

Фізичне моделювання кристалізації зливків за умов ендогенної вібраційної обробки

В. М. Щеглов, кандидат технічних наук

С. Є. Кондратюк, доктор технічних наук, професор

В. І. Вейс

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Засобами фізичного моделювання з використанням тіосульфату натрію досліджено вплив ендогенної вібраційної обробки розплаву на кінетичні показники тверднення зливка. Встановлено закономірності формування твердої корки, зміни тривалості тверднення і коефіцієнта кристалізації модельної речовини. Показано суттєве підвищення однорідності і дисперсності структури зливка при застосуванні ендогенної віброобробки.

Розвиток сучасного машинобудування зумовлює необхідність виробництва великогабаритних сталевих виробів, що пов'язано із зростаючими вимогами щодо якості і підвищення властивостей сталевих зливків.

На сьогодні існуючі технології не завжди забезпечують необхідну якість ковальських зливків. Це пов'язано із проявами структурної, хімічної і фізичної неоднорідностей, зумовлених різними температурно-кінетичними умовами кристалізації і структуроутворення в різних об'ємах зливків великої маси, підвищеною забрудненістю металу неметалевими вкрапленнями, зокрема в донній частині зливка, та розвитком інших неконтрольованих дефектів [1].

Серед основних дефектів, що важко усуваються слід відзначити Λ -подібну зональну, V-подібну осьову сегрегації, а також донний конус від'ємної ліквіації, в якому зосереджується значна кількість неметалевих вкраплень.

Для зменшення негативного впливу вказаних дефектів і їх часткового усунення використовують технологічні засоби зовнішнього впливу на метал під час кристалізації – електромагнітне перемішування, продувку інертним газом, обробку ультразвуком, віброобробку тощо [2]. Щодо останньої, то вібраційні методи обробки розплаву, що кристалізується, знайшли досить широке застосування для покращення якості і підвищення властивостей виливків.

Проте для великих мас металу ковальських зливків використання цієї технології за класичною схемою зовнішньої вібраційної обробки металу у виливниці є дуже складною задачею, пов'язаною з великими енергетичними і фінансовими витратами. Для великих ковальських зливків

перспективним може бути введення низькочастотних коливань безпосередньо у розплав зливка, що кристалізується, за допомогою зануреного у надливну частину зливка активатора вібрації з вогнетривкого матеріалу. Нашими попередніми дослідженнями впливу такої ендогенної вібраційної обробки зливоків вуглецевої і низьколегованої сталей масою 8 – 10 т показано доцільність такої технологічної схеми [3].

Слід відзначити, що проблема одержання великих ковальських зливоків потрібної якості пов'язана перш за все з проблемою керування процесами кристалізації і структуроутворення з метою зменшення ліквації, структурної неоднорідності і кількості великих неметалевих фаз. Вирішення

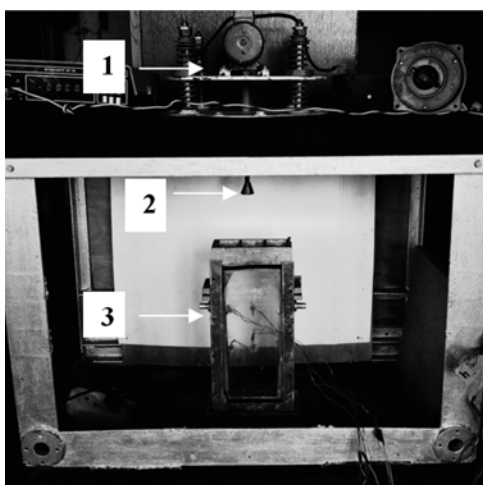


Рис. 1. Обладнання для проведення фізичного моделювання. 1 – вібраційний стіл, 2 – активатор, 3 – виливниця.

цих проблем зумовлює необхідність більш глибокого вивчення закономірностей тверднення сталевих зливоків, зокрема за умови зовнішніх впливів на рідкий і тверднучий метал.

Виходячи з цього засобами фізичного моделювання досліджено вплив ендогенної вібраційної обробки на процеси тверднення зливка з використанням в якості модельного матеріалу пентагідрат тіосульфату натрію ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Для моделювання процесу виготовлено лабораторну установку (рис. 1), яка імітувала повздовжній переріз зливка в масштабі 1:10.

Вібрація передається до розплаву у надливній частині зливка,

що кристалізується, за допомогою активатора жорстко закріпленого на вібраційному столі. Вібраційну обробку здійснювали за частоти 50 Гц і амплітуді 1 мм. Розплав модельного матеріалу заливали у водоохолоджувану форму (20 °С) за температури 85 °С.

Порівняльний аналіз процесів тверднення модельного зливка за звичайних умов (рис. 2) і за умов ендогенної вібраційної обробки (рис. 3) розплаву показав суттєві відмінності у кінетиці цих процесів. Результати представлені на рисунках свідчать про зміну коефіцієнта кристалізації у часі від початку заливання розплаву модельної речовини.

На початковій стадії тверднення зливка (10 – 20 хв) характер наростання твердої фази (корки) від стінок виливниці відрізняється незначно. Дещо прискорений ріст її в донній частині виливниці зумовлений її геометричними параметрами та умовами тепловідбору в ній.

Надалі в зоні дії активатора вібрації, зануреного у надливну частину зливка, утворюється велика кількість зародків кристалізації (мікрочисталів), що розповсюджуються на сусідні об'єми розплаву і під дією гравітації опускаються в донну частину зливка (рис. 3). При цьому

Плавлення і кристалізація

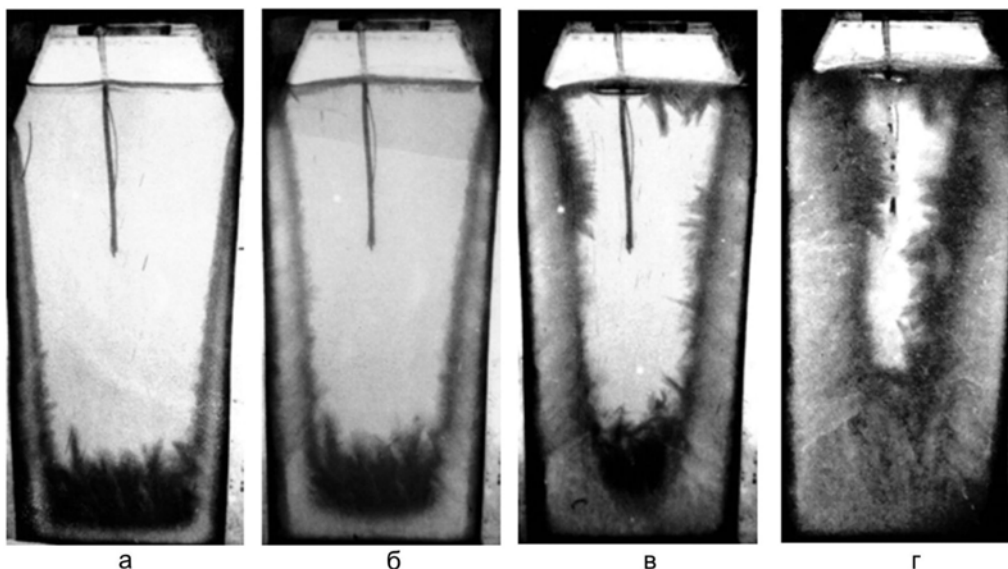


Рис. 2. Кінетика тверднення модельної речовини за звичайних умов. а – 20 хв, б – 30 хв, в – 50 хв, г – 90 хв.

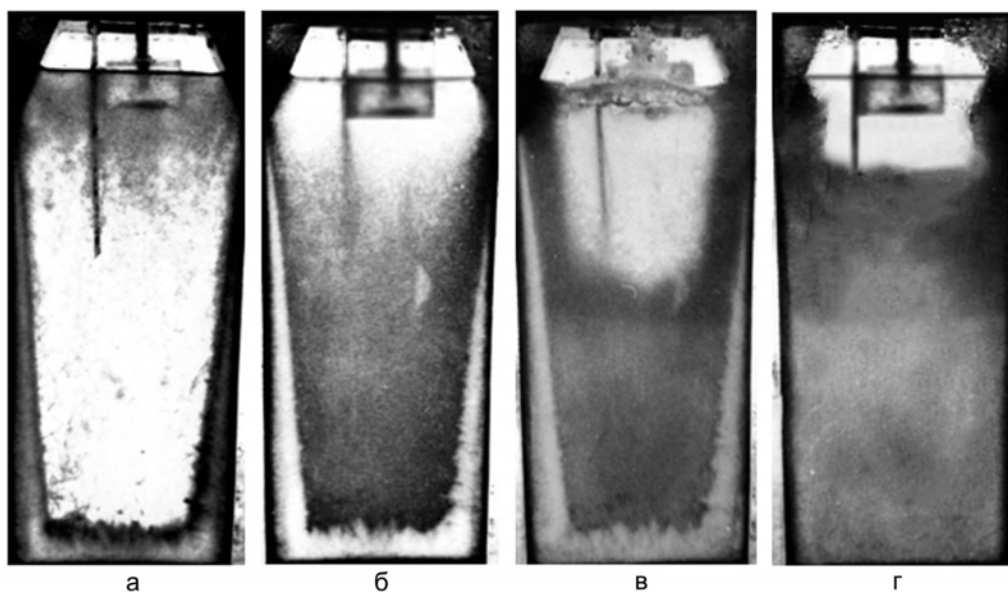


Рис. 3. Кінетика тверднення модельної речовини за умов вібраційної обробки. а – 10 хв, б – 20 хв, в – 35 хв, г – 60 хв.

суттєво зменшується зона порожнини усадки зливка і підвищуються кінетичні характеристики тверднення – товщина твердої корки і коефіцієнт кристалізації.

Встановлено, що товщина твердої корки біля стінок виливниці і в донній її частині (рис. 4) протягом всього часу тверднення за умов вібраційної обробки розплаву перевищує у 1,5 – 2,0 рази товщину корки

Плавлення і кристалізація

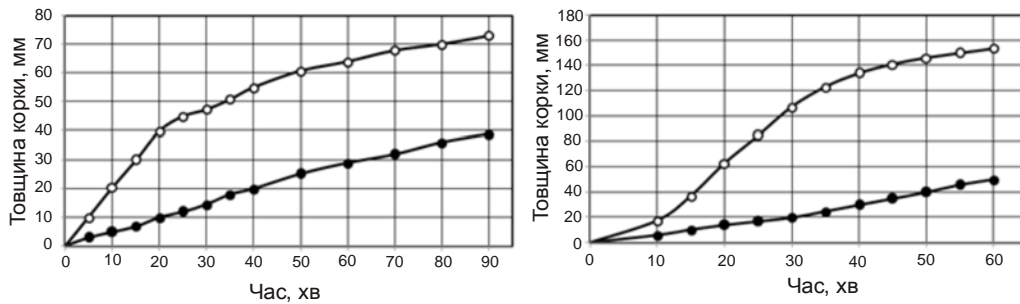


Рис. 4. Зміна товщини корки біля стінок (●) та дна (○) виливниці при кристалізації зливка за звичайних умов (а) і за умов ендогенної вібраційної обробки (б).

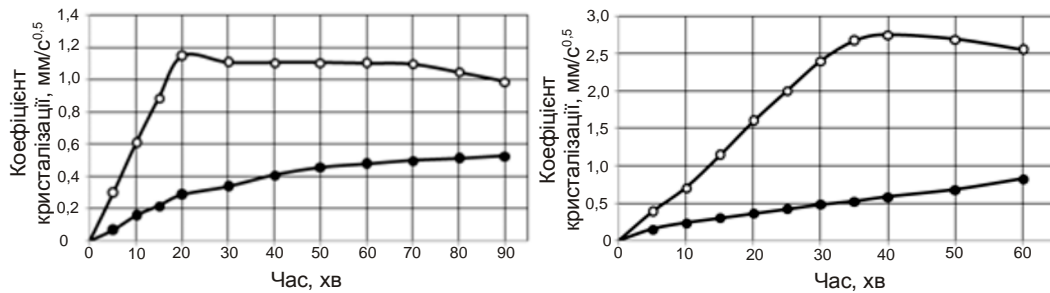


Рис. 5. Зміна коефіцієнту кристалізації біля стінок (●) та дна (○) виливниці при кристалізації зливка за звичайних умов (а) і за умов ендогенної вібраційної обробки (б).

тверднучого зливка, що формувався за звичайних умов. Подібним чином змінюються у часі і показники коефіцієнту кристалізації (рис. 5).

Встановлені закономірності узгоджуються з результатами зміни температурних показників розплаву протягом всього часу тверднення модельних злиwkів за двома режимами – за умов ендогенної вібраційної обробки і без такої (рис. 6). Судячи з кривих охолодження розплавів модельної речовини, вони від температури розливки (~ 85 °С)

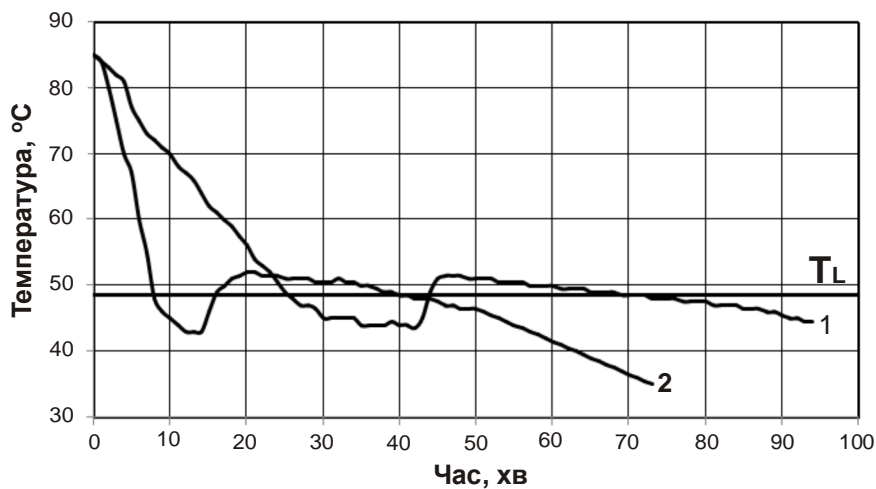


Рис. 6. Криві охолодження при твердненні зливка модельної речовини за умов вібрації (2) та без неї (1).

переохолоджуються до температури близько 45 °С з різною швидкістю – найбільшою при застосуванні вібраційної обробки. При цьому утворення твердої корки і зазору між стінкою виливниці і зливком також відбувається значно швидше в інтервалі 8 – 15 хв при досягненні розплавом температури нижче температури ліквідус (48,5 °С). За умов звичайного тверднення ці процеси відбуваються в інтервалі 25 – 42 хв. Наступне різке підвищення температури розплаву зливків, що кристалізуються, зумовлено зміною режиму тепловідбору у зв'язку з утворенням газового зазору і виділенням теплоти кристалізації [4, 5]. Подальший процес тверднення зливків відбувається за умов більш рівномірного охолодження і завершується після 50 хв (вібраційна обробка) і після 90 хв за звичайних умов.

Тобто в результаті віброобробки суттєво зростає швидкість кристалізації зливка, за рахунок чого час його повного тверднення скорочується на 45 %.

Таким чином встановлено, що при застосуванні активатора вібрації у надливній частині зливка під час його тверднення досягається формування більш однорідної дрібнозеренної структури за рахунок ендогенної інокуляції, що може бути реалізовано при виробництві великих сталевих ковальських зливків для усунення проявів ліквациї, макронеоднорідності структури, зокрема в донній частині, і підвищення фізико-механічних властивостей великогабаритних виробів з них.

Література

1. Jun Li, Menghuai Wu, Andreas Ludwig, Abdeallah Kharicha. Simulation of macrosegregation in a 2.45-ton steel ingot using a three-phase mixed columnar-equiaxed model // *International journal of heat and mass transfer* 72. – 2014. – P. 668 – 679.
2. Щеглов В. М. До проблеми якості великих ковальських зливків // *Металознавство та обробка металів*. 2016. – № 3. – С. 49 – 52.
3. Ефимов В. А., Щеглов В. М. Вибрационная обработка стальных слитков в процессе кристаллизации // *Процессы разливки стали и качество слитка*. Сб. науч. Тр. ИИПЛ АН УССР. – Киев, 1989. – С. 4 – 11.
4. Бестужев Н. И., Бестужев А.Н. Кластерный механизм образования зародышей и закономерности кристаллизации литейных сплавов. // *Литье и металлургия*. – 2005. – № 3. – С. 37 – 42.
5. Гаврилин И. В. О конкурентной теории кристаллизации // *Литейное производство*. – 1998. – №10.

References

1. Jun Li, Menghuai Wu, Andreas Ludwig, Abdeallah Kharicha. (2014). Simulation of macrosegregation in a 2.45-ton steel ingot using a three-phase mixed columnar-equiaxed model. *International journal of heat and mass transfer*, 72, p. 668 – 679. [in English].
2. Shcheglov V. M. (2016). Do problemy yakosti velykyh koval's'kyh zlyvkviv [To the problem of quality of large forging ingots]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv – Metallurgy and metal treatment*, 3, p. 49 – 52. [in Ukrainian]

3. Efimov V. A., Shcheglov V. M. (1989). Vibracionnaja obrabotka stal'nyh slitkov v processe kristallizacii [Vibration treatment of steel ingots during the crystallization process]. *Sbornik nauchnih trydov: Processu razlivki stali i kachestvo slitka – Collection of scientific works: Steel casting and ingot quality.* (p. 4 – 11). Kiev: IPL AN USSR [in Russian].
4. Bestuzhev N. Y., Bestuzhev A.N. (2005). Klasternyj mehanizm obrazovaniya zarodyshej i zakonmernosti kristallizacii litejnyh splavov [Cluster mechanism of nucleation and laws of crystallization of foundry alloys]. *Lit'e i metalurgiya – Casting and metalurgy*, 3, P. 37 – 42. [in Russian].
5. Gavrilin I. V. (1998). O konkurentnoj teorii kristallizacii [On the competitive theory of crystallization]. *Liteinoe proizvodstvo – Foundry*, 10. [in Russian].

Одержано 25.01.18

В. М. Щеглов, С. Е. Кондратюк, В. И. Вейс

Физическое моделирование кристаллизации слитков под действием эндогенной вибрационной обработки

Резюме

Средствами физического моделирования с использованием тиосульфата натрия исследовано влияние эндогенной вибрационной обработки расплава на кинетические характеристики затвердевания слитка. Установлены закономерности формирования твердой корки, изменения продолжительности затвердевания и коэффициента кристаллизации модельного вещества. Показано существенное повышение однородности и дисперсности структуры слитка при применении эндогенной виброобработки.

V. M. Shcheglov, S. Ye. Kondratyuk, V. I. Veis

Modelling of the process of endogenous vibration treatment of ingots at crystallization

Summary

The influence of endogenous vibration treatment of the melt on the kinetic characteristics of solidification of the ingot was studied by using modeling on sodium thiosulfate. Pattern formation of solid phase, change in the duration of solidification and coefficient of crystallization of modeling material were established. A significant increase in the uniformity and dispersion of the ingot structure due to endogenous vibration treatment was shown.