

О выборе рациональных тепловых режимов отливки стальных слитков с дробью

Обоснованы рациональные режимы ввода стальной дроби оптимальной дозы и фракции в объем затвердевающих слитков.

Ключевые слова: расплав, дробь, плавление, слиток, затвердевание

Проблема совершенствования прогрессивных и создания новых технологий в металлургии и литейном производстве является актуальной для получения качественного литого и деформированного металла [1]. Решению этой проблемы способствует разработка методик определения температурных полей в процессе затвердевания крупных слитков и отливок для получения практических рекомендаций по управлению структурой и свойствами литого металла.

Температурные поля затвердевающих слитков влияют на ликвацию примесей и их распределение в двухфазной зоне кристаллизации, на удаление неметаллических включений и газовых пузырьков из глубинных объемов расплава в верхнюю часть слитка, а также на усадку литого металла и температурные напряжения в твердой корке слитка. На процесс формирования кристаллической структуры стальных слитков влияют теплофизические параметры их затвердевания (начальная температура расплава, скорость охлаждения слитка, градиенты и перепады температуры, ширина двухфазной зоны кристаллизации стали). Чтобы получить мелкокристаллическую структуру крупных слитков и отливок необходимо интенсифицировать тепловые условия их затвердевания.

Ускорение процесса затвердевания расплава обеспечивает прогрессивная технология суспензионной отливки прокатных и кузнечных слитков в чугуны изложницы и крупных отливок в литейные формы с введением оптимальной дозы литой дроби в объем разливаемой стали [1-3].

Достоинством технологического процесса отливки слитков с подачей дроби на струю разливаемой кипящей, полуспокойной и спокойной стали является быстрое снятие начального перегрева поступающего в полость изложницы расплава за счет резкого снижения температуры жидкой стали при расплавлении в ней дробинок. Главное требование к технологии суспензионной отливки стальных слитков с введением в расплав литой дроби – необходимость получения равномерного распределения дробинок-микрохолодильников в жидкой стали для создания температурных условий объемного затвердевания слитка.

Относительно равномерное распределение дробинок-микрохолодильников в расплаве затвердева-

ющего слитка обеспечивают устройства ввода [4, 5] литой дроби в струю жидкого металла при разливке стали из ковша по изложницам. В полости изложницы происходит интенсивное циркуляционное перемешивание жидкой стали затопленной струей [6]. Это способствует более равномерному распределению дроби в объеме слитка (рисунок), не допуская возникновения нежелательных сгустков нерасплавившихся стальных дробинок.

При введении дроби в расплав можно частично или полностью снять его начальный перегрев. Для выбора оптимальной дозы и фракции литой дроби и режимов ее ввода в расплав применили [7] метод математического моделирования температурных полей в системах слиток-изложница и дробь-расплав с учетом изменения температуры разливки стали по изложницам.

Если к моменту заполнения полости изложницы жидкой сталью дробинок-микрохолодильники в объеме слитка распределены равномерно, то в расплаве можно выделить характерную расчетную ячейку. Размеры сферической ячейки зависят от дозы и фракции введенной в расплав дроби. В центре ячейки находится дробинок, окруженная соответствующим ей количеством расплава.

Теплофизическая постановка задачи плавления дробинок в расплаве включает дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности, которое описывает изменение температуры в системе дробинок-расплав [7, 8]. Выделение скрытой теплоты плавления дробинок учитывается в эффективной теплоемкости. Так как в центре расчетной ячейки тепловой поток отсутствует, то градиент температуры равен нулю. В расплаве с дробинками теплообмен между ячейками не происходит. Поэтому на границе расчетной ячейки тепловой поток и градиент температуры тоже равны нулю. Тепловое сопротивление окисной пленки на поверхности литых дробинок учитывается коэффициентом теплообмена между дробинками и перемешивающимся расплавом.

Для численного решения теплофизической задачи плавления литых дробинок в жидкой стали разработали конечно-разностный расчетный алгоритм явно-неявного типа и составили вычислительную Фортран-программу, по которой рассчитали на ПЭВМ нестационарные температурные поля в дискретных

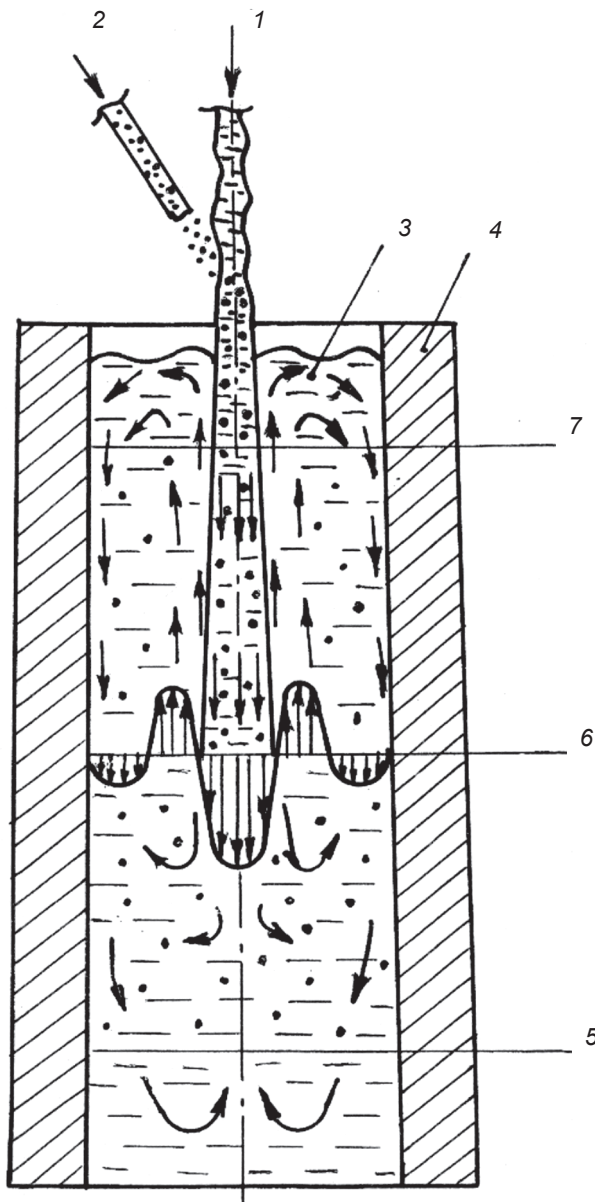


Рис. Перемешивание расплава с дробью затопленной струей жидкой стали: 1 – разливочная струя; 2 – подача дробы на струю; 3 – расплав с дробинками; 4 – изложница; 5 – уровень расплава в изложнице в начальный момент ввода дробы; 6 – эпюры скоростей циркуляционных потоков расплава с дробинками на среднем горизонте слитка; 7 – уровень расплава в момент окончания ввода дробинко-микрохолодильников в жидкую сталь

точках сферической ячейки расплав-микрохолодильник. Теоретическое исследование нестационарных процессов теплового взаимодействия дробинки с расплавом стали провели [8, 9] методом вычислительного эксперимента на ПЭВМ.

Расчетным путем определены: температурное состояние расплавляющихся стальных дробинки в разные моменты времени; длительность теплового взаимодействия дробинки с расплавом стали; кинетика образования двухфазной зоны в окружающей каждую дробинку расплаве; толщина твердого и двухфазного слоев гарнисажа на поверхности дробинки; время появления и исчезновения замороженного на дробинках гарнисажа и среднекалориметрическая температура системы микрохолодильник-расплав в условиях перемешивания жидкой стали [9].

Принимая среднекалориметрическую температуру системы дробь-расплав в качестве начальной

температуры жидкой стали в затвердевающем слитке, получили [10] численное решение на ПЭВМ нелинейной задачи затвердевания и определили степень влияния начального перегрева расплава на температурные поля стального слитка и чугунной изложницы. Установили расчетную оценку степени влияния фракции и дозы введенной в расплав дробы на температурное состояние слитка от начала и до конца его затвердевания, на изменение ширины двухфазной зоны, на скорость охлаждения слитка и время его затвердевания, а также на степень нагрева стенок изложницы в процессе кристаллизации стали.

Процесс теплообмена между затвердевающим слитком, изложницей и окружающей средой является процессом внешнего теплообмена в системе слиток-изложница, а теплообмен в системе микрохолодильник-расплав в условиях затвердевания слитка – это процесс внутреннего теплообмена между перегретой над температурой ликвидус жидкой сталью и дробинками.

Вариантными расчетами установлено, что возможности ускорения процесса затвердевания стального слитка за счет внешнего теплоотвода через стенки изложницы в окружающую среду ограничены. Увеличение теплопроводности изложницы в 3 раза может сократить время затвердевания слитка лишь на 8 %. Результаты вычислительных экспериментов показали [11, 12], что уменьшение толщины стенок изложницы с 200 до 80 мм и замена серого чугуна изложницы с пластинчатой формой графита (ЧПГ) на чугун с вермикулярной или шаровидной формой графита (ЧВГ или ЧШГ) не позволяет существенно ускорить процесс затвердевания стального слитка.

Для ускорения затвердевания стального слитка в чугунной изложнице использованы возможности интенсификации внутреннего теплоотвода от расплава к дробинкам-микрохолодильникам. Установили, что при быстром снятии начального перегрева расплава стальными дробинками стенки изложниц разогреваются значительно меньше. Это улучшает тепловую работу чугунных изложниц при затвердевании в них стальных слитков.

Комплексным исследованием процесса затвердевания слитка массой 19,2 т при подаче литой дробы на струю разливаемой стали установлено [10, 13], что для полного снятия начального перегрева расплава над температурой ликвидус разных марок углеродистой стали достаточно ввести 2,8-3,0 % дробы в расплав, который заполняет полость изложницы. При этом время плавления дробинки диаметром от 0,5 до 5,0 мм в жидкой стали изменяется от 0,25 до 26 с. Дробинки мелких фракций расплавляются в 5-10 раз быстрее, чем крупные.

Вычислительные эксперименты показали, что время прогрева стальных дробинки в жидкой стали составляет около 15 % от времени их расплавления в зоне спокойного металла и 23 % – в зоне перемешивания расплава в объеме слитка. Толщина замороженного на дробинках разных фракций твердого слоя гарнисажа изменяется от 12 до 15 %, а толщина двухфазного слоя – от 7,8 до 26,3 % их диаметра. Гарнисаж на дробинках оптимальной фракции диа-

метром 3 мм расплавляется в жидкой стали за 2 с. При 1,4 % дробы перегрев расплава снижается с 60 и 30 °С на 27 и 31 °С за 2,1 и 6,2 с.

В процессе разлива сверху спокойной и кипящей стали в полости изложницы образуются интенсивные циркуляционные потоки жидкого металла, поэтому плотные дробинки диаметром 3 мм хорошо внедряются вместе с затопленной струей во внутренние объемы затвердевающего слитка. При перемешивании жидкой стали в полости изложницы дробинки-микрохолодильники быстрее снимают перегрев расплава. Дробинки мелких фракций (меньше 3-х мм) быстро плавятся, не достигая глубинных объемов слитка. Полые дробинки крупных фракций литой дробы (больше 3-х мм) с усадочными раковинами могут всплывать в верхние слои жидкой стали в изложнице, не попадая в нижние объемы расплава, что приводит к неравномерному снятию перегрева в затвердевающем слитке.

На дробинках оптимальной фракции диаметром 3 мм намораживается твердый и твердожидкий слой гарнисажа толщиной до 25 % их диаметра. При плавлении стальных дробинок вместе с замороженным на их поверхности гарнисажем в расплаве затвердевающего слитка образуются дополнительные центры кристаллизации по механизму диспергирования литых дробинок в жидкой стали [8]. Это способствует объемному затвердеванию слитка и измельчению его кристаллической структуры.

Струя расплава истекает из ковша под действием ферростатического давления жидкой стали. Из-за большой кинетической энергии разливочной струи увлекаемые циркуляционными потоками дробинки проникают в глубинные объемы слитка. Процесс интенсивного перемешивания расплава затопленной струей способствует равномерному распределению дробы в объеме слитка без образования сгустков нерасплавившихся дробинок-микрохолодильников. Это повышает эффективность теплофизического воздействия дробы на жидкий и кристаллизующийся металл по толщине и высоте затвердевающего слитка.

В итоге предложен [14] рациональный послиточный режим ввода литой дробы в расплав стали (от 1,0 до 2,2 %) с учетом неодинакового времени наполнения изложниц разливочного состава. Согласно этому режиму при суспензионной разливке стали сверху с подачей дробы на разливочную струю

нижнюю и верхнюю части слитков следует отливать без введения в расплав дробы. В момент попадания перегретого расплава в нижнюю часть холодной изложницы жидкая сталь быстро охлаждается благодаря интенсивному теплоотводу от расплава к поддону и боковым стенкам изложницы. Поэтому донную часть слитка следует отливать без дробы. При наполнении жидкой сталью верхней части изложницы необходимо прекратить подачу дробы в расплав, чтобы сохранить в головной части затвердевающего слитка перегретый жидкий металл, необходимый для подпитки твердожидкой области затвердевающего слитка.

В процессе последовательного наполнения жидкой сталью из ковша 24-х изложниц разливочного состава наблюдали отчетливую зависимость увеличения времени наполнения каждой изложницы по ходу разлива стали. Это связано с уменьшением ферростатического напора жидкого металла при понижении уровня расплава в сталеразливочном ковше в процессе разлива стали по изложницам. Поэтому время наполнения последних изложниц почти в 2 раза больше по сравнению со временем наполнения первых изложниц (таблица).

При понижении зеркала жидкой стали в ковше снижается скорость истечения разливочной струи, что уменьшает скорость подъема зеркала расплава в полости изложницы, увеличивая время ее наполнения от момента включения устройства подачи дробы [4] до его отключения. Промежутки времени наполнения расплавом с дробью каждой последующей изложницы разливочного состава увеличивается по ходу разлива стали.

Теоретический анализ температурного состояния затвердевающих слитков с дробью и опытная проверка технологических режимов суспензионной отливки стальных слитков подтверждают эффективность теплофизического воздействия дробинок-микрохолодильников на расплав кристаллизующейся стали. Повышение качества литого и деформированного металла связано с тем, что при введении дробы в расплав кипящей, полуспокойной и спокойной стали температурные условия затвердевания слитков более благоприятны для измельчения их кристаллической структуры [15].

В процессе отливки стальных слитков с введением в жидкий металл дробы за счет перемешивания расплава разливочной струей достигается более

Временной режим ввода дробы в расплав по изложницам разливочного состава

| Наименование | Номер изложницы | | | | | | | | |
|--|-----------------|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 | 23 | 24 |
| | Время, с | | | | | | | | |
| Начало подачи литой дробы в объем слитка | 17 | 19 | 20 | 26 | 30 | 34 | 41 | 45 | 47 |
| Момент окончания ввода дробы в расплав | 50 | 52 | 56 | 64 | 75 | 90 | 104 | 119 | 125 |
| Время введения дробы в объем слитка | 33 | 33 | 36 | 38 | 45 | 56 | 63 | 74 | 78 |
| Время заполнения полости изложницы жидкой сталью | 67 | 69 | 72 | 79 | 90 | 105 | 122 | 134 | 138 |

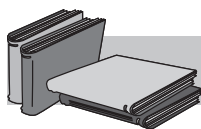
равномерное распределение температуры в объеме стального слитка, что приводит к быстрому снятию перегрева жидкой стали дробинками-микрочастицами по сравнению с обычными слитками, отлитыми без дроби. Это способствует объемному затвердеванию слитка, измельчению его кристаллической структуры и влияет на выбор момента стрипперования затвердевающих слитков, режимов их охлаждения на воздухе и нагрева под прокатку в нагревательных колодцах.

Выводы

Предложены технологические рекомендации, в соответствии с которыми в объем крупных слитков

(применительно к отливке стальных слитков массой 5-20 т) целесообразно вводить оптимальную дозу стальной дроби в количестве 1,3-1,5 % при оптимальной фракции дроби 2,5-3,0 мм и применять дифференцированный (растянутый во времени) режим ввода дроби в каждый слиток с учетом неодинаковой длительности наполнения изложниц жидкой сталью (при этом донную и головную части слитков необходимо отливать без дроби).

Полученные результаты теплофизических исследований по разливке стали с дробью могут быть полезны при разработке технологий суспензионной отливки слитков других типоразмеров, непрерывнолитых заготовок и массивных отливок с учетом особенностей конкретного технологического процесса.



ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов В. А. Разливка и кристаллизация стали. – М.: Металлургия, 1976. – 552 с.
2. Затуловский С. С. Суспензионная разливка. – К.: Наук. думка, 1981. – 259 с.
3. Кириевский Б. А., Черкасский В. Л. Гранулированный ферросилиций ФС-ГШ в литейном производстве. – К.: Наук. думка, 1984. – 143 с.
4. А. с. № 812419 СССР. МКИ В 22 11/10. Устройство для ввода дроби в струю жидкого металла / Е. Г. Чугунный, А. Д. Пуцаловский, В. Н. Сапко и др. – Оpubл. 15.03.81, Бюл. № 10.
5. А. с. № 1629150 СССР. МПК В22D 11/16. Устройство для ввода дисперсных материалов в струю жидкого металла / В. А. Ефимов, Л. В. Марушевский, Б. И. Кишко и др. – Оpubл. 23.02.1991, Бюл. № 7.
6. Некоторые особенности гидродинамики разливки стали сверху / В. П. Гребенюк, В. П. Осипов, В. Н. Сапко и др. // Проблемы стального слитка. Вып. III. – М.: Металлургия, 1969. – С. 87-91.
7. Соколовская Л. А., Мамишев В. А. О математическом моделировании задач с фазовыми переходами в металлургии и литейном производстве // Процессы литья. – 2009. – № 2. – С. 24-29.
8. Соколовская Л. А., Осипов В. П., Мамишев В. А. Использование математического моделирования при исследовании теплофизических процессов взаимодействия расплава с твердыми добавками // Там же. – 2000. – № 4. – С. 72-78.
9. Соколовская Л. А., Кириевский Б. А., Герштейн Г. И. Тепловое взаимодействие гранул с расплавом стали // Интенсификация литейных технологий. – К.: Изд-во ИПЛ АН УССР, 1989. – С. 22-25.
10. Соколовская Л. А., Осипов В. П., Мамишев В. А. Особенности затвердевания слитков с дробью // Литье и металлургия. – 2005. – № 3. – С. 109-110.
11. Расчет на ЭВМ начальной стадии температурного взаимодействия изложниц со стальным слитком в зависимости от структуры чугуна / Л. А. Соколовская, В. А. Мамишев, Э. В. Захарченко, В. Н. Семененко // Материалосберегающие технологии литейного производства. – К.: Изд-во ИПЛ АН УССР, 1984. – С. 99-102.
12. Соколовская Л. А., Мамишев В. А. Оценка математическим моделированием на ЭВМ теплового взаимодействия слитка с изложницей для выбора материала и толщины ее стенки // Матер. докл. VIII науч.-техн. конф. – Тбилиси: Мецниереба, 1989. – С. 14-18.
13. Исследование кинетики кристаллизации слитка низкоуглеродистой кипящей стали, отлитого с применением металлической дроби / В. И. Легенчук, В. Н. Сапко, В. В. Шепелев и др. // Теплофизика стального слитка. – К.: ИПЛ АН УССР, 1980. – С. 99-102.
14. Пат. № 5645 України. МКИ В22D 7/00. Спосіб розливання киплячої сталі / Л. А. Соколовська, В. П. Осіпов, В. А. Мамішев. – Оpubл. 15.03.2005, Бюл. № 3.
15. Соколовская Л. А. Эффективность влияния дроби на качество металла слитков кипящей стали // Металл и литье Украины. – 2005. – № 3-4. – С. 112-113.

Анотація

Соколовська Л. А.

Про вибір раціональних теплових режимів лиття стальних злитків із дробом

Обґрунтовано раціональні режими введення сталевого дроби оптимальної дози та фракції в об'єм твердіючих зливоків.