

3. Дюдкин Д.А. Качество непрерывнолитой стальной заготовки. — К.: Тэхника, 1988. — 253 с.
4. Мяшита И. и др. Содержание кальция и кислорода в железе в процессе раскисления кальцием // В сб. «Взаимодействие газов с металлами (Тр. III советско-японского симпозиума)» — М.: Наука, 1973. — С. 50–59.
5. Шульте Ю.А. Хладостойкие стали. — М.: Металлургия, 1970. — 224 с.

© Дюдкин Д.А., Онищук В.П., Ковалев Г.М., 1999.

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И РАЗВИТИЕ ЛИКВАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВКАХ

СМИРНОВ А.Н. (ДонГТУ)

Рассмотрены особенности управления качеством непрерывнолитой заготовки при использовании динамических воздействий. Показана целесообразность наложения динамических воздействий на различных этапах затвердевания.

Последние три десятилетия в сталелитейном производстве характеризуются бурным увеличением доли стали, которую разливают на машинах непрерывной разливки (МНЛЗ). В ведущих странах практически вся сталь, идущая на металлургический передел разливается на МНЛЗ. Вместе с тем дальнейшее развитие технологических аспектов непрерывной разливки стали должно обязательно учитывать тенденцию значительного повышения требований к качеству заготовки и конечной продукции, а также увеличению удельной производительности МНЛЗ. Для подавления и предотвращения дефектов кристаллизационного, усадочного и ликвационного характера на практике все большее распространение получают специальные технологические приемы, которые позволяют управлять качеством металла за счет регламентированного принудительного перемешивания жидкой фазы непрерывнолитой заготовки. К числу таких приемов, которые получили заметное распространение в практике непрерывной разливки стали, следует отнести электромагнитное перемешивание жидкой фазы, вдувание нейтрального газа в струю металла, при ее движении в кристаллизатор, а также «мягкое обжатие» заготовки в конце ее затвердевания [1–3].

Учитывая тот факт, что формирование той или иной группы дефектов кристаллизационного, усадочного или ликвационного характера происходит на определенных стадиях затвердевания, применительно к непрерывнолитой заготовке представляется целесообразным осуществлять дополнительное воздействие на различных участках вдоль технологической линии заготовки в зависимости от спектра решаемых задач. По совокупности получаемых эффектов и специфике используемых приемов воздействия можно условно выделить следующие наиболее характерные зоны для наложения внешнего воздействия:

- зона кристаллизатора или непосредственно расположенная под кристаллизатором;
- зона вторичного охлаждения, удаленная от нижнего торца кристаллизатора на расстоянии нескольких метров (то есть зона формирования столбчатых кристаллов);
- зона объемной кристаллизации (зумпфовая зона).

Нахождение металла в кристаллизаторе сопровождается наиболее динамично развивающимися процессами, которые во многом определяют эффективную работу

МНЛЗ в целом и качество непрерывнолитой заготовки как результата разливки. К числу таких процессов, в первую очередь, следует отнести:

- взаимодействие жидкой ванны со струей металла попадающей в кристаллизатор из промежуточного ковша;
- взаимодействие располагающейся на зеркале металла шлакообразующей смеси с прилегающим металлом;
- непрерывное формирование твердой корочки металла вдоль стенок кристаллизатора;
- возвратно-поступательное скольжение каркаса из твердой фазы вдоль стенок кристаллизатора;
- изменение геометрических размеров заготовки (усадка) в ходе ее затвердевания.

В общем случае динамика развития вышеперечисленных процессов зависит от достаточно большой совокупности факторов, значительная часть из которых обычно считается случайной (например, зарастание или размывание погружного стакана, эрозия головки стопора или стакана дозатора, изменение расхода металла при перековшовках, колебание слоя шлакообразующей смеси в кристаллизаторе, колебания температуры стали в кристаллизаторе и пр.). В связи с этим для повышения качества заготовки, выходящей из кристаллизатора МНЛЗ, и улучшения условий разливки на практике представляется целесообразным применять дополнительные мероприятия, направленные на динамическую стабилизацию процессов, происходящих в жидкой ванне кристаллизатора. Наиболее широкое распространение при этом получил метод электромагнитного перемешивания.

В общем случае наложение электромагнитного поля на жидкую фазу непрерывно литую заготовку может обеспечивать принудительное перемещение потоков расплава в вертикальной или горизонтальной плоскости, а также их геликоидальное движение. Оборудование для электромагнитного перемешивания в настоящее время хорошо изучено и достоинства той или иной схемы хорошо представлены в литературе. Однако независимо от конструкции устройства для электромагнитного перемешивания обеспечивают прямое воздействие на заготовку только на определенном достаточно коротком (несколько десятков сантиметров) участке.

При выборе режимов и характера электромагнитного воздействия необходимо принимать во внимание тот факт, что при непрерывной разливке в достаточно широких пределах изменяется целый ряд определяющих параметров: химический состав стали, температура разливки (в том числе и температура перегрева над линией ликвидус), скорость разливки стали, сечение непрерывно литой заготовки, режим качания кристаллизатора, способ подвода стали в кристаллизатор, режимы вторичного охлаждения, требования к кристаллической структуре и химической однородности и пр. Следовательно, оптимизация рабочих параметров электромагнитного перемешивания для определенных конкретных условий представляется сложной многофункциональной задачей, требующей проведения глубоких качественных исследований. Между тем общие закономерности воздействия электромагнитного перемешивания на формирование непрерывно литой заготовки представляется возможным проследить на основании современных представлений об условиях затвердевания при принудительном перемешивании жидкой фазы и обобщении многочисленных практических данных, представленных в литературе.

Наиболее характерной особенностью распределения скоростей конвективных потоков при электромагнитном перемешивании является их максимальное значение непосредственно у источника воздействия с последующим уменьшением интенсивности перемешивания по мере приближения к оси заготовки. Максимальная ско-

рость принудительных потоков при электромагнитном перемешивании регулируется посредством напряженности электромагнитного поля и может достигать значений нескольких метров в секунду. При этом в зависимости от условий воздействия в жидкой фазе могут формироваться как ламинарные течения, так и турбулентные потоки и вихревые зоны. Однако, как будет показано ниже, ограничения по скорости движения принудительных потоков будут сформулированы из соображений обеспечения химической и физической однородности заготовки (образование так называемых «белых» ликвационных полос).

Основной эффект электромагнитного воздействия, видимо, следует связывать с изменением (стабилизацией) гидродинамической обстановки в жидкой ванне кристаллизатора под влиянием принудительных конвективных потоков. Известно, что попадание струи в кристаллизатор сопровождается интенсивным перемешиванием (бурлением) металла у поверхности и в самом кристаллизаторе, что ухудшает работу шлакообразующей смеси, способствует захвату в металл пузырьков газа и шлаковых включений, затрудняет работу устройства для автоматического контроля уровня металла и пр. Кроме того, несимметричное истечение струи металла, обычно связанное с износом стакана-дозатора или погружного стакана, вызывает соответствующие искажения в движении конвективных потоков в жидкой ванне кристаллизатора, которые приводят к изменению в подводе тепла к границе твердой фазы. Это, в конечном счете, может препятствовать быстрому росту твердой корочки в местах локального перегрева расплава и накладывать дополнительные ограничения на скорость разлива.

В определенной степени вышеперечисленные явления удастся подавить или предотвратить при использовании погружного стакана, обеспечивающего разливку под уровень металла в кристаллизаторе и его направленное истечение. Однако по мере эксплуатации геометрия нижней части погружного стакана может существенно изменяться (несимметричный износ или зарастание внутренней полости), что изменяет гидродинамику движения металла в кристаллизаторе. Кроме того, на практике достаточно много стали разливается открытой струей (сортовая заготовка), а требования к качеству поверхности заготовки при этом оказываются весьма высокие.

Обобщая имеющиеся в литературе данные о направленности принудительных потоков в кристаллизаторе в условиях наложения электромагнитного воздействия, следует отметить, что преобладающее число исследователей считает целесообразным обеспечивать организацию движения восходящих потоков вдоль фронта затвердевания. При этом в литературе отсутствуют практические данные, которые убедительно свидетельствовали бы о каких-либо положительных качественных изменениях в поверхностных или подповерхностных слоях непрерывно литых заготовок при вращательном движении потоков в горизонтальной плоскости.

В целом положительный эффект электромагнитного воздействия в кристаллизаторе на формирование непрерывно литой заготовки посредством принудительных восходящих вдоль фронта затвердевания конвективных потоков, видимо, следует связывать со следующими явлениями:

- улучшение условий выноса из металла газовых пузырьков и макро и микро неметаллических включений;
- подавление отрицательных явлений, связанных с внедрением в жидкую ванну струи металла за счет изменения характера движения потоков металла в кристаллизаторе;
- улучшение условий теплопередачи от «горячей» жидкой сердцевины к границе раздела фаз (в том числе и усреднение жидкой ванны металла по температуре);

— подавление волновых процессов, развивающихся на поверхности металла в кристаллизаторе из-за динамических воздействий, связанных с движением струи металла.

В конечном счете, вышеперечисленные положительные эффекты обеспечивают повышение качества поверхности и корковой зоны непрерывно литой заготовки, предотвращая при этом возможные прорывы металла под кристаллизатором.

При расположении электромагнитного индуктора под кристаллизатором в большинстве случаев положительное влияние на качество заготовки уменьшается.

Наиболее существенными негативными проявлениями, сопровождающими наложение электромагнитного воздействия в кристаллизаторе, принято считать:

— образование полос отрицательной ликвации («белых» полос на серном отпечатке), которые уменьшают химическую однородность заготовки и могут приводить к повышенному образованию трещин при прокатке;

— увеличению износа той части погружных стаканов, которые находятся в зоне влияния электромагнитного перемешивания [4].

Еще одним эффективным приемом повышения качества непрерывнолитой заготовки является *вдувание инертного газа в струю металла*, движущуюся из промковша в кристаллизатор [5]. Это, как правило, способствует снижению эффекта вторичного окисления стали и повышению чистоты по неметаллическим включениям за счет их выноса с пузырьками газа.

Вдувание газа в металл осуществляется при этом либо через специальные пористые вставки, установленные в стакане-дозаторе или погружном стакане, либо через внутреннюю полость стопора-моноблока через отверстие в его головной части. На наш взгляд, последний способ имеет достаточно очевидные преимущества, поскольку не требует дорогостоящих огнеупоров, а вдуваемый газ естественным образом проникает в центральную часть струи, стабилизируя ее конфигурацию. Установлено [6], что при вдувании инертного газа через стопор-моноблок наблюдается более равномерное распределение пузырьков газа в жидкой ванне кристаллизатора. Это, видимо, объясняется тем фактом, что пузырьки газа совершают свое движение непосредственно в центральных зонах струи металла, сформированной еще в стакане-дозаторе, и соответственно увлекаются в дальнейшее движение конвективными потоками при истечении в кристаллизатор. При вдувании же газа через пористые вставки в погружном стакане или стакане-дозаторе его всплытие в жидкой ванне кристаллизатора происходит в зонах, которые расположены непосредственно у внешней стенки погружного стакана. Таким образом, всплывает до 75–85% объема инжектируемого газа, а остальные пузырьки увлекаются потоками металла в глубь жидкой ванны.

Для сравнения в таблице 1 приведены полученные в ходе физического моделирования данные по оценкам критического расхода газа для различных методов его вдувания (оценки выполнены по интенсивности разбрызгивания металла в кристаллизаторе). Установлено, что с увеличением угла наклона выходных отверстий к горизонту (вглубь жидкой фазы) критические значения расхода газа несколько увеличиваются при его вдувании через стопор (на 20–40%) и при вдувании через пористые вставки в стакане-дозаторе (10–20%). Максимальных значений расход газа достигает при разливе стали через сквозной погружной стакан.

Заслуживает особого упоминания практическая возможность совместного применения вдувания аргона и электромагнитного перемешивания металла в кристаллизаторе [7]. Как видно из рисунка 1, электромагнитное перемешивание металла в кристаллизаторе предотвращает проникновение вдуваемых пузырьков газа вглубь жидкой ванны и способствует их более равномерному распределению по сечению

кристаллизатора. В качественном плане это способствует повышению чистоты заготовки по неметаллическим включениям и снижает вероятность появления в ее металле газовых пузырей. Видимо, такой метод обработки представляется весьма привлекательным при разливке слябов небольшой толщины, так как в этом случае оказывается достаточно сложным управление процессами перемешивания вдоль широкой грани кристаллизатора.

Таблица 1 — Результаты оценки критического расхода газа в зависимости от метода его вдувания.

№	Способ инжектирования газа в струю	Состояние поверхности металла в кристаллизаторе в зависимости от расхода газа (расход в объемных долях от расхода металла в струе)	
		Без бурления с разбрызгиваниями	Бурление с разбрызгиваниями
1	Вдувание через пористую вставку в стакане-дозаторе	0,03–0,04	0,06–0,08
2	Вдувание через пористую вставку в погружном стакане	0,02–0,03	0,04–0,05
3	Вдувание через стопормоноблок	0,08–0,09	0,15–0,20

Наложение внешнего воздействия в зоне роста столбчатых кристаллов имеет своей целью обеспечение улучшения качества непрерывно литой заготовки в зоне столбчатых (дендритных) кристаллов за счет их измельчения и уплотнения. Помимо этого наличие восходящих конвективных потоков (в случае их принудительного формирования) обеспечивает определенное повышение чистоты металла в этой зоне. Учитывая значительную удаленность этой зоны от зеркала металла в кристаллизаторе, следует предположить, что воздействие может быть осуществлено только при подаче внешних вынуждающих импульсов через боковые стенки заготовки.

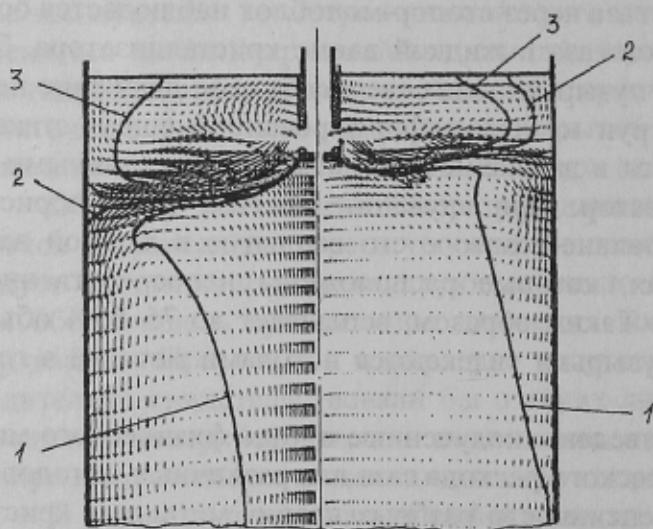


Рисунок 1 — Схематическое представление распределения скоростей потоков металла и зон с определенным содержанием вдуваемого газа в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ (слева — без электромагнитного перемешивания; справа — с электромагнитным перемешиванием): 1 — содержание газа 7%; 2 — содержание газа 14%; 3 — содержание газа 21%

На практике в этой зоне используется электромагнитное перемешивание.

Наложение электромагнитного перемешивания в зоне формирования столбчатых кристаллов может препятствовать формированию различного ро-

да перемычек между противоположными фронтами затвердевания, что, в конечном счете, обеспечивать значительное подавление дефектов усадочного (пористость) и ликвационного характера. При электромагнитном перемешивании (особенно в турбулентном режиме) условия формирования дендритов, как это видно из рисунка 2, *а*, могут существенно изменяться. Это в первую очередь будет относиться к тем дендритам, которые выступают за фронт затвердевания в жидкую ванну. Соответственно, при такой обработке линия фронта затвердевания будет выравниваться, а формирующаяся кристаллическая структура — уплотняться. Нельзя исключать также и высокую вероятность того, что под воздействием динамических нагрузок часть вершин дендритов будет попросту механически обрушаться (рисунок 2, *б*) и осколки твердой фазы попадут в жидкую ванну, где будут постепенно оседать в зумпфовую зону [8]. Наличие частиц твердой фазы перед фронтом затвердевания в зоне роста столбчатых кристаллов в свою очередь при определенных условиях способствует ускорению перехода от зоны столбчатых к зоне равноосных кристаллов [9].

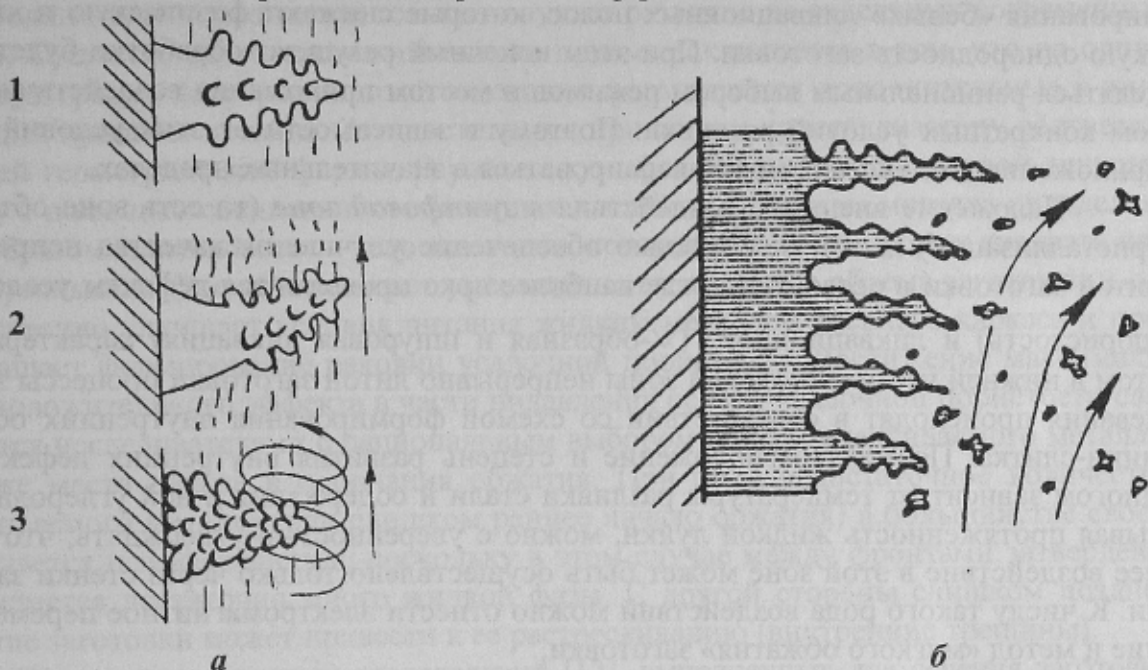


Рисунок 2 — Схематическое представление основных механизмов формирования столбчатых дендритов в условиях наложения принудительного перемешивания: *а* — деформация формы дендритов при различных течениях жидкости: 1 — без течения жидкости; 2 — при ламинарном; 3 — при турбулентном режиме течения; *б* — разрушение вторичных и третичных ветвей дендритов под действием потока жидкости

Не останавливаясь на глубоком анализе результатов воздействия электромагнитного перемешивания в зоне роста столбчатых кристаллов, следует отметить, что они во многом зависят от места приложения и интенсивности воздействия, содержания углерода в стали, степени перегрева стали, скорости движения и направленности принудительных конвективных потоков и пр. Так, измельчение столбчатых кристаллов при электромагнитном перемешивании достигается в достаточно широком диапазоне интенсивности воздействия (при создании вертикальных восходящих потоков). Однако этот эффект сопровождается, как правило, образованием полосы «белой» (по серному отпечатку) ликвации, которая при увеличении интенсивности воздействия проявляется все более ярко. Учитывая тот факт, что в литературе отсутствуют серьезные практические доказательства того, что такие «белые» ликвационные полосы не оказывают отрицательного влияния на качество непрерывно литой заго-

товки, следует, видимо, признать высокую вероятность негативных проявлений (внутренние трещины) при прокатке такого металла. В ряде исследований приводятся рекомендации по ограничению значений энергетических параметров индуктора (например, силы тока) в зависимости от индекса проявления «белой» полосы. Однако такие данные не могут носить универсального характера из-за различий в конструкции индуктора и в условиях разливки. С другой стороны, эффект электромагнитного перемешивания оказывает влияние на формирование заготовки в достаточно малом (по сравнению с общим временем затвердевания) временном интервале. Поэтому при выходе из зоны действия электромагнитного перемешивания оказывается вполне вероятным восстановление нормальных закономерностей роста зоны столбчатых кристаллов, что снижает однородность кристаллической структуры.

Таким образом, наложение электромагнитного перемешивания в зоне роста столбчатых кристаллов может иметь как позитивные, так и негативные проявления. Интенсивность наложения воздействия во многом ограничивается процессом формирования «белых» ликвационных полос, которые снижают физическую и химическую однородность заготовки. При этом конечный результат обработки будет определяться рациональным выбором режимов и местом приложения воздействия с учетом конкретных условий разливки. Поэтому в зависимости от этих условий место приложения воздействия может варьироваться в значительных пределах.

Наложение внешнего воздействия *в зумпфовой зоне* (то есть зоне объемной кристаллизации) имеет своей целью обеспечение улучшения качества непрерывно литой заготовки в осевой зоне, где наиболее ярко проявляются дефекты усадочного (пористость) и ликвационного (∇ -образная и шнуровая ликвация) характера. При этом в нижней части зумпфовой зоны непрерывно литой заготовки процессы затвердевания происходят в соответствии со схемой формирования внутренних объемов мини-слитка. Поэтому расположение и степень развития внутренних дефектов во многом зависит от температуры разливки стали и содержания в ней углерода. Учитывая протяженность жидкой лунки, можно с уверенностью утверждать, что внешнее воздействие в этой зоне может быть осуществлено только через стенки заготовки. К числу такого рода воздействий можно отнести электромагнитное перемешивание и метод «мягкого обжатия» заготовки.

Выбирая режимы электромагнитного перемешивания для обработки жидкой фазы зумпфовой зоны, следует в максимальной степени учитывать условия формирования твердой фазы заготовки. По существу в этой зоне происходит объемная кристаллизация на базе частиц твердой фазы, находящихся в расплаве. Как правило, такая кристаллизация сопровождается появлением твердого каркаса, который по мере его роста становится все более прочным и его составляющие ветви препятствуют подпитке жидкостью донных объемов жидко-твердой ванны, что способствует развитию осевой пористости. Соответственно, для улучшения условий затвердевания последних (донных) объемов непрерывно литой заготовки представляется целесообразным принудительное разрушение формирующегося каркаса, которое оказывается возможным при возбуждении конвективных потоков.

Анализируя известные экспериментальные результаты по применению электромагнитного перемешивания в зумпфовой зоне, следует отметить, что на практике в большинстве случаев рекомендуется обработка, обеспечивающая формирование циркуляционных потоков в плоскости, перпендикулярной оси заготовки [4, 10, 11]. Рациональный выбор места и интенсивности приложения такого воздействия обеспечивает существенное уменьшение протяженности жидкой лунки и соответственно уменьшение количества макродефектов типа усадочная пористость при измельчении

зерна кристаллической структуры. При этом практически не поддаются управлению осевые пористость и ликвация, формирование которых происходит на значительном удалении от места приложения электромагнитного воздействия. Не существует также однозначного мнения о положительном влиянии электромагнитного перемешивания на развитие V-образной ликвации. В ряде случаев отмечается увеличение протяженности ликвационных полос.

Создание принудительных потоков, движущихся вдоль фронта затвердевания, на наш взгляд, не может обеспечить существенного повышения качества заготовки, так как зумпфовая зона достаточно обогащена ликватами и, следовательно, движение металла вдоль фронта затвердевания будет способствовать развитию дополнительных ликвационных полос положительной ликвации (типа V-образной ликвации).

Подавление этой группы дефектов оказывается возможным, видимо, только при использовании так называемого метода «мягкого обжатия» (soft reduction) [12]. В настоящее время этот метод только получает развитие на отдельных современных МНЛЗ. Существо этого технологического приема заключается в том, что на одной или двух гранях непрерывнолитой заготовки формируются дополнительные в виде трапеций приливы металла. Это достигается приданием кристаллизатору соответствующей геометрической формы. В районе зумпфовой зоны (после первой тянущей клетки) с помощью специальных обжимных клеток эти приливы металла определенным образом вдавливаются в тело заготовки, которая принимает форму квадрата или прямоугольника. Это обеспечивает уменьшение внутреннего объема заготовки и соответственно улучшает условия питания жидким металлом твердого каркаса и предотвращает формирование раковин усадочной пористости. Достижение максимального положительного эффекта в части подавления осевой усадочной пористости связывается исследователями с рациональным выбором объема вдавливаемого металла, а также места начала и окончания обжатия. При этом недостаточное количество вдавливаемого металла (или слишком раннее начало обжатия) в большинстве своем оказывается неэффективным, поскольку в этом случае между фронтами затвердевания остается достаточно много жидкой фазы. С другой стороны слишком позднее обжатие заготовки может привести к ее растрескиванию (внутренние трещины).

Например, по данным исследований [12], выполненных для сечения заготовки типа «блум» применительно к нержавеющей стали, при механическом «мягком обжатии» достигнуто уменьшение пористости не менее чем на 55%. При этом размеры пор уменьшились с 7 мм до 3,2 мм, а на отдельных участках пористость полностью отсутствовала. В результате исследований установлено, что эффективность механического «мягкого обжатия» во многом зависит от места приложения и величины давления на заготовку. Установлено, что для достижения высокого положительного эффекта доля твердой фазы в центральной зоне должна составлять более 50%. Другой характерной чертой воздействия по методу «мягкого обжатия» следует, видимо, считать некоторые специальные условия при вдавливании приливов на гранях заготовки. Наибольший эффект, как правило, достигается при вдавливании приливов в 3–4 этапа с регламентированным расположением точек приложения нагрузки по длине заготовки.

Что же касается подавления осевой ликвации при использовании метода «мягкого обжатия», то здесь данные различных исследователей значительно расходятся. Это, вероятно, объясняется тем фактом, что для различных марок сталей эффект «мягкого обжатия» проявляется в разной степени. Например, по данным [14] значительное снижение уровня осевой ликвации при использовании метода «мягкого обжатия» отмечено в бломах из стали с содержанием углерода 0,8%. При этом подавление осевой ликвации

достигается все-таки за счет развития эффекта выдавливания жидкой фазы в более высокие горизонты. Между тем в большинстве случаев с полной уверенностью можно говорить лишь о том, что при наложении «мягкого обжата» происходит некоторое «размывание» ликвации в центре заготовки за счет принудительного перемещения жидкой фазы. В свою очередь, этот эффект во многом определяется жесткостью твердой оболочки, так как в противном случае происходит выпучивание боковых граней, что компенсирует уменьшение сечения жидкой фазы при вдавливании приливов. Для достижения максимального эффекта при подавлении осевой ликвации, видимо, следует предусматривать дополнительные поддерживающие ролики вдоль боковых граней, что, конечно же, значительно удорожает себестоимость заготовки.

Обобщая рассмотренные в настоящей статье практические выводы и рекомендации относительно эффективности наложения динамических воздействий на различных этапах затвердевания непрерывно литой заготовки, следует отметить, что степень эффективности такой обработки зависит от достаточно большого числа внешних факторов. Прежде всего, для достижения максимального положительного эффекта при наложении динамического воздействия необходимо ответить на определенную совокупность вопросов: какие энергетические показатели принудительного перемешивания наиболее рациональны (или допустимы); предпочтительное движение принудительных конвективных потоков расплава (линейное или циркуляционное); какая предельная скорость движения потоков и на каких стадиях затвердевания допустима; место приложения (расположения) источника воздействия; какой объем расплава будет участвовать в перемешивании и каким образом это повлияет на всю систему; в какой степени требуется реконструкция существующего технологического оборудования при реализации предлагаемой схемы воздействия и пр.

В целом рассмотренные виды динамических воздействий позволяют повысить качество поверхности и подповерхностных слоев заготовки, улучшить чистоту стали по неметаллическим включениям, улучшить показатели внутренней кристаллической структуры заготовки, подавить ликвационные дефекты и пористость. Однако для достижения такого широкого спектра положительных качественных эффектов наложение динамического внешнего воздействия в каком-либо отдельном месте на технологической длине заготовки оказывается недостаточным. Поэтому на практике широко используется система нескольких электромагнитных индукторов (мультиэлектромагнитное перемешивание), расположенных вдоль технологической оси заготовки, а также использование электромагнитного перемешивания совместно с другими методами. Преимуществами такого рода комбинированных методов воздействия являются более равномерный подвод внешней энергии к жидкой фазе, уменьшение интенсивности воздействия в каждом месте его приложения (снижение вероятности появления «белых» ликвационных полос) и т.п. Основным же недостатком этой системы является резкое возрастание расходов на обработку. С определенной степенью условности сравнение преимуществ, которые могут быть достигнуты при комбинированном воздействии приведено на рисунке 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наложение на жидкую фазу непрерывно литой заготовки внешних динамических воздействий сопровождается развитием определенной совокупности физических явлений, которые при соответствующих условиях могут существенным образом влиять на качество металлопродукции в части улучшения поверхности заготовки, повышения чистоты металла по неметаллическим включениям, измельчения кристаллической структуры, подавления дефектов усадочного и ликвационного характера. Применение электромагнитного перемешивания позволяет корректировать

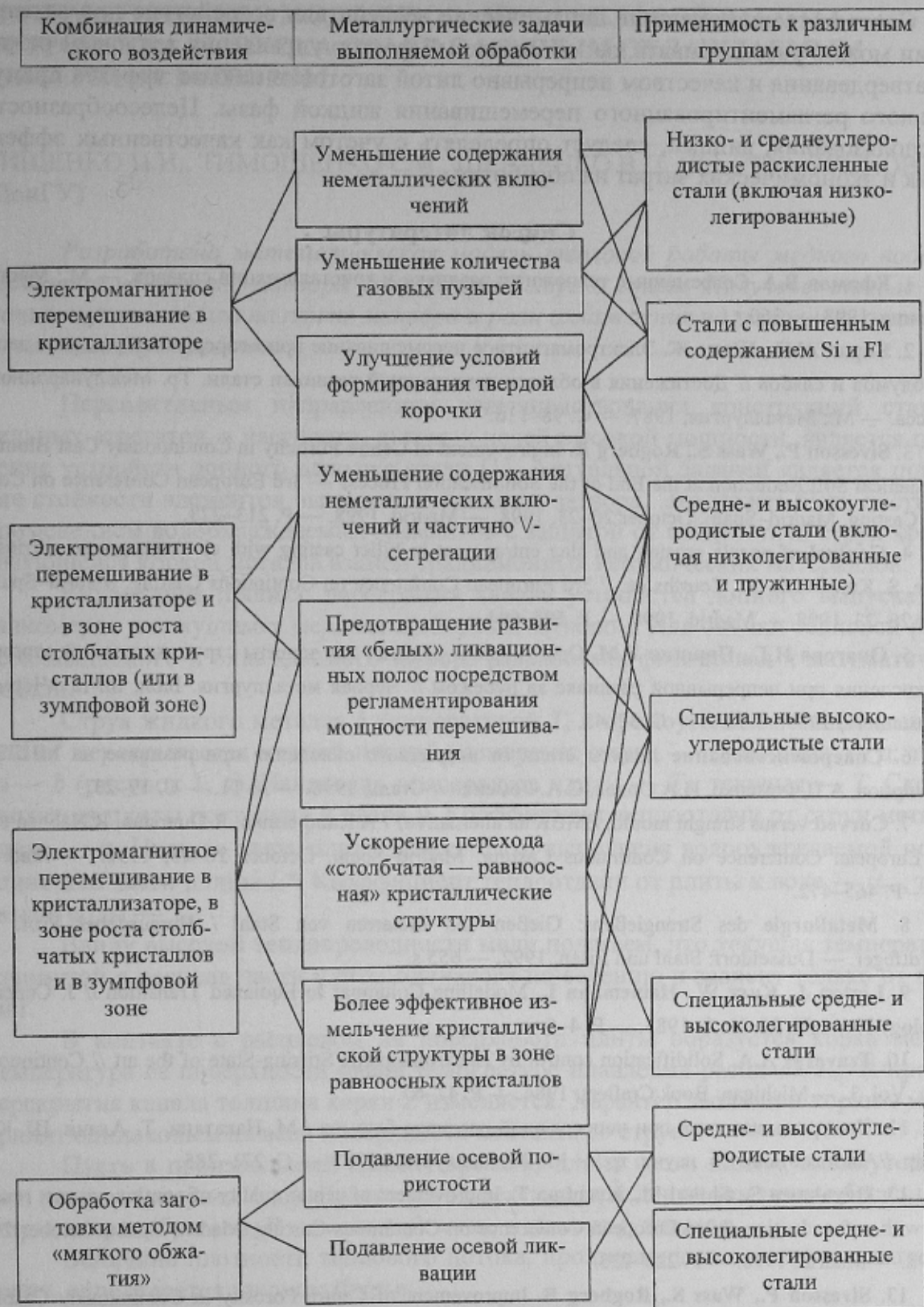


Рисунок 3 — Сравнение качественных эффектов, которые достигаются при различных схемах динамических воздействий.

негативные эффекты, которые обычно связываются с перегревом стали в проковше и колебаниями скорости разливки металла, что повышает стабильность работы МНЛЗ и расширяет возможности автоматизации процесса разливки.

Соответственно внешние динамические воздействия при затвердевании можно рассматривать как объективный фактор управления тепловым режимом затвердевания и качеством непрерывно литой заготовки на базе эффекта принудительного регламентированного перемешивания жидкой фазы. Целесообразность его использования, видимо, следует определять с учетом как качественных эффектов, так и экономических затрат на обработку.

Список литературы

1. **Ефимов В.А.** Современные технологии разлива и кристаллизации сплавов. — М.: Машиностроение, 1998. — 360 с.
2. **Бират Ж.П., Шоне Ж.** Электромагнитное перемешивание при непрерывной разливке заготовок, блюмов и слябов // Достижения в области непрерывной разливки стали. Тр. Международного конгресса. — М.: Металлургия, 1987. — С. 98–116.
3. **Sivesson P., Wass S., Rogberg B.** Improvement of Centre Porosity in Continuously Cast Blooms by Mechanical Soft Reduction at the End of the Solidification Process — 3rd European Conference on Continuous Casting. Madrid–Spain, October 20–23, 1998. — Madrid, 1998. — P. 213–223.
4. **Control of nozzle erosion and slag entrapment in billet casting with electromagnetic stirring / E. Favre, S. Kunstreich, W. Courths ea.** // 3rd European Conference on Continuous Casting. Madrid–Spain, October 20–23, 1998. — Madrid, 1998. — P. 595–604.
5. **Очагова И.Г., Паршин В.М.** Огнеупорные изделия для защиты струи металла от вторичного окисления при непрерывной разливке за рубежом // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация», 1989. — № 7. — С. 32–43.
6. **Совершенствование защиты стали от вторичного окисления при разливке на МНЛЗ / А.Н.Смирнов, А.П.Фоменко, И.А.Орлов, С.А.Фоменко** // Сталь, 1998. — № 11. — С. 19–23.
7. **Curved versus straight mould, EMBR an alternative? / A.Kamperman, R.Duursma, R.Nabben e.a.** // 3rd European Conference on Continuous Casting. Madrid–Spain, October 20–23, 1998. — Madrid, 1998. — P. 465–472.
8. **Metallurgie des Strangießens: Gießen und Erstarren von Stahl / Herausgeber Prof. K. Schwerdtfeger.** — Dusseldorf: Stahl und Eisen, 1992. — 655 s.
9. **Lipton J., Kurz W., Heinemann L.** Modelling Columnar to Equiaxed Transition // J. Concast Technology News. V. 22. No 2, 1983. — P. 4–6.
10. **Tzavaras A.A.** Solidification control by Electromagnetic Stirring-State of the art // Continuous Casting. Vol. 3. — Michigan: Book Crafters, 1984. — P. 47–67.
11. **Контроль качества при непрерывной разливке блюмов / М. Накатани, Т. Адачи, Ш. Кимия и др.** // Чистая сталь. Сб. научн. тр. — М.: Металлургия, 1987. — С. 271–285.
12. **Hayakawa S., Shikai M., Kashima T.** Improvement of center quality of continuous cast round bloom with soft reduction // 3rd European Conference on Continuous Casting. Madrid–Spain, October 20–23, 1998. — Madrid, 1998. — P. 225–233.
13. **Sivesson P., Wass S., Rogberg B.** Improvement of Centre Porosity in Continuously Casting Blooms by Mechanical Soft Reduction at the End of the Solidification Process // 3rd European Conference on Continuous Casting. Madrid–Spain, October 20–23, 1998. — Madrid, 1998. — P. 213–223.
14. **Chapellier P., Jacquot J.-L., Sosin L.** Twin-bloom casting of high-carbon steels at Sollac: 4 years of continuous improvement // 3rd European Conference on Continuous Casting. Madrid–Spain, October 20–23, 1998. — Madrid, 1998. — P. 583–591.