

С.М. КАБИШОВ, канд. техн. наук (ГКНТ РБ),
И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук,
Г.А. РУМЯНЦЕВА, канд. техн. наук,
А.А. СИЛЬЧЕНКО (БНТУ)

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ СТАЛИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ

Задача управления процессом кристаллизации сплавов с целью получения материалов с заранее заданными свойствами является одной из наиболее актуальных для современной металлургии. Очевидно, что свойства литого металла напрямую зависят от параметров его макро- и микроструктуры. Таким образом, исследования, направленные на разработку средств физического воздействия на затвердевающий слиток и совершенствование существующих методов с целью повышения их эффективности, обладают высокой значимостью и актуальностью.

Как показывает опыт, при разливке сталей с температурой кристаллизации около 1300–1500 °С возможности динамического воздействия на затвердевающую заготовку ограничены, так как непосредственный контакт инструмента воздействия с расплавом или раскаленной поверхностью слитка приводит к быстрому разрушению первого или потере им механических и иных необходимых свойств.

По результатам анализа технической литературы, посвященной вопросам управления структурообразованием металлов и сплавов при кристаллизации, условно можно выделить два направления исследований:

- 1) Совершенствование конструкций и режимов работы известных и применяемых в настоящее время на производстве систем динамического воздействия (электромагнитное перемешивание (ЭМП), «мягкое» обжатие, импульсное или высокоскоростное охлаждение и др.);
- 2) Разработка новых высокоэффективных промышленных способов и инструментов воздействия на расплав, которые обеспечат

более полную по сравнению со средствами первой группы возможность управления процессом кристаллизации высокотемпературных сплавов.

В качестве способов второй группы можно рассмотреть методы воздействия, применение которых с теоретической точки зрения может дать возможность управлять кристаллизацией сплавов практически на протяжении всего процесса. Многочисленные лабораторные и экспериментальные исследования [1–4 и др.] показывают, что использование вибрационных, ультразвуковых и иных воздействий на затвердевающую заготовку с целью улучшения качества литого металла позволяет добиться весьма заметных результатов. По сравнению с классическими системами электромагнитного перемешивания и «мягкого» обжата перечисленные методы позволяют воздействовать на расплав на микроуровне, разрушая кластеры, изменяя условия смачиваемости жидкостью неметаллических включений, возбуждая кавитационные явления в расплаве и др. Но широкого распространения в металлургии данные способы не получили, так как в большинстве своем требуют непосредственного контакта инструмента воздействия с жидким металлом либо раскальной поверхностью заготовки.

В этой связи в дальнейшем более подробно остановимся на анализе методов, которые в настоящее время активно используются в условиях действующего производства.

Как было отмечено выше, классические способы динамического воздействия на затвердевающую заготовку при непрерывном литье, отнесенные к первой группе, обладают ограниченными возможностями.

На примере ЭМП рассмотрим причины, которые не позволяют в полной мере управлять формированием структуры стального слитка при разливке на МНЛЗ. ЭМП является наиболее распространенным вариантом динамического воздействия на затвердевающую непрерывнолитую заготовку в условиях действующего производства. Принцип действия различных электромагнитных систем и способы организации их работы достаточно подробно описаны в технической литературе [1–4 и др.]. На структурообразование металла ЭМП воздействует посредством изменения тепловых условий на фронте кристаллизации, интенсификации диффузии примесей и твердых включений в жидком ядре заготовки и механического воздействия

потоков расплава на растущие дендриты, что может приводить к их частичному разрушению или подплавлению. В результате повышается качество структуры литого металла, уменьшается степень ликвации и осевая пористость [2].

Согласно информации, приведенной в технической литературе [2, 4], влияние ЭМП на качество заготовок, разливаемых на МНЛЗ, зависит от интенсивности перемешивания, т.е. от максимального значения линейной скорости жидкого металла в потоке в зоне действия катушки. При невысокой скорости циркуляции расплава ($v_{\max} < 0,3$ м/с), эффективность перемешивания мала, и применение ЭМП практически не отражается на качестве литого металла. Чтобы добиться заметных результатов, необходимо обеспечить уровень максимальных скоростей в потоке жидкого металла в кристаллизаторе в диапазоне от 0,3 до 0,6 м/с для блюмовых МНЛЗ и от 0,5 до 1,0 м/с – для сортовых.

При $v_{\max} > 1,0$ м/с отмечаются негативные явления (поры вдоль фронта кристаллизации с высокой отрицательной ликвацией). Собственно, причиной пониженной концентрации углерода и некоторых других элементов в «белой» полосе затвердевшего металла, которая формируется в зоне перемешивания, является эффект сепарации более легких атомов и примесей в осевую зону заготовки. Чтобы избежать этого, следует уменьшать интенсивность воздействия.

Кроме того, обеспечение высокой скорости циркуляции расплава требует увеличения расхода электроэнергии, но при этом не способствует повышению качества разливаемых заготовок. На практике конкретная величина скорости в потоке (мощность воздействия) выбирается в зависимости от скорости разливки, температуры перегрева, марки стали и сечения заготовок, разливаемых на МНЛЗ.

Помимо проблем с сегрегацией превышение пороговой скорости течения при использовании ЭМП приведет к нарушению баланса между плотностью теплового потока от жидкости к твердой фазе и потока, отводимого от фронта кристаллизации. Как следствие, избыточная теплота расплава вызывает повторное расплавление сформировавшейся корочки [5]. Учитывая механические и термические нагрузки, которые испытывает оболочка заготовки в процессе разливки, ее ослабление может стать причиной образования дефектов либо прорыва жидкой стали.

Методика, разработанная специалистами БНТУ [6], позволяет оценить пороговые значения интенсивности теплообмена на фронте кристаллизации, которые могут привести к расплавлению закристаллизовавшегося металла. Данная задача решается путем определения соотношения плотности теплового потока от расплава к твердой фазе к плотности теплового потока, отводимого от поверхности заготовки в окружающую среду, при котором значение логарифма коэффициента формы дендрита K_d равно двум

$$K_d = \frac{1 + I_s - \Psi(\Lambda - 1)}{I_l} - 1, \quad (1)$$

где $I_s = q_s(\tau)(\tau_{cr} + \tau_c)/(b_0\rho_s\Delta i_s)$ – отношение количества теплоты, отведенной от единицы поверхности заготовки за время $(\tau_{cr} + \tau_c)$ к изменению теплосодержания наружной корочки из разориентированных дендритов толщиной δ_0 при изменении средней температуры на $\Delta\vec{O}_s$; $\Psi = n \cdot \Delta V/V_0$ – относительный объем увеличения твердой фазы, где ΔV – изменение объема дендрита за период времени $i\tau_{cr}$; $V_0 = b_0 \cdot F_s$ – начальный объем твердой фазы (корочки из разориентированных мелких дендритов) перед началом формирования ячеистого фронта кристаллизации; n – количество дендритов на участке площадью F_s ; $\Lambda = L/\Delta i_s$ – отношение скрытой теплоты кристаллизации к изменению энтальпии твердой фазы; $I_l = q_l(\tau)(\tau_{cr} + \tau_c)/(b_0\rho_s\Delta i_s)$ – отношение количества теплоты, подведенной к единице поверхности твердой фазы от расплава за время $(\tau_{cr} + \tau_c)$, к изменению теплосодержания наружной корочки из разориентированных дендритов толщиной b_0 при изменении средней температуры на $\Delta\vec{O}_s$.

Очевидно, что в случае, когда первый член в выражении (1) равен двум, то коэффициент формы $K_d = 1$. Такая ситуация возникнет в случае прекращения роста дендрита (фронт становится гладким). Если же K_d становится меньше единицы, то это свидетельствует о том, что высокая интенсивность циркуляции расплава у фронта кристаллизации приводит к оплавлению твердой фазы либо разрушению дендрита.

Согласно расчетам, при установке системы ЭМП в кристаллизаторе МНЛЗ плотность теплового потока от расплава к фронту кри-

сталлизации не должна превышать 1000–1200 Вт/м². На рисунке 1 представлено сравнение данных интенсивности теплообмена между жидкой и твердой фазами, приведенных в работе [7], с указанным значением плотности теплового потока.

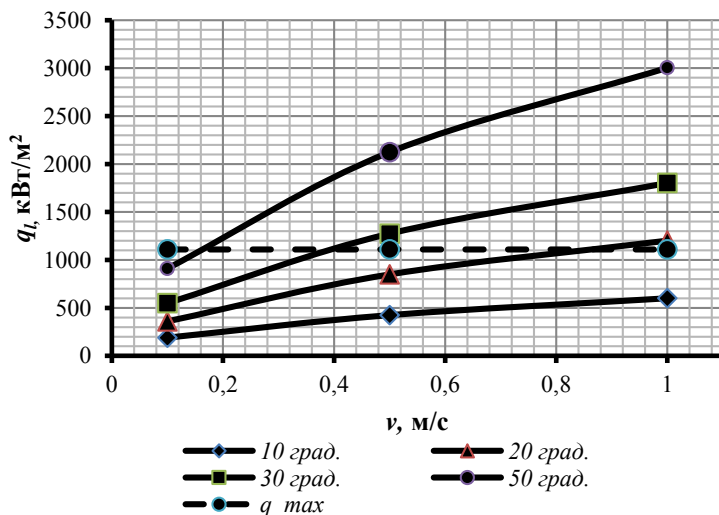


Рисунок 1 – Сравнение расчетных значений интенсивности теплообмена на фронте кристаллизации при различных температурах перегрева расплава с пороговым значением плотности теплового потока q_{max} , при котором начинается расплавление твердой фазы

Как видно из рисунка 1, в зоне перемешивания температура перегрева расплава при разливке стали на блюмовых МНЛЗ не должна превышать 30 °С. При этом максимально допустимая скорость циркуляции составит около 0,4 м/с. Данное значение находится в диапазоне, рекомендуемом авторами [2]. Для сортовых машин эффект от применения ЭМП обеспечивается в том случае, когда скорость циркуляции достигает 0,5–1 м/с. Очевидно, что температура перегрева расплава при этом должна быть менее 25 °С.

Таким образом, с учетом невысокой прочности затвердевающей корочки непрерывнолитой заготовки, испытывающей ферростатическое давление жидкой стали и механические воздействия со сто-

роны различных элементов конструкции МНЛЗ, на мощность и режим работы ЭМП налагаются дополнительные ограничения. Использование катушек ЭМП в кристаллизаторах МНЛЗ возможно при точном соблюдении ограничений по температуре перегрева, приведенных выше. Для блюмовых МНЛЗ целесообразно ограничить температуру расплава в зоне перемешивания на уровне 25 °С, а для сортовых – 20 °С. В противном случае дополнительная интенсификация перемешивания жидкой стали может привести к расплавлению затвердевшей корочки, ее вспучиванию под кристаллизатором либо к прорыву.

Помимо сказанного, анализ рисунка 1 показывает, что изменение температуры стали в процессе разливки будет оказывать существенное влияние на эффективность применения ЭМП, т.е. приводить к нестабильным результатам воздействия ЭМП на качество получаемого слитка. Причинами такой нестабильности может быть ряд факторов.

В процессе разливки температура расплава в промежуточном ковше изменяется, что сказывается на вязкости стали. Это влияет на характер и скорость циркуляции расплава в зоне воздействия. Еще одним обстоятельством, вызывающим изменения свойств жидкой стали при непрерывной разливке, являются конструктивные особенности многих МНЛЗ. При работе на многоручьевых машинах достаточно сложно обеспечить одинаковые условия для разливки на разных ручьях. Как следствие не только температура, но даже состав расплава, подаваемого, например, в крайние кристаллизаторы, будет отличаться от расплава, попадающего в остальные кристаллизаторы из того же промежуточного ковша. Эти отличия незначительны. Но известно, что более высокая концентрация (на сотые и тысячные доли процента) неметаллических и газовых включений оказывает заметное влияние на свойства жидкости и ее поведение в электромагнитном поле [8]. Например, увеличение содержания кислорода с 0,003 до 0,009 % способствует резкому возрастанию вязкости, что отрицательно сказывается на формировании кристаллической структуры слитка.

Высокая локальная концентрация примесей, которая образуется по причине ликвационных процессов на поверхности твердой фазы, заметно влияет на поверхностное натяжение расплава на границе раздела «жидкость–твердая фаза». Так, увеличение содержания се-

ры в диффузионном пограничном слое с 0,03 % до 0,1 % приводит к росту поверхностного натяжения более чем на 10 % [9].

Изменение скорости разливки оказывает непосредственное влияние на продолжительность нахождения заготовки в зоне ЭМП. Как свидетельствует производственный опыт и результаты расчетов [4], время перемешивания является одним из основных параметров, определяющих результаты воздействия (соотношение зон столбчатых и глобулярных дендритов, уровень ликвации, качество осевой зоны и др.).

Таким образом, на стадии выбора конструкции и места установки системы ЭМП, а также в процессе ее эксплуатации необходимо учитывать и контролировать перечисленные выше факторы и при помощи системы автоматизированного управления (АСУ ТП) оперативно корректировать режимы работы в процессе разливки. При этом целесообразно, чтобы АСУ ТП работала совместно с математической моделью [например, 4, 6, 10 и др.], способной в режиме реального времени выполнять прогнозные расчеты результатов воздействия перемешивания на качество литого металла.

Еще одним достаточно широко распространенным средством динамического воздействия за заготовку при разливке стали на МНЛЗ является «мягкое» обжатие. Данный способ обладает значительной эффективностью, которая выражается, прежде всего, в улучшении качества металла в осевой зоне литой заготовки. Но использование «мягкого» обжатия сопряжено с рядом трудностей. Авторы [11] отмечают, что для различной формы сечения заготовок, а также в зависимости от марки разливаемой стали деформацию затвердевшей оболочки заготовки следует осуществлять, когда доля жидкого ядра в ней составляет 0,4–0,45 для круглого сечения диаметром 350 мм, от 0,2–0,5 и до полного затвердевания – при разливке слябов. При разливке блюмовых заготовок в зависимости от марки стали рекомендуется обжатие начинать при доле жидкой фазы не более 0,8 и продолжать до момента, когда остаток жидкости в осевой зоне составит не менее 20 %.

Следует отметить, что на эффективность применения «мягкого обжатия» влияет также и интенсивность деформации, которая должна находиться в пределах 1,8–6,6 мм/м, а скорость – 0,72–4,7 мм/мин [5]. Очевидно, что приведенные диапазоны достаточно широки для того, чтобы точно установить оптимальный момент и режим воз-

действия. Кроме того, определение момента начала и завершения обжатия, его скорости и интенсивности зависят от формы и размеров сечения заготовки и марки разливаемой стали. Ошибка при выборе начала обжатия, а также избыточная деформация могут привести к возникновению внутренних трещин в затвердевшей корочке заготовки.

Некоторые исследователи предлагают осуществлять выбор момента и степени деформации по результатам решения задач теплопроводности и термомеханики, что позволяет определить поля температур, напряжений и деформаций в заготовке перед началом и в процессе обжатия [12]. Это требует знания на стадии моделирования многих параметров процесса и свойств деформируемого металла. Но информация о свойствах различных марок стали при высоких температурах в справочной литературе приведена весьма скудно либо вообще отсутствует. Кроме того, эти свойства достаточно сильно зависят не только от химического состава металла, но и от параметров макро- и микроструктуры, загрязненности различными включениями и др. Оценка данных характеристик в режиме реального времени практически невозможна, так как условия разливки могут изменяться в зависимости от начальной температуры расплава, подаваемого в кристаллизатор, фактического состояния систем и механизмов МНЛЗ и др.

В результате теоретическая оценка параметров структуры затвердевающего металла может дать лишь некий диапазон изменения искомых характеристик. Следовательно, применение математических моделей термонапряженного состояния заготовки в процессе непрерывного литья также, как и производственные данные [11], не позволяют точно установить оптимальный момент и степень деформации при использовании «мягкого» обжатия на различных МНЛЗ.

Вместе с тем, совместные исследования компаний SMS Concast и Posco [13] показали, что для достижения стабильного положительного эффекта от применения «мягкого» обжатия необходимо управлять обжимными роликами на основании результатов расчета параметров жидкой лунки при помощи физико-математической модели. При этом входными данными для расчетов являются показания датчиков и контрольно-измерительных приборов о температуре расплава, подаваемого в кристаллизатор, скорости вытягивания за-

готовки, пространственного положения роликов и др. Данный метод подтвердил свою эффективность.

В этой связи наиболее оптимальными на данный момент вариантами реализации технологии «мягкого» обжата следует считать такие конструкции МНЛЗ, где доля жидкой фазы и металлургическая длина заготовки определяется инструментально непосредственно в ходе процесса. Как и в случае с ЭМП системой обжата должна управлять АСУ ТП на основании данных о текущих значениях технологических параметров разлива. Вместе с тем, это не исключает необходимость моделирования данного процесса, так как только путем расчетов можно на предварительной стадии, а также в ходе разлива определить оптимальный режим работы любой системы внешнего воздействия, в том числе, «мягкого» обжата, для каждого конкретного случая.

По мнению многих исследователей существенного эффекта от использования мягкого обжата можно добиться, если деформация твердой оболочки будет приводить к разрушению транскристаллитных мостов в осевой зоне заготовки [1, 3, 4 и др.]. Но такая ситуация наиболее вероятна лишь после полного снятия перегрева на завершающей стадии кристаллизации заготовок относительно небольшого сечения (например, сортовых). В случае разлива блюмов вероятность транскристаллизации существенно ниже.

Резюмируя вышеизложенное, необходимо отметить, что положительный эффект использования ЭМП и «мягкого» обжата во многом обусловлен созданием условий для формирования в расплаве дополнительных зародышей кристаллической фазы. Одной из причин, вызывающих такой результат, является обламывание ветвей дендритов. Как следствие, структура металла становится мелкозернистой, подавляются процессы микро- и макросегрегации.

Учитывая изложенное, можно предположить, что новые средства динамического воздействия на затвердевающую заготовку должны работать в циклическом режиме. Основанием для данной гипотезы могут служить следующие соображения.

При однонаправленном внешнем воздействии (постоянство направления и величины скорости потока в зоне воздействия) разрушение дендрита требует значительных энергозатрат. Учитывая определенную аналогию рассматриваемого процесса с разрушением деталей при циклическом нагружении, можно утверждать, что пе-

риодическое изменение давления вблизи фронта кристаллизации и направления движения жидкости (реверс, турбулизация потока) существенно повышает вероятность отделения ветвей второго и более высоких порядков от дендрита. Справедливость сказанного подтверждается достаточно высокой эффективностью систем с изменяемым направлением перемешивания. Чтобы гарантировать разрушение дендрита при кратковременном воздействии, например, на участке ЭМП или «мягкого» обжатия, требуется превысить предел прочности металла. И хотя это относительно небольшая величина вблизи температуры кристаллизации (3–10 МПа по разным оценкам [14]), добиться такого перепада давления вблизи дендрита достаточно сложно.

Следует отметить, что при увеличении скорости деформации напряжение текучести возрастает, а пластичность падает. Так как пластичность стали при температуре, близкой к температуре кристаллизации весьма мала (т.н. провал пластичности) [4], изгиб ветви дендрита с высокой долей вероятности может привести к ее обламыванию. При этом, чем больше будет скорость деформации, тем выше будет вероятность разрушения ветвей дендрита.

Кроме того, согласно теории ОМД в очаге деформации будет выделяться теплота. Так как ветвь дендрита с точки зрения механики представляет собой консольно закрепленную балку, теплота будет выделяться вблизи ее основания (при условии, что толщина ветви по длине не сильно изменяется). Так как даже незначительное превышение температуры металла над точкой кристаллизации приведет к обратному фазовому переходу, то можно предположить, что обламывание ветвей дендрита происходит по причине их расплавления в зоне деформации. Так как вторичные ветви дендрита ориентированы практически вдоль изотерм температурного поля слитка, градиент температуры по длине практически равен нулю. Многократный изгиб ветвей существенно повысит вероятность их отделения от ствола дендрита и приведет к образованию новых зародышей кристаллов. Очевидно, что вероятность отделения ветви в результате расплавления металла в зоне деформации при циклическом воздействии следует считать достаточно высокой.

Для обеспечения эффективного циклического воздействия на растущие дендриты необходимо использовать системы, вызывающие в расплаве высокочастотные колебания, кавитацию, турбули-

зацию течения вдоль фронта кристаллизации. В конечном итоге, одним из основных критериев, определяющих выбор в пользу того или иного способа динамического воздействия на металл в процессе кристаллизации, помимо эффективности влияния на качественные показатели литья, является величина капитальных и эксплуатационных затрат, необходимых для достижения поставленной задачи.

Литература

1. Затвердевание металлического расплава при внешних воздействиях / А.Н. Смирнов [и др.]. – Донецк: Издательство «ВИК». – 2002. – 169 с.

2. Системы электромагнитного перемешивания жидкой стали на сортовых, блюмовых и слябовых МНЛЗ / В.А. Грачев [и др.] // Технический альманах «Оборудование». – М.: ВНИИМЕТМАШ. – 2005. – № 4. – С. 48–52.

3. Ефимов, В.А. Современные технологии разливки и кристаллизации сплавов / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов // М.: Машиностроение. – 1998. – 360 с.

4. Стальной слиток. Т. 1. Управление кристаллической структурой / Ю.А. Самойлович [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2000. – 583 с.

5. Смирнов, А.Н. Непрерывная разливка стали / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан // Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.

6. Кабишов, С.М Анализ влияния технологических параметров на процесс формирования зоны столбчатых дендритов в непрерывнолитой заготовке / С.М. Кабишов, И.А. Трусова, П.Э. Ратников // Вести НАН Беларуси. – 2015. – № 4. – С. 20–26.

7. Тепловые процессы при непрерывном литье стали / Ю.А. Самойлович [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 152 с.

8. Термодинамические и молекулярно-кинетические исследования металлических и шлаковых расплавов: Сб. ст. / Уральский научный центр АН СССР ; отв. ред. А.А. Белоусов. – Свердловск : УНЦ АН СССР. – 1985. – 117 с.

9. Попель, С.И. Теория металлургических процессов / С.И. Попель. – М.: ВИНТИ, 1971. – 132 с.

10. Современные сортовые МНЛЗ: Перспективы развития технологии и оборудования / А.Н. Смирнов, А.Л. Подкорытов. – До-

нецкий национальный технический университет, ОАО «Енакиевский металлургический завод». [Электронный ресурс]. Режим доступа к ресурсу: <http://uas.su/articles/continuouscasting/00001.php>.

11. Сотников, А.А. Системы мягкого обжата на машинах непрерывной разливки стали и их влияние на качество макроструктуры заготовок / А.А. Сотников, С.В. Терлецкий, С.Э. Марушкевич // Литье и металлургия. – 2012. – № 3. – С. 176–178.

12. Мазур, И.П. Математическая модель упругопластического деформирования непрерывного слитка с жидкой сердцевиной / И.П. Мазур, В.В. Барышев, М.О. Седых // Производство проката. – 2002. – № 9. – С. 2–6.

13. Непрерывное литье блюмов с мягким динамическим обжатием на заводе фирмы Posco, Корея // Металлургическое производство и технология. – 2010. – № 1. – С. 16–23.

14. Самойлович, Ю.А. Деформация и вероятность разрушения дендритных кристаллитов в затвердевающем слитке под действием мягкого обжата / Ю.А. Самойлович, В.И. Тимошпольский // Вести НАН Беларуси. – 2009. – № 1 – С. 25–29.