

МЕТАЛУРГІЯ СТАЛІ

УДК 621.744.044:669.18

© Макуров С.Л.¹, Силкін Д.В.²

НОВЫЙ КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ СТАЛЬНОГО СЛИТКА

В статье рассмотрены современные методы исследования кинетики кристаллизации стальных слитков. На основе анализа этих методов разработан новый комплексный метод исследования процесса кристаллизации стального слитка, позволяющий анализировать развитие фронтов как горизонтального, так и вертикального затвердевания, а также протяженность двухфазной зоны. Применением метода экспериментально определена константа затвердевания стального слитка и закономерность затвердевания.

Ключевые слова: *стальной слиток, кристаллизация, кинетика затвердевания, зондирование, внешние воздействия, методы исследования.*

Макуров С.Л., Силкін Д.В. Новий комплексний метод дослідження процесу затвердіння сталевих злитків. У статті розглянуті сучасні методи дослідження кінетики кристалізації сталевих злитків. На основі аналізу цих методів розроблен новий комплексний метод дослідження процесу кристалізації сталевих злитків, що дозволяє аналізувати розвиток фронтів як горизонтального, так і вертикального затвердіння, а також протяжність двофазної зони. Застосуванням методу експериментально визначена константа затвердіння сталевих злитків і закономірність затвердіння.

Ключові слова: *сталевий злиток, кристалізація, кінетика затвердіння, зондування, зовнішні впливи, методи дослідження.*

S.L. Makurov, D.V. Silkin. New complex method of steel ingot solidification research.
The article describes the modern methods of steel ingot solidification process. Based on the analysis of these methods was developed a new complex method of steel ingot solidification research, which allows to analyze the evolution of both horizontal and vertical solidification fronts, as well as the length of the two-phase zone. Application of this method made it possible to develop steel ingot solidification constant as well as regularities of solidification.

Keywords: *steel ingot, crystallization, solidification kinetics, probing, external influences, research methods.*

Постановка проблемы. Формирование слитка является сложным комплексом физико-химических и теплофизических процессов, изучение которых – необходимая предпосылка для разработки оптимальных технологических режимов производства слитков, обеспечивающих высокий выход годного металла, минимальное развитие неоднородности и усадочных эффектов, а также высокую стойкость изложниц.

При решении проблемы получения качественных слитков необходимо иметь четкое представление о механизме его затвердевания, глубже изучить этот процесс с применением различных методик исследования.

Анализ последних исследований и публикаций. Методы исследования процесса затвердевания стальных слитков согласно [1] подразделяются на разрушающие (требующие от-

¹ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, demetheris@gmail.com

браковки или порезки слитков) и неразрушающие.

К первой группе методов относятся: термический анализ металла внутри изложницы или в ее стенке, опрокидывание изложницы (выливание жидкого остатка), ввод индикатора.

Метод измерения температуры металла в различных точках затвердевающего слитка применяется для определения температурных градиентов и кинетики продвижения фронта кристаллизации в слитках различной массы - от нескольких килограммов до 80 т [2].

Теоретические основы метода расчета процесса кристаллизации слитка по температурному полю изложницы подробно разработаны Г.П. Иванцовым [3] и А.И. Вейником [4]. Дальнейшее совершенствование этого метода позволит использовать его главное преимущество - сравнительную простоту температурных измерений в изложнице.

Методы измерения температуры в слитках и изложницах позволяют получать только косвенные данные о процессе роста твердой фазы. Для получения прямых данных пользуются методами выливания жидкого остатка (опрокидывания изложницы) и ввода индикатора, однако проведение исследований данными методами на нескольких слитках неоправданно дорого.

Для выявления конфигурации твердо-жидкой зоны представляет интерес метод взрыва [5]. При периодическом введении ампул (зарядов) с небольшим количеством взрывчатого вещества (1-5 г) в незатвердевшую сердцевину слитка в результате гидравлического удара происходит практически мгновенное уплотнение дендритной структуры и выдавливание ликватов из междендритных промежутков двухфазной зоны. На серном отпечатке продольного темплета слитка легко выявляются белые полосы отрицательной ликвации серы, а на поперечных темплетах от слитка и проката - серия «ликвационных квадратов», соответствующих моментам ввода зарядов.

Большие возможности для исследования процесса формирования крупных слитков предоставляют неразрушающие методы дифференцированного [6] и горизонтального [7] зондирования.

Таким образом, прямые экспериментальные методы исследования процесса затвердевания стальных слитков достаточно трудоемки и связаны в большинстве случаев с большими материальными затратами и потерями металла, поэтому для предварительных исследований пользуются методами физического моделирования.

Целью статьи является разработка и теоретическое обоснование нового комплексного метода исследования процесса кристаллизации стального слитка, изучение факторов, влияющих на механизм затвердевания и разработка рекомендаций по улучшению качества слитков на основе данных полученных при помощи данной методики.

Изложение основного материала. Главной особенностью затвердевания крупных слитков является тот факт, что большинство из них относится к укороченному типу ($H/D < 2$) и завершает затвердевание в вертикальном направлении. Основные пороки слитков, например, шнуры внецентренной ликвации и др. образуются на стыке фронтов горизонтального и вертикального затвердевания, а также в двухфазной зоне, заполняющей центральную область слитка. Поэтому при исследовании процесса затвердевания крупных слитков необходимо анализировать развитие фронтов как горизонтального, так и вертикального затвердевания.

Для исследования кинетики горизонтального затвердевания применяли метод взрыва и горизонтального зондирования, а для исследования кинетики вертикального затвердевания – метод дифференциального зондирования.

С целью определения положения горизонтального фронта затвердевания в жидкую сердцевину слитка на глубину 0,8 м от зеркала металла периодически вводили тонкостенные (толщина стенки 0,5 мм) стальные ампулы, содержащие взрывчатое вещество (паранитротолуол). Масса одного заряда составляла 5 г, временной интервал между вводами - 10 мин.

На рис. 1 приведен фрагмент серного отпечатка, от продольного темплета опытного слитка (Ст40Х), на котором четко видны белые линии, соответствующие моментам ввода зарядов. Укачанные линии отмечают понижение содержания серы, связанное с уплотнением дендритов двухфазной зоны при гидравлическом ударе. В результате взрыва междендритная жидкость, обогащенная ликватами, вытекает в незатвердевшую часть слитка, а уплотненные дендриты, обедненные ликватами, выявляют границу твердой фазы. В этом случае на серном отпечатке продольного темплета слитка видны белые полосы отрицательной ликвации серы, а на поперечных темплетах от слитка и проката – серия «ликвационных квадратов», соответствующую

щих моментам ввода зарядов. Преимущество метода состоит не только в его быстродействии по сравнению с методом ввода индикатора (усвоение последнего объемом жидкого ядра требует определенного времени), но также в неограниченности числа вводов зарядов в слиток вплоть до распространения твердожидкой зоны на весь объем. При исследовании этим методом процесса кристаллизации в горизонтальных сечениях можно обойтись без порезки слитка, отбирая пробы от готового проката. При этом металл не загрязняется примесями и направляется по основному назначению, т.е. метод, в последнем случае, является неразрушающим.

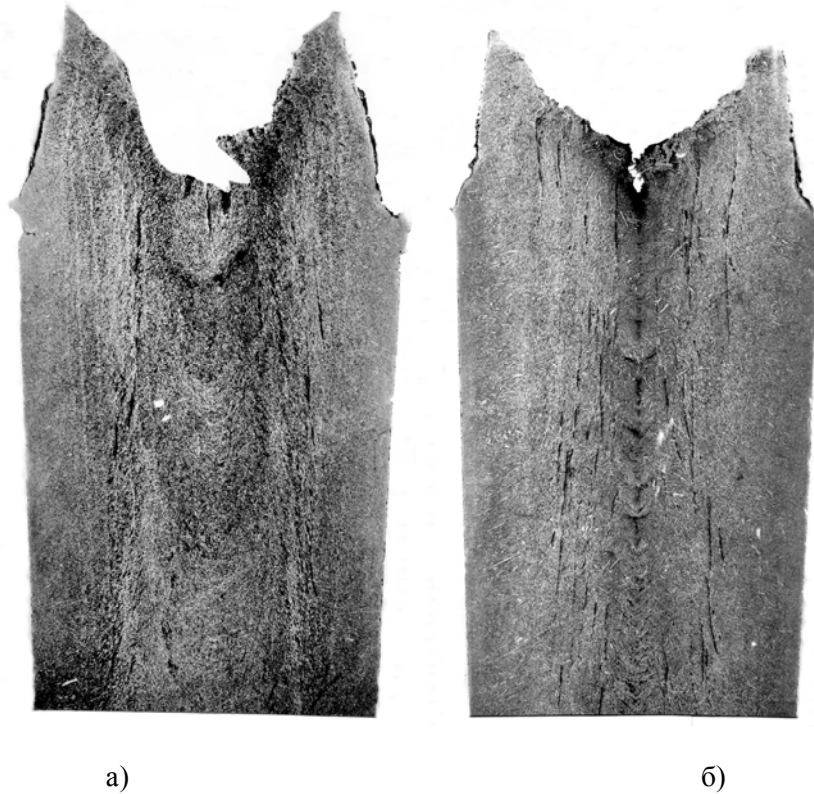


Рис. 1 – Фрагменты серных отпечатков продольных темплетов слитка: а - обработанного серией взрывов в процессе затвердевания; б - отлитого по валовой технологии

Одновременно с обработкой взрывом производили горизонтальное зондирование слитков по методике работы [8]. Горизонтальному зондированию были подвергнуты 5 опытных слитков Ст40Х. Результаты исследований показаны на рис. 2. Здесь же пунктиром показаны данные работы [8] для 23 т листового слитка, полученные горизонтальным зондированием. Приведенные данные показывают, что затвердевание исследуемого слитка хорошо подчиняется закону квадратного корня $x = k\sqrt{\tau} + C$ со значениями: $k = 24,4 \cdot 10^{-3} \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-0,5}$ и $C = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Точки, полученные методом взрыва (см. рис. 2), в общем массиве данных лежат несколько ниже основной массы точек данных горизонтального зондирования и лучше укладываются на прямую линию. Это позволяет утверждать, что метод взрыва с большей точностью выявляет фронт конца затвердевания, чем метод зондирования, и рекомендовать метод взрыва для исследования кинетики горизонтального затвердевания слитков.

Формирование области затвердевания в вертикальном направлении исследовали методом дифференциального зондирования. В результате получена классическая кривая, которая приведена на рис. 3. Ускорение затвердевания начинается примерно через час после начала отливки слитка, а развитая двухфазная зона появляется через 30 - 40 мин. Следует отметить, что кинетические кривые вертикального затвердевания слитков различной конфигурации и массы существенно различаются [6, 8 и др.] и должны определяться для каждого типа слитка индивидуально.

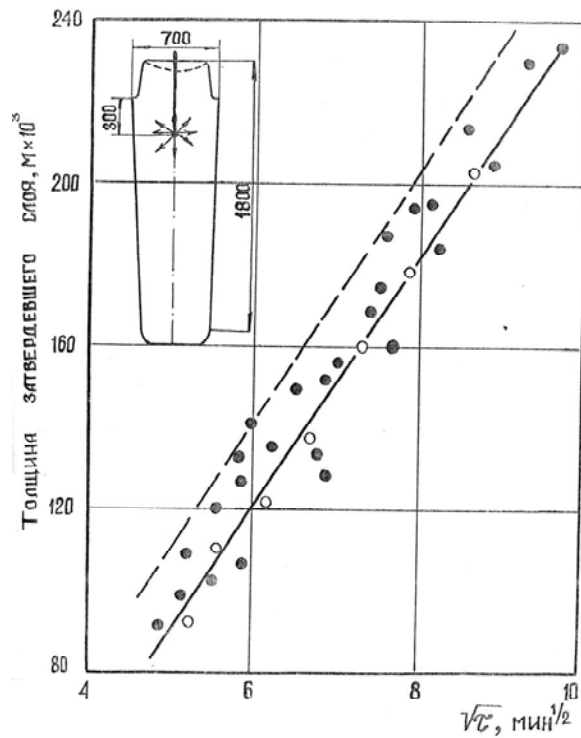


Рис. 2 – Продвижение горизонтального фронта затвердевания в слитке: ○ - выявленное методом взрыва; ● – выявленное методом горизонтального зондирования; пунктиром показаны результаты работы [8] для 23-тонного листового слитка

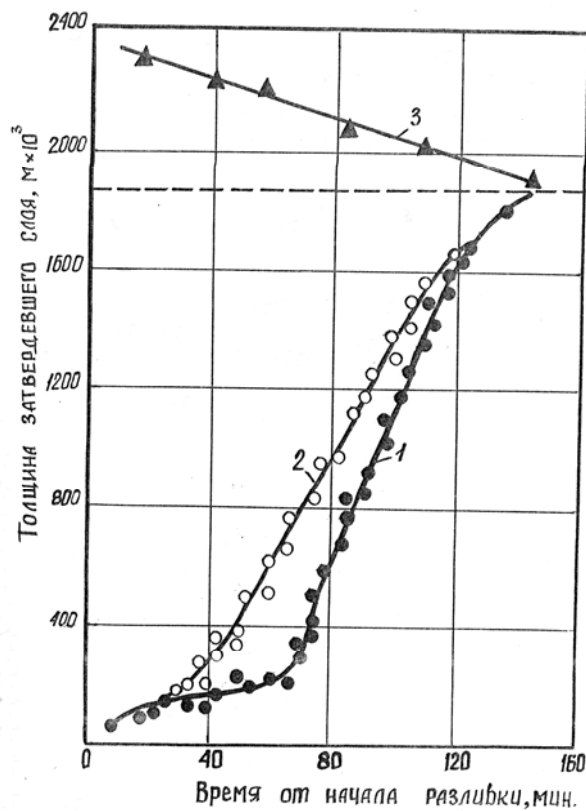


Рис. 3 – Кинетические кривые вертикального затвердевания слитка по данным зондирования пяти опытных слитков сталей: 40Х (3 плавки), 35, 45: 1 - граница твердой фазы, 2 - граница двухфазной зоны, 3 - уровень металла в прибыли

Выводы

1. Предложен новый комплексный метод исследования кинетики затвердевания стальных слитков, включающий методы взрыва и дифференцированного зондирования, что позволяет экспериментально исследовать протяженность двухфазной зоны в процессе кристаллизации.

2. Применением данного метода экспериментально установлено, что процесс затвердевания слитков различной массы на первом этапе кристаллизации происходит по закону квадратного корня с коэффициентом затвердевания $k = 21 - 26 \cdot 10^{-3} \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-0,5}$, который слабо зависит от массы слитка.

Список использованных источников:

1. Раддл Р.У. Затвердевание отливок: Пер с англ. / Под ред. В.А. Беленького. – М.:Машгиз, 1960. – 390 с.
2. Гуляев Б.Б. Затвердевание и неоднородность стали / Б.Б. Гуляев. – М.:Металлургиздат, 1950. – 228 с.
3. Иванцов Г.П. Теплообмен между слитком и изложницей / Г.П. Иванцов. – М.: Металлургиздат, 1951. – 287 с.
4. Вейник А.И. Теплообмен между слитком и изложницей / А.И. Вейник. – М.: Металлургиздат, 1959. – 357 с.
5. Макуров С.Л. Оптимизация технологических режимов разлива и затвердевания блюминговых слитков / С.Л. Макуров // Вестник ПГТУ: Сб. науч. тр. – Мариуполь, 1998. – Вып.6. – С. 44-51.
6. Скобло С.Я. Слитки для крупных поковок / С.Я. Скобло, Е.А. Казачков. – М.: Металлургия, 1973. – 247 с.
7. Казачков Е.А. Кинетика кристаллизации крупных слитков спокойной и полуспокойной стали / Е.А. Казачков, Н.И. Ревтов, В.А. Федоров // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1973. – №9. – С. 3-9.
8. Kazaczkow J.A. Kinetyka krzepniecia duzych wlewkow stalowych / J.A. Kazaczkow, N.I. Riewtow, Z. Kudlinski // Hutnik. – 1984. – №4. – P. 124-129.

Bibliography:

1. Raddl R.U. Casting solidification: Translation from English / Edited by V.A. Belenkiy. – Moscow: Mashgiz, 1960. – 390 p. (Rus.)
2. Gulyaev B.B. Steel solidification and / B.B. Gulyaev. – Moscow: Metallurgizdat, 1950. – 228 p. (Rus.)
3. Ivantsov G.P. Heat transfer between ingot and mold / G.P. Ivantsov. – Moscow: Metallurgizdat, 1951. – 287 p. (Rus.)
4. Veynik A.I. Heat transfer between ingot and mold / A.I. Veynik. – Moscow: Metallurgizdat, 1959. – 357 p. (Rus.)
5. Makurov S.L. Optimization of bloom ingot operating practices of casting and solidification / S.L. Makurov // Vestnik PSTU: Collection of scientific papers. – Mariupol, 1998. – Num.6. – P. 44-51. (Rus.)
6. Skoblo S.Y. Ingots for large forgings / S.Y. Skoblo, E.A. Kazachkov. – Moscow: Metallurgy, 1973. – 247 p. (Rus.)
7. Kazachkov E.A. Crystallization kinetics of killed and semi-killed steel large ingots / E.A. Kazachkov, N.I. Revtov, V.A. Fedorov // Izv. vuzov. Ferrous metallurgy. – 1973. – №9. – P. 3-9. (Rus.)
8. Kazachkov E.A. Coagulation kinetics of large steel ingots / E.A. Kazachkov, N.I. Revtov, Z. Kudlinski // Hutnik. – 1984. – №4. – P. 124-129. (Pol.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 30.04.2014