

д.т.н. Смирнов А.Н.
(ГБУЗ «ДонНТУ», г. Донецк, Украина,
stalevoz@i.ua),
к.т.н. Куберский С.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина,
Skuberskiy@yandex.ru)
Левит М.Б.
к.т.н. Семирягин С.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЯГКОГО ОБЖАТИЯ НА КАЧЕСТВО НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО СЛЯБА

С использованием результатов физического моделирования установлено влияние доли твердой фазы, интенсивности и степени мягкого обжатия на качество непрерывнолитых слябов. Показано, что при обжатии сляба на величину более 6 мм возможно образование трещин на поверхности узкой грани и в углах на стыке фронтов кристаллизации.

Ключевые слова: непрерывнолитой сляб, мягкое обжатие, интенсивность, степень обжатия, доля твердой фазы, выпучивание, трещины, качество.

В условиях развития технологии непрерывной разливки предъявляются высокие требования к качеству поверхности и внутренней структуры заготовки, что обуславливает уровень конкурентоспособности металлопродукции на внутреннем и мировом рынках. Эффективным приемом повышения качества непрерывнолитых заготовок, является реализация технологии их «мягкого» динамического обжатия, на стадии неполной кристаллизации. Эта технология компенсирует объемную усадку стали при затвердевании, способствует значительному снижению осевой пористости, V – образной и осевой ликвации, повышению плотности металла и измельчению первичного зерна при одновременном повышении однородности кристаллической структуры [1].

В настоящее время используется достаточно большое количество технологических приемов предусматривающих различные способы воздействия на кристаллизующийся слиток и являющихся предшественниками метода «мягкого» обжатия – «*soft redaction*».

Первые попытки применения метода мягкого обжатия относятся к концу 80-х годов прошлого века. Это так называемое

статическое «мягкое» обжатие, которое впервые показало достаточную эффективность метода. Например, на фирме «POSCO» с помощью статического мягкого обжатия путем настройки части роликовых сегментов освоили непрерывную разливку трубных сталей всех марок по стандарту API вплоть до X-100 [2].

Недостатком статического метода мягкого обжатия является то, что, если статически позиционируется несколько роликовых сегментов, то участок слитка между первым и вторым порогами проницаемости попадет в них только при определенной скорости литья. Причем это возможно только для стали имеющей определенную температуру и химический состав охлаждаемой по характерному для нее режиму. Но достаточно изменить скорость литья, и пределы зоны мягкого обжатия (первый и второй пороги проницаемости) окажутся за пределами этой зоны. При более низкой скорости обжатие будет поздним и неэффективным вследствие того, что уже сформировались осевая пористость и ликвация. Результатом такого обжатия будет увеличение нагрузок на роликовую подерживающую систему, а также возмож-

ность трещинообразования вследствие повышенной деформации. Даже если разливается марка стали со скоростью, для которой настройка сегментов на клин является оптимальной, то и в этом случае неэффективное обжатие гарантированно после снижения скорости литья. В реальном процессе непрерывной разливки периодическая смена скорости литья приводит к существенной нестабильности границ зоны мягкого обжатия. При этом при отсутствии системы быстрой замены погружных стаканов соотношение суммы периодов стабильного сохранения положений границ меньше суммы периодов стабильного сохранения скорости литья из-за инертности процесса кристаллизации. При статической настройке выборочных сегментов на клин во время периодов нестабильных границ нельзя рассчитывать на уменьшение осевой пористости. Если при одной и той же скорости литья разливается сталь с охлаждением по различным режимам, то при интенсивном охлаждении граница оптимального приложения воздействия смещается к кристаллизатору.

Еще одним опробованным технологическим приемом является так называемое термическое обжатие, заключающееся в изменении режима охлаждения с мягкого на жесткий. Как и в предыдущем случае для таких систем очень важным является точное прогнозирование соотношения жидкой и твердой фаз при реализации обжатия. В противном случае воздействие будет неэффективным либо приведет к ухудшению качества и износу технологического оборудования.

Примером неэффективного использования технологии термического обжатия, являются результаты исследований полученные авторами настоящей статьи при непрерывной разливке сортовых заготовок. На рисунке 1 показаны фотографии шлифов полученных от заготовок разлитых по традиционной технологии (а) и подверженных термическому обжатию за счет более жесткого охлаждения заготовок в конце затвердевания (б). В результате

более жесткого охлаждения сторона сортовой заготовки уменьшилась с 126 мм до 118 мм. Однако неправильное место реализации обжатия не только не повлияло на характер расположения и величину осевых дефектов, но и способствовало образованию внутренних трещин.

Более эффективным является метод динамического «мягкого» обжатия заключающийся в слежении в режиме on-line за ходом затвердевания заготовки и расчете уставок позиционирования (величин ходов штоков гидроцилиндров), которые отрабатываются гидроцилиндрами для обеспечения непрерывного питания области кристаллизации на участке слитка от первого до второго порога проницаемости. Как правило в таких системах используются трехмерные модели мониторинга теплового режима, что позволяет осуществлять динамически оптимизированное регулирование межроликового промежутка и конусности в зависимости от переходных условий разливки (фирма «VAI», Австрия). Такая технология может использоваться на МНЛЗ имеющих возможности варьирования границ зоны «мягкого» обжатия, а также величин обжатия в зависимости от условий эксплуатации и приводит к улучшению внутреннего качества, особенно при разливке высокоуглеродистых сталей [2]. Начало обжатия соответствует наличию 50% жидкой фазы в слитке, конец – 5% независимо от скорости и химического состава.

В процессе разливки в режиме on-line осуществляется непрерывный расчет кристаллизации с учетом химического состава, перегрева стали в промковше и скоростного режима. Параметром, по которому определяются положение границ зоны «мягкого» обжатия, является расстояние от мениска к сечению, в котором на центральной оси слитка достигается значение содержания жидкой фазы в начале и конце обжатия. Величина обжатия дифференцированная по толщине, а также по химическому составу разливаемой стали. Например, для низкоуглеродистых сталей она на 30-40% ниже, чем для трубных.

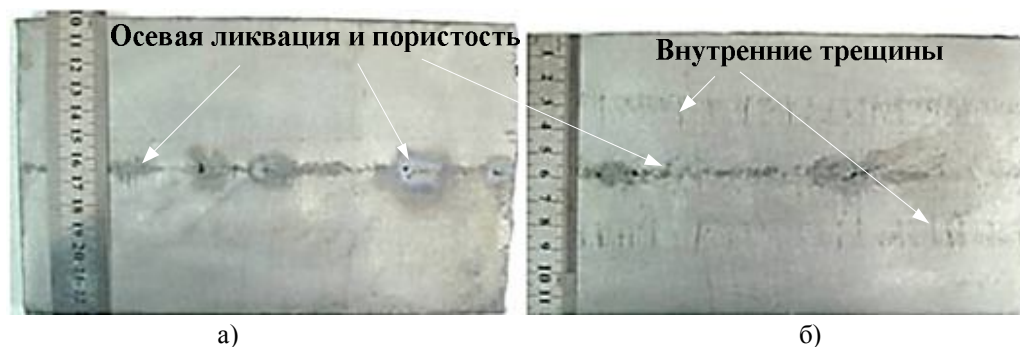


Рисунок 1 – Структура заготовки разлитой по базовой технологии (а) и с применением термического обжата (б)

На основании контроля качества по темплетам установки могут корректироваться с целью достижения оптимального качества.

На принципе прямого измерения основана система динамического «мягкого» обжата фирмы «SMS Demag AG» (Германия). Она включает:

- роликовые сегменты с самоцентрируемыми подвижными верхними рамами «Cyber Link», которые в процессе разливки могут совершать качания с малой амплитудой 0,3 мм и частотой 3 Гц. На каждом семироликовом сегменте для позиционирования установлены 4 гидроцилиндра с датчиками перемещений штоков и давлений;

- систему регистрации величин показателей датчиков перемещений и давлений и анализа сдвига фаз между ними, а также визуализацию на верхнем уровне управления АСУТП [3].

Система анализа на верхнем уровне позволяет в режиме on-line определять положение границ зоны по сдвигу фаз между кривыми изменения показателей датчиков перемещений и давлений. В такой системе снижается степень влияния данных о химическом составе, температуре перегрева металла в проковше, режиме охлаждения, так как датчики реагируют на наличие жидкой фазы и полное затвердевание жидкой сердцевины и определяют это положение объективно. Настройки системы мягкого обжата таким способом выглядят более оперативными, поскольку контроль качества по темплетам, конечно, нужен, но носит, скорее, калибровочный характер.

Для более точного определения границ твердожидкого состояния заготовки необходимо учитывать характер движения расплава в двухфазной зоне. С этой целью дополнительно к уравнениям теплопроводности вводятся уравнения гидродинамики расплава в двухфазной зоне, что позволяет следить за величиной и характером изменения давления расплава в этой зоне, определять и оценивать эффективность мягкого обжата. Это, во-первых, дает возможность не назначать, а точно определять положение первого порога проницаемости и содержание жидкой фазы в двухфазной зоне на оси заготовки, а во-вторых, контролировать давление расплава между первым и вторым порогами проницаемости в режиме реального времени и определять оптимальные уставки позиционирования.

Обобщая оценки влияния «мягкого» обжата на показатель осевой пористости, можно отметить следующее:

- при разливке малоуглеродистых сталей эффективность «мягкого» обжата относительно небольшая, коэффициент снижения концентрации пор в диапазоне скоростей литья 0,8-1,2 м/мин равен 1,17-1,48;

- при разливке углеродистых сталей эффективность мягкого обжата высокая, коэффициент снижения концентрации пор равен 2,0-2,27.

Следует отметить, что есть предел возможностей снижения осевой пористости. После второго (физического) порога проницаемости, при доле жидкой фазы 0,2-0,3, сталь все равно беспрепятственно кристаллизуется с образованием пор и ника-

кие средства, в том числе «мягкое» обжатие, не способны предотвратить их появление.

Сверхнизкоуглеродистые стали без «мягкого» обжатия не испытывают дефицита питания границ практически до второго порога проницаемости. Их показатели осевой пористости могут быть верхней оценкой качества, которые при разливке углеродистых сталей достигаются лишь с использованием мягкого обжатия. Наиболее эффективно «мягкое» обжатие при большой толщине, высоких скоростях и повышенном содержании углерода.

Определенные особенности имеет применение метода «мягкого» обжатия для динамического воздействия на внутренние объемы кристаллизующихся слэбов большого сечения, что следует связывать прежде всего с устойчивостью твердого каркаса заготовки. Во-первых, твердый каркас затвердевающих сортовых заготовок или блюма имеет гораздо большую жесткость, чем у слэба, что существенно увеличивает необходимое удельное усилие обжатия. Это, в свою очередь, повышает вероятность образования внутренних трещин по границам дендритов. С другой стороны, применение обжатия по двум противоположным граням обязательно вызывает изгиб (выпучивание) двух боковых граней, что в значительной степени может изменить условия движения металла в жидкой сердцевине и снизить до минимума эффект уменьшения осевой ликвации вследствие эффекта «перетекания» жидкой фазы.

Таким образом, можно отметить, что использование современных технологий «мягкого» обжатия способствует значительному улучшению качества непрерывнолитого металла. Однако практически все существующие системы функционируют на базе различных математических моделей, что не в полной степени позволяет учесть многообразие физико-химических процессов имеющих место при кристаллизации стали. Кроме того, имеющиеся в литературе сведения о наиболее эффективных соотношениях твердой и жидкой фаз в месте динамической деформации, законе ее приложения, степени, интенсивности и скорости обжатия носят иногда противо-

речивый характер [1-4]. Развить теоретические представления о механизме влияния «мягкого» обжатия на качество металла, а также уточнить основные технологические параметры его реализации можно с использованием методов физического моделирования процессов протекающих в двухфазной области в условиях деформации непрерывнолитой заготовки с не полностью закристаллизовавшейся сердцевиной, что и было основной задачей настоящих исследований.

Для физического моделирования «мягкого» обжатия слэбов использовались модель и методика подробно описанные в работах [5-7]. Исследования проводили с использованием дендритокристаллизующегося вещества камфен, при доле твердой фазы 30-70%, расходе охлаждающей воды на каждую грань 1,125 л/мин, интенсивности обжатия 6 и 12 мм/мин, а также различной степени обжатия.

На всех экспериментах не обнаружено существенного влияния степени обжатия на поведение кристаллизующегося образца. Отличительным является лишь тот факт, что выпучивание происходит более плавно и менее выражен эффект переливания жидкости. Это можно объяснить более благоприятными условиями для частичного затекания моделирующей жидкости в междендритные пустоты, а при большей интенсивности обжатия жидкость не успевает проникнуть в микроскопические поры и более отчетливо проявляется эффект ее выдавливания в направлении жидкофазной области заготовки.

Первые эксперименты были проведены при доле твердой фазы 30% и 40 % (толщина закристаллизовавшейся корочки около $\delta = 13$ мм и $\delta = 18$ мм). При обжатии широких граней на 2 мм никаких значимых изменений в поведении затвердевшей корки узкой грани не наблюдалось. Обжатие на 4 мм вызвало небольшое выпучивание узкой грани, при обжатии на 6 мм произошло сильное выпучивание узкой грани, а при дальнейшем обжатии до 8 мм зафиксировано резкое выпучивание с образованием трещины на середине узкой грани (рисунок 2, а, б).

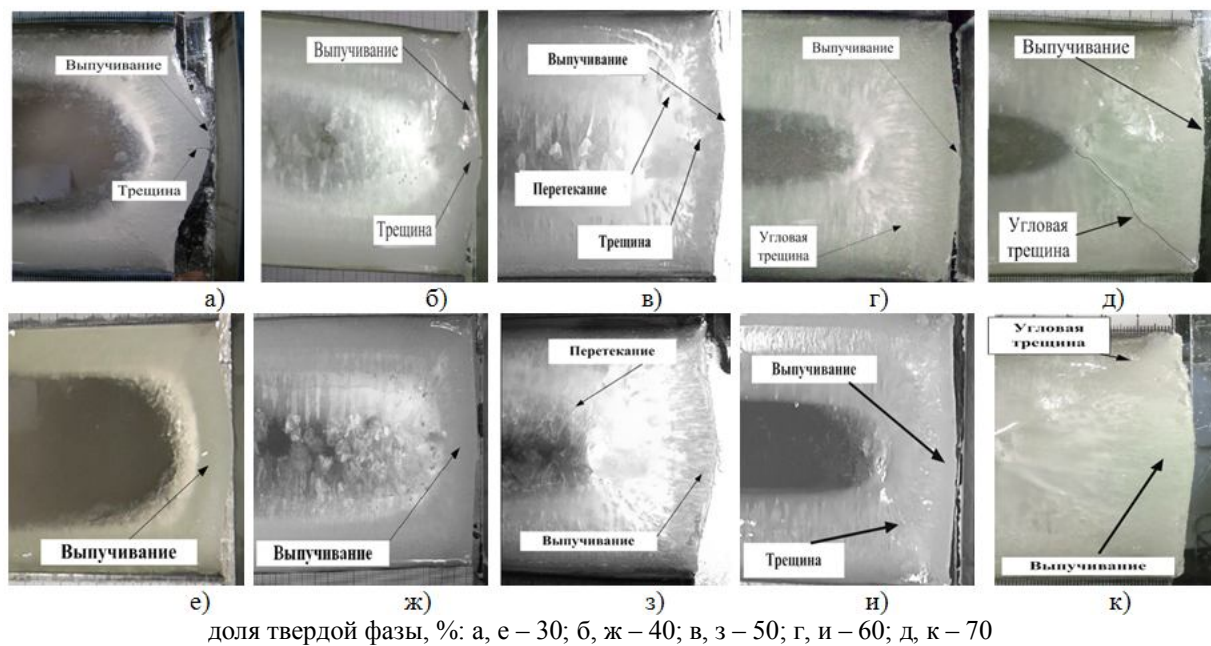


Рисунок 2 – Состояние твердого каркаса камфена после обжатия на 8 мм (а-д) и 6 мм (е-к)

Обжатие при доле твердой фазы 50% ($\delta = 22 \text{ мм}$) показало, что конфигурация твердого каркаса не изменялась вплоть до обжатия на 5 мм, после чего происходило выпучивание сопровождающееся перетеканием жидкой фазы и фиксировалось трещинообразование по центру грани при обжатии более 6 мм (рисунок 2, в).

Аналогичная картина имела место и при экспериментах с долями твердой фазы 60% и 70% ($\delta = 27 \text{ мм}$, $\delta = 33 \text{ мм}$). Однако, образование трещины при обжатии на величину 6 мм и более произошло по углу заготовки в месте стыка фронтов кристаллизации (рисунок 2, г, д, и, к).

На всех опытах структура деформированной корочки мало отличалась от исходной структуры затвердевающего модельного вещества. Увеличение доли твердой фазы вызывало снижение пластических характеристик твердого каркаса и его сопротивляемости обжатию. Кроме того, установлено, что выпучивание корки зависит не только от доли твердой фазы при реализации процесса обжатия но и от его интенсивности (рисунок 3).

В результате проведенных экспериментов удалось установить, что оптимальная величина обжатия, при которой не проис-

ходит возникновения трещин при обжатии, составляет не более 5-6 мм. При увеличении величины обжатия до 7-8 мм происходит выпучивание заготовки и появление трещин по центру узких граней, а также в углах – по стыку фронтов кристаллизации.

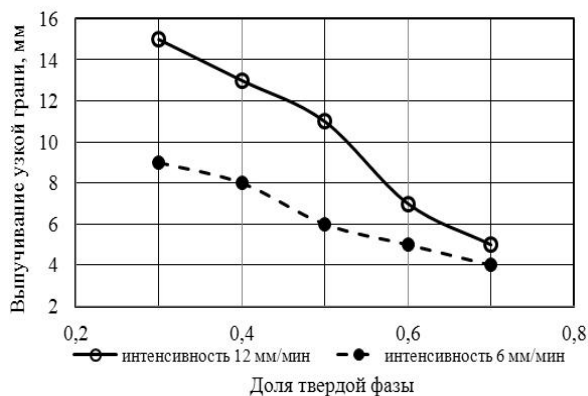


Рисунок 3 – Влияние доли твердой фазы и интенсивности обжатия на величину выпучивания узких граней твердого каркаса модельного вещества

В ходе дальнейших исследований будет разработана методика позволяющая использовать результаты физического моделирования «мягкого» обжатия для оптимизации параметров технологии получения промышленных непрерывнолитых слябов.

Библиографический список

1. Смирнов А.Н. Непрерывная разливка стали / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
2. Паршин В.М. Непрерывная розливка стали / В.М. Паршин. – Липецк: НЛМК, 2011. – 221 с.
3. Еронько С. П. Разливка стали: оборудование, технология / С. П. Еронько, С. В. Быковских. – К.: Техніка, 2003.- 216 с.
4. Смирнов А.Н. Непрерывная розливка сортовой заготовки: Монография / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, А.Л. Подкорытов, В.Е. Ухин, А.В. Кравченко, А.Ю. Оробцев. – Алчевск: ДонГТУ, 2012. – 449 с.
5. Смирнов А.Н. Физическое моделирование условий формирования непрерывнолитой сортовой заготовки в кристаллизаторе высокоскоростной МНЛЗ / А.Н. Смирнов, В.Е. Ухин, Е.Ю. Жибоедов // Процессы литья. – 2009. – №1. – С. 33-42.
6. Куберский С.В. Разработка физической модели методики исследования процесса динамического мягкого обжатия непрерывнолитого сляба / С.В. Куберский, М.Б. Левит, С.В. Семирягин // Сборник научных трудов. Вып.36. Алчевск: ДонГТУ. С. 204-212.
7. Смирнов А.Н. Физическое моделирование процесса динамического мягкого обжатия непрерывнолитого сляба / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, М.Б. Левит, С.В. Семирягин // Металлургическая и горнорудная промышленность. – №7. – 2012. С. 133-136.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А.М.

Статья поступила в редакцию 01.07.13.

д.т.н. Смірнов О.М. (ДВНЗ «ДонНТУ», м. Донецьк, Україна, stalevoz@i.ua), **к.т.н. Куберський С.В.** (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна, Skuberskiy@yandex.ru), **Левіт М.Б.**, **к.т.н. Семірягін С.В.** (ДонДТУ, г. Алчевськ, Україна)

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ М'ЯКОГО ОБТИСНЕННЯ НА ЯКІСТЬ БЕЗПЕРЕРВНО ЛИТОГО СЛЯБА

З використанням результатів фізичного моделювання встановлено вплив частки твердої фази, інтенсивності і ступеня м'якого обтиснення на якість безперервнолитих слябів. Показано, що при обтисненні сляба на величину більше 6 мм можливе утворення тріщин на поверхні вузької грані і в кутах на стику фронтів кристалізації.

Ключові слова: безперервнолитий сляб, м'яке обтиснення, інтенсивність, ступінь обтиснення, частка твердої фази, спучування, тріщини, якість.

Smirnov A.N. (DonNTU, Donetsk, Ukraine, stalevoz@i.ua), **Kuberskiy S.V.** (DonSTU, Alchevsk, Ukraine, Skuberskiy@yandex.ru), **Levit M.B.**, **Semirygin S.V.** (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

ANALYSIS OF INFLUENCE OF PARAMETERS ON THE QUALITY SOFT REDUCTION OF CONTINUOUSLY CAST SLABS

The effect of the solid fraction, the intensity and extent of soft reduction on the quality of continuously cast slabs. It is shown that at a reduction of the slab at a value greater than 6 mm, the formation of cracks on the surface of the narrow edge and in the corners at the intersection of crystallization fronts.

Key words: continuous casting slab, soft reduction, the intensity, the degree of reduction, the proportion of solids, buckling, cracks, quality.