А. Я. Пузиков, С. Б. Гаманюк, Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, К. А. Ивченко

**ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОСОБЕННОСТИ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ
И ХАРАКТЕР КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ СЛИТКОВ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: tecmat@vstu.ru.

В работе описано влияние внешних воздействий на особенности и характер конвективных потоков при затвердевании слитков. Показано, что доливка прибыльной части слитка горячими порциями расплава изменяет характер конвективного движения расплава в теле модельного слитка. До доливки наблюдается ламинарное движение, после – турбулентное. Изменение характера движения жидкости в теле слитка способствует увеличению скорости продвижения фронта твердой фазы, о чем свидетельствуют результаты расчета скорости кристаллизации на всем протяжении процесса затвердевания модельного слитка. Анализ структурных зон показал увеличение зоны столбчатых кристаллов с 58,6 до 72,3 % и зоны конуса осаждения, с 6,5 до 9,1 % в слитках с доливкой по сравнению с классическим слитком. Также отмечается уменьшение зоны разноориентированных кристаллов с 26,8 до 13,7 % и корковой зоны с 5,9 до 2,8 %. Протяженность осевой зоны увеличилась с 36 до 54 %, с уменьшением ее диаметра с 6,5 до 5,1 %.

Ключевые слова: затвердевание, физическое моделирование, конвективные потоки, скорость кристаллизации, ламинарное движение расплава, турбулентное движение расплава, осевая зона крупного слитка.

A. Ya. Puzikov, S. B. Gamanuk, N. A. Zyuban, D. V. Rutskiy, K. A. Ivchenko

**THE INFLUENCE OF EXTERNAL FORCES ON THE CHARACTERISTICS OF HARDENING
AND THE CHARACTER OF CONVECTIVE FLOWS DURING THE CURING OF INGOTS**

Volgograd State Technical University

The paper describes the influence of external influences on the features and nature of convective flows during the solidification of ingots. It is shown that topping up the profitable part of the ingot with hot portions of the melt changes the nature of the convective motion of the melt in the body of the model ingot. Laminar movement is observed before refilling, after turbulent. The change in the nature of the movement of the liquid in the body of the ingot contributes to an increase in the speed of the front of the solid phase, as evidenced by the results of calculating the rate of solidification throughout the solidification process of the model ingot. The analysis of the structural zones showed an increase in the zone of columnar crystals from 58.6% to 72.3% and the zone of the deposition cone, from 6.5% to 9.1% in refilled ingots compared to the classic ingot. There is also a decrease in the zone of differently oriented crystals from 26.8 to 13.7% and the crustal zone from 5.9% to 2.8%. The length of the axial zone increased from 36 to 54%, with a decrease in its diameter from 6.5 to 5.1%.

Keywords: solidification, physical modeling, convective flows, crystallization rate, laminar movement of the melt, turbulent movement of the melt, axial zone of a large ingot.

Примерное время затвердевания крупных, около девятисот тонн, слитков составляет семь суток, в течение которых значительное развитие получают ликвационные и усадочные явления. Они приводят к появлению в литом металле химической и физической неоднородностей, которые при их значительном развитии не всегда удаляются при ковке. Наследование их готовым изделием приводит к отбраковке заготовок на стадии их изготовления или во время статочных испытаний изделий и, соответственно, к убыткам предприятия.

В настоящее время разработано достаточно много способов, позволяющих повысить качество металла. Но все эти способы основаны на применении различных технологических приемов на стадии выплавки и разлива. Положительный эффект, полученный на стадии выплавки, может быть полностью утрачен во время разлива и затвердевания крупных слитков, единичная масса которых составляет не менее 14 тонн.

В работах А. Н. Смирнова, С. И. Жульева и других показано, что трудности получения качественной структуры и равномерности механических свойств по высоте и радиусу поковок обусловлены различием условий затвердевания различных частей слитка, а также протеканием процессов усадки, значительной ликвацией примесей, входящих в состав стали, а также формой и размерами слитка. Однако следует отметить и особую роль конвективного движения расплава в затвердевающем объеме тела слитка. В зависимости от характера и скорости конвективного движения изменяется интенсивность теплопередачи к границе затвердевания и скорость продвижения фронта твердой фазы. Также значительное развитие конвективного движения в теле затвердевающего слитка влияет на распределение неметаллических включений. Все виды неоднородности увеличиваются с увеличением массы слитка [1, 2].

Одним из основополагающих параметров, оказывающих влияние на формирование структурных зон и физической неоднородности в слитке, является отношение величины интервала кристаллизации к величине температурного градиента – $\Delta T_{кр}/\delta T$.

Значение $\Delta T_{кр}/\delta T$ может быть меньше, больше или равно 1. В случае, когда значение этого отношения меньше 1, затвердевание происходит по последовательному механизму с образованием плотной бездефектной структу-

ры. Скорость продвижения твердой фазы высока, а усадочная раковина сосредоточена в головной части слитка. При $\Delta T_{кр}/\delta T$, равном 1, механизм кристаллизации меняется на последовательно-объемный. В таком случае помимо усадочной раковины образуется усадочная пористость, расположенная в осевой части слитка. Объемная кристаллизация наблюдается, если $\Delta T_{кр}/\delta T$ больше 1. При таком механизме зарождение кристаллов происходит по всему затвердевающему объему, а усадка проявляется в виде усадочных пустот в форме пористости [1, 2].

Для повышения качества крупных слитков необходимо искать эффективные способы, оказывающие воздействие на процесс затвердевания. Для того чтобы найти эффективный способ, необходимо знать механизм и условия, при которых происходит образование локальных дефектных областей, приводящее к развитию макродефектов, неустраняемых во время деформации.

Выявление особенностей затвердевания крупных слитков является сложным процессом, для анализа которого необходимо учитывать множество факторов, влияющих на протекание кристаллизационных явлений. Для оценки процессов затвердевания отливок и слитков в настоящее время разработано достаточно много математических моделей, основанных на решении дифференциальных уравнений теплопроводности, тепломассопереноса (и так далее) при различных граничных условиях; все модели реализованы в современном программном обеспечении [3, 4, 5]. Преимуществом перечисленного ПО является простота использования, т. е. исследователю необходим минимум затрат для оценки процессов затвердевания; однако не всегда эти модели дают адекватный результат; кроме того, они требуют постоянной проверки адекватности полученных данных.

Вторым способом исследования процессов затвердевания крупных слитков является физическое моделирование, которое проводится на моделях изложниц [6–10]. Данный способ не является совершенным, но позволяет оценить влияние различных факторов (геометрия, технологические параметры разлива и т. д.) на кинетику процесса затвердевания крупных слитков.

Движение конвективных потоков оказывает значительное влияние на процесс затвердевания. Для оценки их влияния проводили порционное добавление в прибыльную часть модель-

ного слитка порций жидкого расплава. Исходя из условий, которые были определены в работах [1, 2, 11], показано, что доливку прибыли целесообразно проводить, когда $\Delta T_{кр}/\delta T \geq 1$. Авторами [12] показано, что процесс доливки прибыли горячим расплавом может существенно влиять на условия формирования структурных зон слитка, увеличивая параметр δT до значений, при которых механизм затвердевания возвращается к последовательному, с образованием более плотной дендритной структуры.

Целью данной работы является изучение влияния процесса доливки прибыльной части слитка горячим расплавом на количественные и качественные характеристики конвективного движения и структурообразование при затвердевании модельного слитка.

Для достижения поставленной цели, с помощью физического моделирования процесса затвердевания расплава, были отлиты три модельных слитка. Один – по классической технологии; два – с доливкой прибыли горячим расплавом, с различной величиной перегрева над температурой ликвидус. Заливка модельного расплава в изложницу – кристаллизатор производилась сверху через промежуточный ковш. Технологические параметры разливки представлены в табл. 1. Методика визуализации конвективных потоков и оценка кинетики продвижения твердой и твердожидкой фаз приведены в работе [13].

На рис. 1 и 2 представлены фото и схемы конвективного движения моделируемой жидкости до и после доливки прибыльной части.

Таблица 1

Технологические параметры отливки модельных слитков

Технология разливки модельных слитков	Без доливки прибыли	С доливкой прибыли	
Температура заливки тела слитка, °C	75	75	75
Время заливки тела слитка, τ (сек)	25	30	30
Температура заливки прибыли, T (°C)	75	80	90
Время заливки прибыли, τ (сек)	25	24	27
Время выдержки, τ (сек)	–	319	480
Температура хладогента, °C	5	5	9
Масса тела слитка/прибыльной части, г	550/150	550/150	550/150
Массовая скорость разливки тела слитка, г/сек	22	18,3	18,3
Массовая скорость разливки прибыльной части слитка, г/сек	6	6,3	5,6

а

Вид конвективного движения расплава перед доливкой

б

Вид конвективного движения после доливки

Рис. 1. Вид конвективного движения жидкости в теле слитка до и после доливки прибыли горячим расплавом

Рис. 2. Схема движения жидкости до и после доливки прибыли горячим расплавом

В момент доливки прибыльной части видно, что характер движения расплава меняется с ламинарного на турбулентный. Так как теп-

лота в ламинарном потоке передается теплопроводностью, а в турбулентном – теплопроводностью и конвекцией, можно ожидать увеличения количества тепла, передаваемого от жидкой сердцевины слитка к нарастающему фронту твердой фазы. Помимо этого, процесс доливки позволяет увеличить градиент температур между жидкостью и твердой фазой, что, в свою очередь, влияет на скорость конвективного движения расплава в теле слитка. Такое движение наблюдается в течение 2–3 минут после доливки.

Результаты измерения скоростей конвективных потоков подтвердили эти предположения. На рис. 3 видно, что в модельных слитках, отлитых с доливкой прибыли, скорость потоков жидкости выше на всем протяжении процесса их затвердевания, причем скорость потоков растет с увеличением перегрева доливаемого расплава над температурой заливки тела слитка.

Рис. 3. Динамика изменения скоростей конвективных потоков в процессе затвердевания модельных слитков

Влияние процесса доливки прибыли горячими порциями расплава на кинетику продвижения твердой фазы в горизонтальном и вертикальном направлениях представлено на рис. 4, 5.

Рис. 4. Сравнение динамики нарастания твердой фазы в вертикальном и горизонтальном направлениях модельных слитков: а – слиток, отлитый по классической технологии (без доливки прибыли); б – слиток, отлитый с доливкой прибыли порцией горячего расплава ($T_{\text{тела}} = 75^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{приб}} = 80^{\circ}\text{C}$); в – слиток, отлитый с доливкой прибыли порцией горячего расплава ($T_{\text{тела}} = 75^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{приб}} = 90^{\circ}\text{C}$)

Рис. 5. Динамика нарастания твердой фазы в вертикальном и горизонтальном направлениях:
а – сравнение толщины твердой фазы по оси модельных слитков; б – сравнение толщины твердой фазы по радиусу модельных слитков

С помощью проведения операции доливки удалось добиться явного ускорения затвердевания твердой фазы от стенок изложницы в горизонтальном направлении. Причем изменился характер нарастания твердой фазы и вдоль оси модельных слитков (рис. 5, а). Если в слитке, отлитом без доливки, нарастание твердой фазы идет равномерно, без видимых пиков, то в слитках с доливкой такие скачки резкого увеличения твердой фазы присутствуют. Данный факт говорит о том, что нарастание вдоль оси идет за счет смыкания твердой фазы,

нарастающей от стенок изложницы.

Расчет скоростей кристаллизации модельных слитков (рис. 6) показал, что максимальные значения этого параметра в слитках, отлитых с доливкой прибыли, находятся на уровне 0,52 мм/мин и 0,42 мм/мин в классическом слитке. Помимо этого, смещение пиковых значений на более ранние стадии процесса затвердевания позволило интенсифицировать нарастание зоны столбчатых кристаллов (рис. 7, табл. 2), которая обладает большей плотностью и менее подвержена образованию дефектов.

Рис. 6. Скорости кристаллизации модельных слитков в горизонтальном направлении

Рис. 7. Структуры и объемные доли структурных зон модельных слитков:
1 – корковая зона; 2 – зона столбчатых кристаллов; 3 – зона конуса осаждения; 4 – зона разноориентированных кристаллов; 5 – осевая зона; 6 – усадочная раковина

Таблица 2

Объемные доли структурных зон модельных слитков

	Слиток	Без доливки	С доливкой 75/80	С доливкой 75/90
Результаты расчета относительно объема тела слитка	Корковая зона, %	5,9	3	2,8
	Зона столбчатых кристаллов, %	58,6	70,9	72,3
	Зона конуса осаждения, %	6,5	8,7	9,1
	Зона разноориентированных кристаллов, %	26,8	15,4	13,7
	Осевая зона, %	2,2	2	2,1
Результаты расчета относительно высоты и среднего диаметра тела слитка	Протяженность осевой зоны	36	44,5	54
	Диаметр осевой зоны	6,5	5,2	5,1

Анализ развития структурных зон модельных слитков представлен в табл. 2. В опытных слитках можно отметить увеличение зоны столбчатых кристаллов с 58,6 до 72,3 % по сравнению с классическим слитком; помимо этого тенденцию на увеличение имеет зона конуса осаждения, с 6,5 до 9,1 %. Объемная доля корковой зоны и зоны разноориентированных кристаллов, напротив, уменьшилась с 5,9 до 2,8 % и с 26,8 до 13,7 % соответственно. Надо отметить увеличение протяженности осевой зоны относительно высоты тела слитка с 36 до 54 %, однако ее диаметр, относительно среднего диаметра слитка, уменьшился с 6,5 до 5,1 %. Слит-

ки, отлитые с доливкой прибыли, учитывая их структурные особенности, могут подходить для производства в качестве трубных заготовок, в которых удаляется осевая часть ввиду ее большой протяженности и малого диаметра.

Выводы

Доливка прибыли горячим расплавом приводит к изменению характера конвективного движения и увеличению температурного градиента, что увеличивает теплоотдачу от жидкой сердцевины к затвердевшим слоям металла. Следствием этого является преобладание затвердевания по радиусу слитка, увеличение максимальных значений скоростей кристалли-

зации с 0,42 до 0,52 мм/мин и смещение этих пиковых значений в начало затвердевания, когда образуется зона столбчатых кристаллов. Анализ структурных зон показал увеличение зоны столбчатых кристаллов с 58,6 до 72,3 % и зоны конуса осаждения – с 6,5 до 9,1 % в слитках с доливкой по сравнению с классическим слитком. Также отмечается уменьшение зоны различноориентированных кристаллов с 26,8 до 13,7 % и корковой зоны – с 5,9 до 2,8 %. Протяженность осевой зоны увеличилась с 36 до 54 %, с уменьшением ее диаметра с 6,5 до 5,1 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крупный слиток : моногр. / А. Н. Смирнов [и др.] ; Донецкий национальный технический ун-т. – Донецк : Вебер, 2009. – 279 с.
2. Жульев, С. И. Стальные слитки: проблемы качества и новые технологии : моногр. / С. И. Жульев, Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – 176 с.
3. Система компьютерного моделирования литейных процессов LVMFlow/NovaFlow&SolidCV. URL : <http://lvmflow.ru/>
4. Система компьютерного моделирования литейных процессов PolygonSoft. URL : <https://polygonsoft.ru/>
5. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2013613206 от 28.03.2013 г. РФ, МПК (нет). Система компьютерного моделирования «Crystal» / В. П. Багмутов, И. Н. Захаров, Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, С. Б. Гаманюк ; ВолгГТУ. – 2013.
6. Massive Formation of Equiaxed Crystals by Avalanches of Mushy Zone Segments / A. Ludwig, M. Stefan-Kharicha, A. Kharicha and M. Wu // Metallurgical and materials transaction A. 2017. Volume 48A. P. 2927–2930.
7. Review of Ammonium Chloride-Water Solution Properties / M. Stefan-Kharicha, A. Kharicha, J. Mogeritsch, M. Wu and A. Ludwig // Journal of chemical and engineering. 2018. Volume 63. P. 3170–3183.
8. П. м. 110667 РФ, МПК В 22 D 7/08. Устройство для исследования процесса кристаллизации слитков в модели изложницы / Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, С. Б. Гаманюк, С. Н. Никуйко, А. Н. Галкин ; ВолгГТУ. – 2011.
9. П. м. 135551 РФ, МПК B22D7/08. Модель изложницы для исследования процесса кристаллизации слитков / Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, А. Н. Галкин, С. Б. Гаманюк, Е. А. Косова, А. Я. Пузиков ; ВолгГТУ. – 2013.
10. П. м. 141550 РФ, МПК B22D7/08. Модель изложницы для исследования процесса кристаллизации слитков / Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, А. Н. Галкин, С. Б. Гаманюк, Е. А. Косова, А. Я. Пузиков ; ВолгГТУ. – 2014.
11. Ефимов, В. А. Современные технологии разливки и кристаллизации сплавов / В. А. Ефимов, А. С. Эльдарханов. – М. : Машиностроение, 1998. – С. 359.
12. Горунев, А. И. Влияние доливки прибыльной части на процесс затвердевания и структурообразования слитка стали 38ХНЗМФА / А. И. Горунев, В. В. Науменко, Д. В. Руцкий // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 10 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»; вып. 2). – С. 157–159.
13. Определение характера и скорости конвективных потоков при физическом моделировании процесса затвердевания слитков / А. Я. Пузиков, Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан, С. Б. Гаманюк, М. С. Никитин, Р. М. Войтенко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 7 (242) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Металлургия»). – С. 68–74.