витяжки заготовки (позиція 2), що значно зменшило розмах коливань поверхні металу. Однак, при подальшому збільшенні швидкості розливання до номінальної розмах коливань знову збільшився.

Характер впливу стоячих хвиль і сплесків в кристалізаторі слябової МБЛЗ на якість поверхні заготовки представлений на рис. 5. Зразок заготовки був відібраний з твердого «каркасу» слябової заготовки після прориву на відстані 1150 мм нижче прориву.

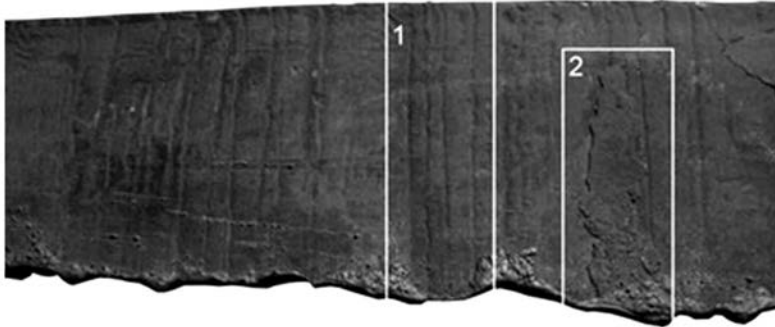


Рис. 5. Розташування складок (1) і «залікована» після прориву корки в кристалізаторі ділянка заготовки (2).

Таким чином, виконані дослідження підтверджують, що розвиток стоячих хвиль і флуктуацій (сплесків) на поверхні металу в кристалізаторі слід розглядати як одну з основних причин дестабілізації процесу безперервного розливання в частині погіршення якості поверхні сляба за рахунок утворення глибоких складок, а також «залікованих» ділянок мікропроривів. Критичним проявом негативного впливу стоячих хвиль може бути прорив твердої корки під кристалізатором.

Беручи до уваги той факт, що найбільш імовірною і менш дослідженою причиною утворення стоячих хвиль на поверхні металу в кристалізаторі є несиметричний рух циркуляційних потоків і їх зіткнення у верхній частині його рідкої ванни. Можна припустити, що для забезпечення стабільного процесу розливання слід мінімізувати заростання внутрішньої порожнини і вихідних отворів заглибного стакану. Більш того в якості фактора, що дозволяє зменшити розвиток стоячих хвиль, слід розглядати зниження на деякий час швидкості витяжки заготовки, що забезпечує певну трансформацію циркуляційних потоків в кристалізаторі і стабілізацію процесу розливання.

Література

1. Mathematical Mould Level Model based on Numerical Simulations and Water Model Experiments / M.Javurek, M. Thumfart, K.Rieger and M.Hirschmanner // Proceedings of the 6th European Conference on Continuous Casting. –Riccione: 2008.

2. A Novel Submerged Entry Nozzle for High Casting Speeds / Shung-Sheng Kao, Hsin-Chin Kua, O.Wiense.a. // Proceedings of the 7th European Conference on Continuous Casting. – Dusseldorf: 2011.
3. Смирнов А.Н., Куберский С.В., Штепан Е.В. Непрерывная разливка стали. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
4. Thomas B.G., Vanka, S.P., Quan Yuan. Study of transient flow and particle transport in continuous steel caster molds. Part 1. Fluid flow. // Metall. Mater. Trans. B, (2004). 35B (4). – P. 685 – 702.
5. Dauby P.H. Real Flows in Continuous Casting Molds // Iron and Steel Technology, (2011). 8(11). – P. 151 – 160.
6. Kamal M.; Sahai Y. A simple innovation in continuous casting mould technology for fluid flow and surface standing waves control // ISIJ International, 46(2006). – No. 12. – P. 1823 – 1832.
7. Hirschmanner M., Morvald K., Frohlich C. Next Generation Mold Level Control: Development of LevCon 2.0 // Materials and Manufacturing Processes. – 2011. – Vol. 26. Issue 1. – P. 169 – 174.
8. Смирнов А.Н., Антыкуз О.В. Влияние возвратно-поступательного движения кристаллизатора на образование волн // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – №7. – С. 235 – 237.

References

1. Mathematical Mould Level Model based on Numerical Simulations and Water Model Experiments / M.Javurek, M. Thumfart, K.Rieger and M.Hirschmanner // Proceedings of the 6th European Conference on Continuous Casting. – Riccione: 2008.
2. A Novel Submerged Entry Nozzle for High Casting Speeds / Shung-Sheng Kao, Hsin-Chin Kua, O.Wiense e.a. // Proceedings of the 7th European Conference on Continuous Casting. – Dusseldorf: 2011.
3. Smirnov A.N., Kuberskiy S.V., Shtepan E.V. Neprerivnaiy razlivka stali. // – Donetsk: DonNTU, 2011. – 482 s.
4. Thomas B.G., Vanka, S.P., Quan Yuan. Study of transient flow and particle transport in continuous steel caster molds. Part 1. Fluid flow. // Metall. Mater. Trans. B, (2004). 35B (4). – P. 685 – 702.
5. Dauby P.H. Real Flows in Continuous Casting Molds. // Iron and Steel Technology, (2011). 8(11). – P. 151 – 160.
6. Kamal M.; Sahai Y. A simple innovation in continuous casting mould technology for fluid flow and surface standing waves control // ISIJ International, 46(2006). – No. 12. – P. 1823 – 1832.
7. Hirschmanner M., Morvald K., Frohlich C. Next Generation Mold Level Control: Development of LevCon 2.0 // Materials and Manufacturing Processes. – 2011. – Vol. 26. Issue 1. – P. 169 – 174.
8. Smirnov A.N., Antikuz O.V. Vliyanie vozvratno-postupatel'nogo dvizheniy kristallizatora na obrazovanie voln // Metallurgicheskaiy i gornorudnaiy promishlenost. – 2010. – №7. – S. 235 – 237.

Одержано 06.12.2017

А. Н. Смирнов, А. П. Верзилов, С. В. Куберский

Влияние периодических колебаний и флуктуаций уровня металла в кристаллизаторе на процесс непрерывной разливки

Резюме

Проанализированы причины возникновения волновых процессов на поверхности жидкого металла при непрерывной разливке слэбов. Показано влияние флуктуаций уровня металла в кристаллизаторе на возникновение аварийных ситуаций и качество заготовки. Предложены рекомендации для снижения вероятности возникновения и развития волновых процессов.

O. M. Smirnov, O. P. Verzilov, S. V. Kuberskiy

Influence of periodic oscillations and fluctuations of the metal level in the crystallizer on the continuous casting process

Summary

The reasons of occurrence of wave processes on a surface of a liquid metal at a continuous casting of slabs are analyzed. The influence of metal level fluctuations in the crystallizer on the occurrence of emergency situations and the quality of the billet is shown. Recommendations are proposed to reduce the probability of occurrence and development of wave processes.

УДК 669.018.4.29:620.17/18

Особливості формування литої структури багатокomпонентних ніобієвих сплавів системи Nb – Ti – Al

Т. Л. Кузнєцова, кандидат технічних наук

М. П. Бродніковський, кандидат фізико-математичних наук

О. А. Рокицька

М. О. Крапівка, кандидат фізико-математичних наук

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

Досліджено особливості формування дендритної неоднорідної литої структури перспективних багатокomпонентних, в тому числі і високоентропійних, сплавів на основі ніобію, які обумовлені фізико-хімічними і теплофізичними характеристиками сплавів. Встановлена необхідність та запропоновані способи активного втручання в процес кристалізації для одержання гомогенних за хімічним складом і структурою литих бездефектних заготовок.

Науково обґрунтовано, що найбільш перспективним напрямком робіт для підвищення робочих характеристик виробів газового приводу, який