

Bibliography:

1. Theoretical and experimental study of the influence of parameters on the cracking casting continuous casting ingot / A.A. Poznak, V.A. Berzin, A.M. Kac [etc.] // Izv. AN LatvSSR, Ser. fiz. i tehn. nauk.– 1981. – №1. – pp. 72-79. (Rus.)
2. Simulation and optimization of the temperature field of continuous-cast strand / I.O. Mishchenko, A.V. Dub, Ye.V. Makarycheva [etc.] // Izvestiya Vuzov CHM. – 2007. – №3. – pp.15-21. (Rus.)
3. Preliminary Numerical Experiments in Multiobjective Optimization of a Metallurgical Production Process / F. Bogdan, T. Tea, S. Jožef [etc.] // Informatica. – 2007. – №3. – pp. 233-240.
4. Modernization of the secondary cooling slab caster "Ural Steel" / A.V. Kuklev, V.V. Tinyakov, A.M. Longinov [etc.] // Metallurg. – 2011. – №2. – pp. 39-41. (Rus.)
5. Comparison of existing concepts of secondary cooling cast strand in traditional slab CCM / L.V. Bulanov, N.A. Yurovskiy, V.V. Busygin [etc.] // Byulleten «Chernaya metallurgiya». – 2012. – №3. – pp. 40-50. (Rus.)
6. Fedosov A.V. Mathematical model of calculation of strand surface cooling conditions in CCM secondary cooling zone / A.V. Fedosov, E.A. Kazachkov, V.I. Burlakov // Matematychnye modelyuvannya. – 2012. – №2(27). – pp. 31-35. (Rus.)
7. Patrick B. Practical aspects of the design, operation and performance of caster spray systems / B. Patrick, B. Barber, D. Brown // La Revue de Metallurgie. – 2001. – April. – pp. 383-390.

Рецензент: А.М. Скребцов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 21.02.2012

УДК 621.744.044:669.18

© Макуров С.Л.¹, Силкин Д.В.²

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО
ГИДРОИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ПРОЦЕССЕ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ
СТАЛИ НА МАКРОСТРУКТУРУ И НЕОДНОРОДНОСТЬ КРУПНОГО
СТАЛЬНОГО СЛИТКА**

В статье рассмотрены современные теории кристаллизации и методы исследования крупных стальных слитков. Выполнен критический анализ способов воздействия на кристаллизующийся металл с целью повышения качества стальных слитков. Методом физического моделирования и экспериментальными исследованиями в производственных условиях показана возможность применения ударно-импульсного воздействия для улучшения макроструктуры слитков.

Ключевые слова: крупный слиток, внешние воздействия, кристаллизация, макроструктура, гидроимпульсный удар.

Макуров С.Л., Силкин Д.В. Дослідження впливу низькочастотної гідроімпульсної обробки в процесі затвердіння сталі на макроструктуру та неоднорідність великого сталювого злитку. У статті розглянуті сучасні теорії кристалізації і методи дослідження великих сталевих злитків. Виконано критичний аналіз способів впливу на кристалізуючийся метал з метою підвищення якості сталевих злитків. Методом фізичного моделювання та експериментальними дослідженнями у виробничих умовах показана можливість застосування ударно-імпульсного впливу для поліпшення макроструктури злитків.

Ключові слова: великий злиток, зовнішні впливи, кристалізація, макроструктура, гідроімпульсний удар.

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

² аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

S.L. Makurov, D.V. Silkin. Research of low-frequency hydro-impulse impact influence during steel crystallization process on macrostructure and non-homogeneity of large steel ingot. The article describes the modern theory of crystallization and methods of large steel ingots research. Performed was a critical analysis of ways to influence on crystallizing metal in order to improve the quality of steel ingots. By physical modeling and experimental studies in industrial conditions was proved the possibility of shock pulse impact in order to improve ingot macrostructure.

Keywords: large ingot, external influences, crystallization, macrostructure, hydro-impulse shock.

Постановка проблеми. Важнейшим процессом при получении стальных слитков является переход стали из жидкого состояния в твердое. Механизм этого процесса достаточно сложный, и для анализа явлений, происходящих при таком превращении, важно знать природу жидкого и твердого металла и свойства этих фаз вблизи температуры плавления.

При решении проблемы получения качественных литых материалов необходимо обеспечить достаточно низкое содержание неметаллических включений в металлических расплавах и получить слиток или непрерывно-литую заготовку с максимально измельченной кристаллической структурой и минимальным развитием химической неоднородности.

Анализ последних исследований и публикаций. Для решения проблемы получения максимально измельченной кристаллической структуры выдающиеся ученые М. Флэмингс, А.М. Самарин, Н.Н. Доброхотов, В.И. Явойский и другие исследователи создали ряд прогрессивных технологий выплавки и комплексного раскисления стали и новых принципов рафинирования металла, которые позволяют современной металлургии производить качественную, конкурентоспособную сталь [1].

Многочисленные экспериментальные исследования позволили установить, что затвердевание крупного стального слитка происходит по механизму объемно-последовательной кристаллизации [2].

Наряду с экспериментальными методами исследования процессов затвердевания и неоднородности стальных слитков, подробно описанными в работе [2], используют методы физического моделирования на прозрачных веществах, что позволяет изучать влияние теплофизических условий затвердевания на параметры кристаллизации и капиллярного массопереноса в слитках [3].

В работе [4] предложена модель, особенность которой состоит в том, что она имеет небольшую толщину и позволяет довольно четко наблюдать и фотографировать зарождение кристаллов и топографию продвижения фронта затвердевания, капиллярный массоперенос в твердо-жидкой зоне, зарождение, рост и опускание центров кристаллизации в объеме отливки. В качестве модельного вещества использовали тиосульфат натрия, расплав которого кристаллизуется по типу металлических расплавов. Интенсивность теплоотвода от затвердевающего слитка обеспечивали термостатированием модели с температурой проточной водопроводной воды.

В последнее время получили развитие новые методы воздействия на затвердевающий металл, позволяющие измельчать зерно и уменьшать все виды неоднородности стальных слитков. Важнейшие из известных методов регулирования кристаллизационных процессов можно разделить на физико-химические, тепловые, механические и воздействия различных физических полей [5].

Новым направлением, которое рассматривается в настоящей работе является применение ударного импульсного воздействия на затвердевающий металл. Это воздействие реализуется путем ввода в металл небольших зарядов взрывчатого вещества через фиксированные промежутки времени.

Целью статьи является исследование ударного воздействия на кристаллизующийся металл с применением физического моделирования и изучения промышленных образцов, изучение его влияния на макроструктуру и неоднородность затвердевшего слитка, разработка методов промышленного применения гидроимпульсного воздействия на крупные слитки с целью повышения их качества.

Изложение основного материала. Исследование процесса затвердевания слитков на

моделях является важным средством, дополняющим другие методы изучения этой проблемы.

В качестве кристаллизующегося вещества был выбран пентагидрат тиосульфата натрия (гипосульфит) - $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.

Чистый гипосульфит при атмосферном давлении плавится в собственной кристаллизационной воде при 56°C . Препарат, применявшийся для работы, имел, в зависимости от партии, температуру плавления в интервале $48 - 52^\circ\text{C}$, что связано с наличием в нем обычных примесей (сульфиды, сульфиты и сульфаты щелочных металлов).

Отличительная особенность применявшихся моделей заключалась в том, что моделировался не весь слиток, а только его осевое продольное сечение.

Размеры и форма модели зависят от выбранного масштаба и типа слитка. Опыты проводили на моделях листовых слитков массой 20 т. Прототипом применяемой модели послужила установка, описанная в работе [4].

Схема модели приведена на рис. 1. Конструкция представляла собой спаянный из жести холодильник 1, внутренние очертания которого воспроизводят очертания продольного осевого сечения слитка, размещенный между пластинами из плексигласа 2 и укрепленный с помощью болтов 3.

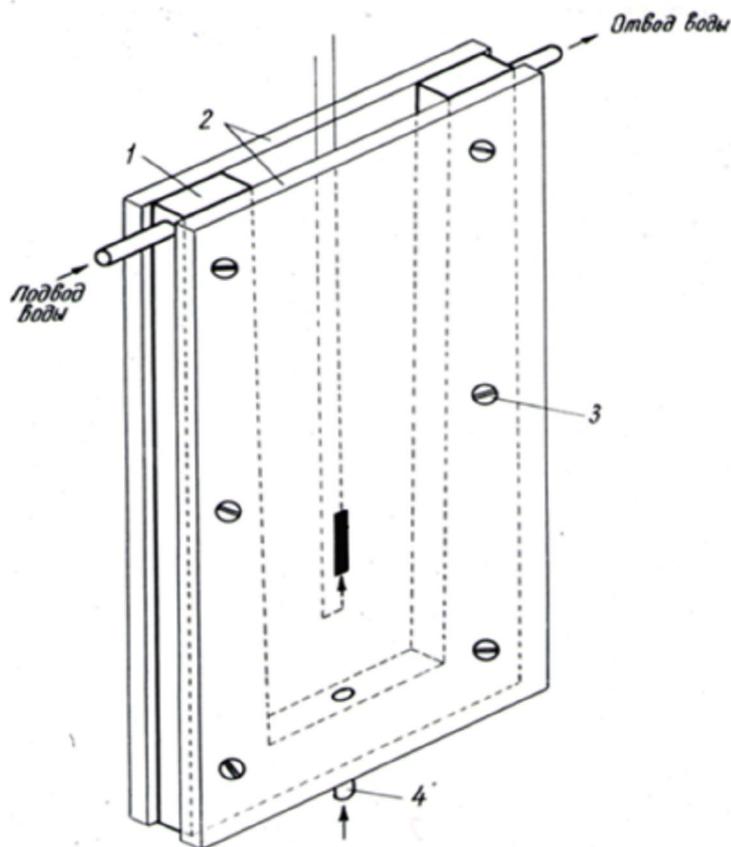


Рис. 1 – Установка для изучения кристаллизации стальных слитков путем физического моделирования: 1 – холодильник, 2 – прозрачные пластины, 3 – болты, 4 – литник

Перед опытом гипосульфит перегревали до 60°C с целью обеспечения возможности сифонной разливки через канал 4. Работу холодильника обеспечивали подачей в систему холодной водопроводной воды с расходом 4 л/мин.

При проведении экспериментов проводили фотографирование и киносъемку процесса кристаллизации слитка. Дополнительно изучали структуру полученных твердых слитков.

Толщина холодильника, равная толщине слоя кристаллизующегося вещества, составляла 14 мм. Как было установлено в предварительных опытах, эта толщина является оптимальной, т.к. с одной стороны, позволяет предотвратить кристаллизацию на плексигласовых стенках, а с

другой, обеспечивает прозрачность модели как с расплавленным, так и с затвердевшим гипосульфитом. На рис. 2 представлен вид модели с залитым гипосульфитом.

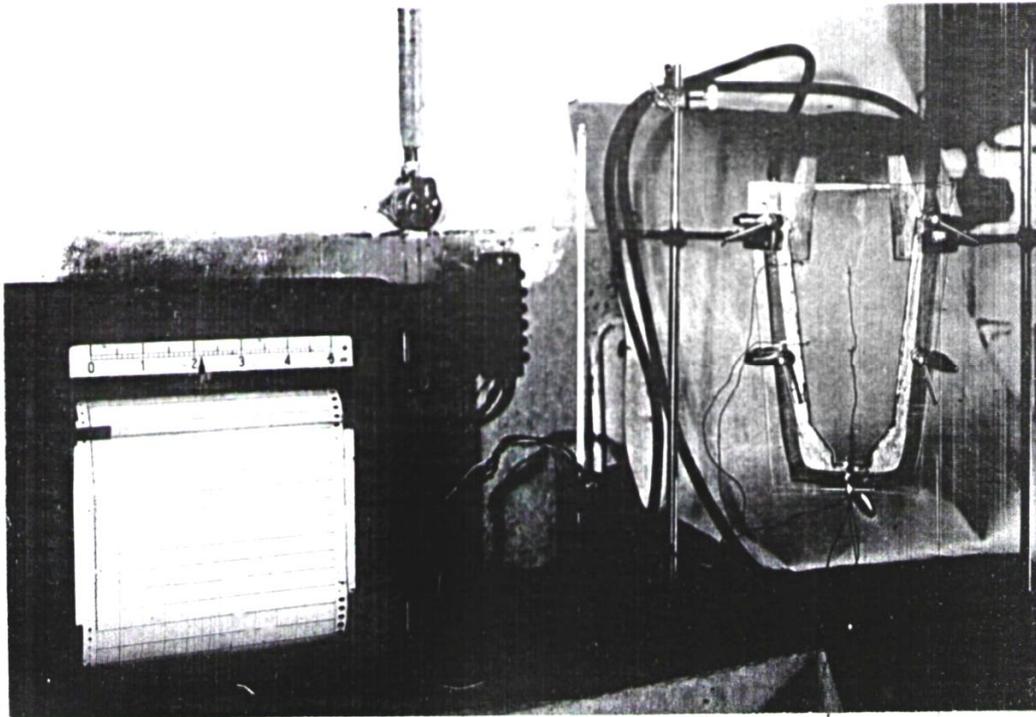


Рис. 2 – Общий вид установки с залитым гипосульфитом (1 мин после заливки)

По приведенной выше методике провели физические моделирование процесса затвердевания слитка при наложении на жидкую и кристаллизующуюся область ударных импульсных воздействий.

Воздействие осуществляли путем пережигания нихромовой проволоки, помещенной в расплав гипосульфита, разрядом тока от электролитического конденсатора, что вызывало гидравлический удар.

Отмечается наличие характерных слоев в структуре опытного слитка, которые образовались за счет ударно-импульсного воздействия. Сформированные слои имеют мелкокристаллическую плотную структуру, усадочная раковина имеет благоприятную форму.

Результаты исследований на физической модели позволили разработать опытную технологию обработки крупных стальных слитков ударными импульсными воздействиями в производственных условиях.

Кристаллизующиеся опытные слитки спокойной стали обрабатывали путем ввода ампул, содержащих воду, которые вводили в незатвердевшую сердцевину слитка.

Выбор воды для проведения опытов был обусловлен ее доступностью, а также тем фактом, что испарение последней при температуре жидкой стали имеет взрывной характер.

Силовое воздействие, возникающее при взрывном характере испарения воды складывается из ударной волны и давления пульсирующего пузыря.

Сопоставление макроструктуры темплетов из прибыльной части слитков (валового - рис. 3 и опытного – рис. 4) показывает существенное преимущество последнего. В связи с уплотнением осевой части и увеличением доли вертикального затвердевания масса жидкого металла в прибыльной части может быть уменьшена на 25-35%. Слитки, отлитые с применением ударно импульсного воздействия получают без усадочной раковины в теле, что также позволит значительно снизить обрезь. Это позволит получить существенный экономический эффект.

Дополнительно исследовали плотность образцов, вырезанных из осевой зоны обоих слитков.

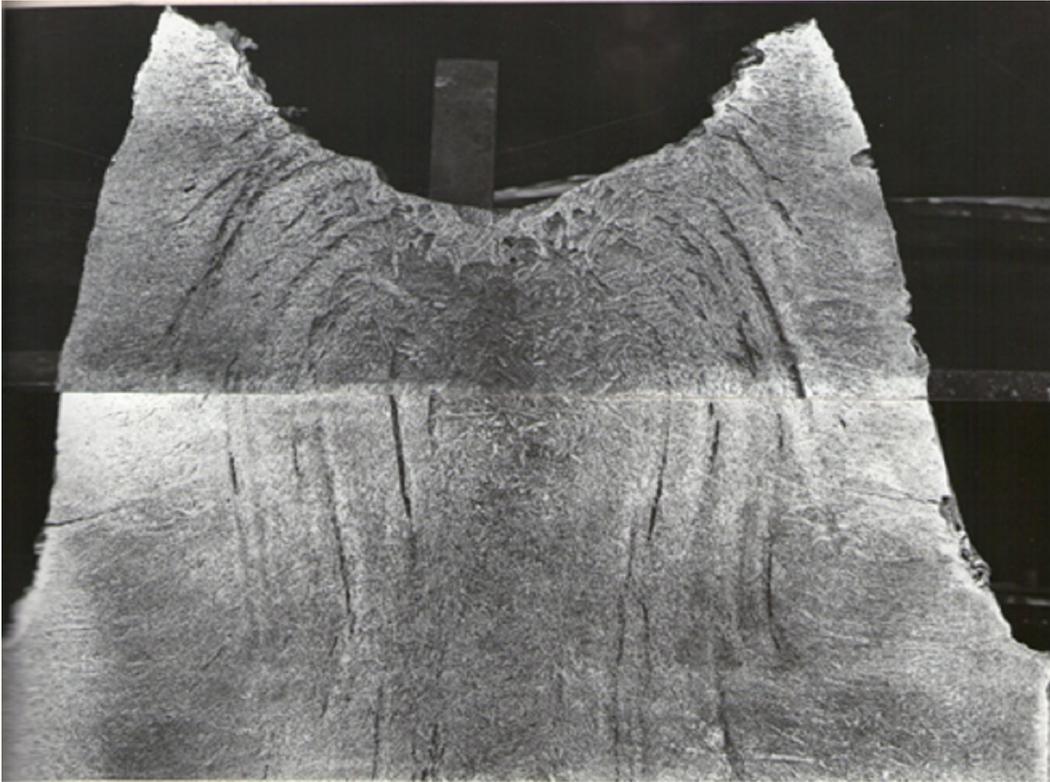


Рис. 3 – Макроструктура осевого темплета из прибыльной части слитка 20 т, отлитого по валовой технологии

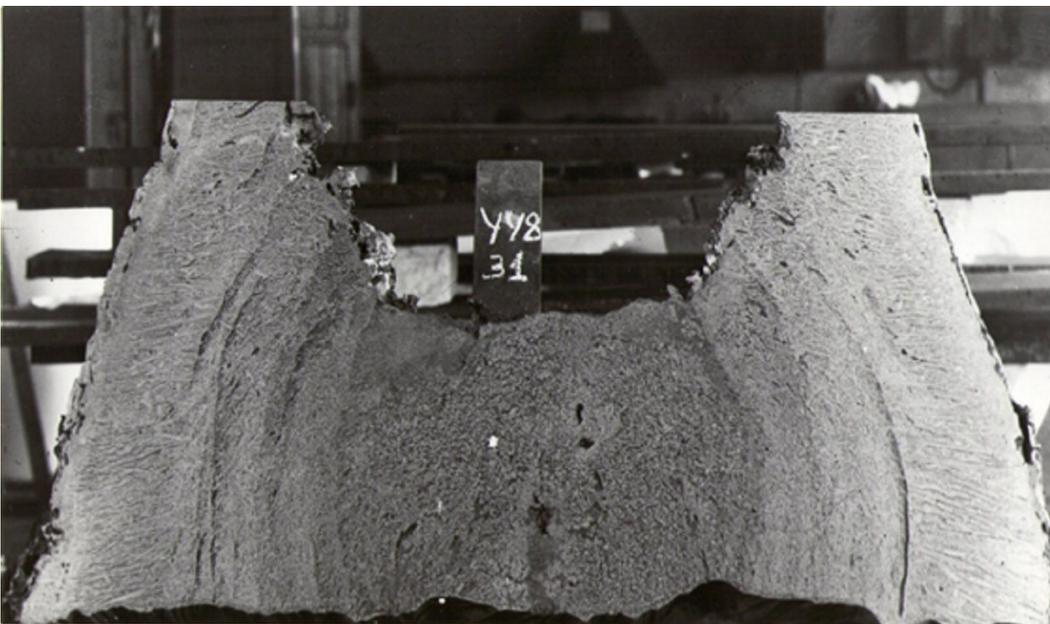


Рис. 4 – Макроструктура осевого темплета из прибыльной части слитка 20 т, обработанного ударным импульсным воздействием

Установили, что для опытного слитка она достигает $7,55 \text{ г/см}^3$ при максимальной плотности $7,30 \text{ г/см}^3$ для образцов из сравнительного слитка. Причем наименее плотным были образцы из донной части и осевой зоны на уровне заплечиков.

Из изложенного следует, что метод ударно-импульсного воздействия оказывает

комплексное воздействие на формирование внутреннего строения слитков. В результате его применения измельчается структура, уплотняется зона осевой пористости, разбиваются ликвационные шнуры.

Поскольку используются добавки, в состав которых входит вода, возможно ожидать наводороживания металла и ухудшения его свойств.

Расчеты по методике [6] показывают, что увеличение содержания водорода в 20 т слитке при введении $1 \text{ см}^3 \text{ H}_2\text{O}$ даже при условии полного усвоения увеличит содержание водорода в стали лишь на $1,25 \cdot 10^{-2} \text{ см}^3/100 \text{ г}$ металла, что является незначительным.

Выводы

1. Разработана методика физического моделирования процесса затвердевания крупных стальных слитков, с помощью которой исследовали положительное влияние ударных импульсных воздействий на макроструктуру модельных слитков из гипосульфита.
2. В результате исследований макроструктуры центральной части слитков массой 20 т, обработанных ударными импульсными воздействиями, установлено, что опытные слитки имеют более плотную структуру, что позволяет уменьшить массу жидкого металла в прибыли на 25-30%.

Список использованных источников:

1. Ефимов В.А. Современные технологии разлива и кристаллизации сплавов / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. – М.: Машиностроение, 1998. – 360 с.
2. Смирнов А.Н. Крупный слиток: [моногр.] / А.Н. Смирнов, С.Л. Макуров, В.М. Сафонов, А.Ю. Цупрун: ДОННТУ. – Донецк: Вебер, 2009. – 278 с.
3. Еронько С.П. Физическое моделирование процессов внепечной обработки и разлива стали / С.П. Еронько, С.В. Быковских. – К.: Техніка, 1998. – 136 с.
4. Страхов В.Г. Моделирование затвердевания слитка / В.Г. Страхов, Е.А. Казачков, С.Я. Скобло // Производство и обработка стали: Сб. науч. тр. / Жд.МИ. - М.: Металлургиздат, 1960. - Вып. 5. - С.84-94.
5. Затвердевание металлического расплава при внешних воздействиях / А.Н. Смирнов, В.Л. Пилюшенко, С.В. Момот, В.Н. Амитан. – Донецк.: Изд-во «ВИК», 2002. – 169 с.
6. Кньюппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали / Г. Кньюппель. Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1984. – 414 с.

Bibliography:

1. Efimov V.A. Modern technologies of casting and crystallization of alloys / V.A. Efimov, A.S. Eldarkhanov. – Moscow: Mechanical engineering, 1998. – 360 p. (Rus.)
2. Smirnov A.N. Large ingot: [monogr.] / A.N. Smirnov, S.L. Makurov, V.M. Safonov, A.Y. Tsuprun: DonNTU. – Donetsk: Weber, 2009. – 278 p. (Rus.)
3. Yeronko S.P. Physical modeling of ladle treatment steel casting processes / S.P. Yeronko, S.V. Bykovskikh. – Kiev: Technics, 1998. – 136 p. (Rus.)
4. Strakhov V.G. Ingot crystallization modeling / V.G. Strakhov, E.A. Kazachkov, S.Y. Skoblo // Steel production and treatment: Digest of scientific works / Zhd.MI. – Moscow: Metallurgizdat, 1960. – № 5. – P. 84-94. (Rus.)
5. Solidification of molten metal under external influences / A.N. Smirnov, V.L. Pilyushenko, S.V. Momot, V.N. Amitan. – Donetsk.: «VIK» Publishing, 2002. – 169 p. (Rus.)
6. Knüppel G. Deoxidation and vacuum treatment of steel / G. Knüppel. Translated from German. – Moscow: Metallurgy, 1984. – 414 p. (Rus.)

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

Статья поступила 27.03.2013