

В.А. МАТОЧКИН, А.Б. СТЕБЛОВ, д-р техн. наук (РУП БМЗ\*),  
Ю.М. АЙЗИН, А.В. КУКЛЕВ, О.А. ТИМОХИН,  
В.В. ТИНЯКОВ, А.М. ТОПТЫГИН (ООО «Корал»)

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛЕЙ С ПОВЫШЕННЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ К КАЧЕСТВУ НА БЛЮМОВОЙ МНЛЗ БЕЛОРУССКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА

Белорусский металлургический завод специализируется на выпуске высококачественного сортового металла для различных отраслей машиностроения, в первую очередь автомобилестроения. По мере совершенствования изделий машиностроения возрастают требования к качеству металла со стороны потребителей, что влечет за собой необходимость совершенствования технологии и оборудования для производства стали. С целью решения этих задач в 1998 г. на БМЗ была проведена реконструкция блюмовой машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), на которой разливаются заготовки сечением 300×400 и 250×300 мм. Разработанные технические решения (кристаллизатор с покрытием, устройство электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе, новая система вторичного охлаждения, система управления непрерывной разливкой и др.) позволили в 1,5 раза увеличить производительность МНЛЗ, снизить брак заготовок (при ультразвуковом контроле), улучшить макроструктуру блюмов и снизить ликвацию углерода, серы и фосфора.

Однако реконструкция не позволила исключить брак по поверхностным дефектам, в первую очередь по продольным трещинам, а также по дефектам макроструктуры типа «ликвационные полосы». До 80 – 100 плавок снизилась стойкость роликовых секций. С целью определения путей улучшения качества металла были проведены металлографические исследования характерных дефектов заготовок из наиболее распространенных марок стали (45, 40ХГНМ) и анализ работы МНЛЗ с расчетом нагрузок, возникающих в заготовке и элементах оборудования.

Изучение дефекта «продольная трещина» показало, что его появление несистематично. Характер трещин – кристаллизационный. С учетом температурного распределения по сечению заготовок их образование происходит в кристаллизаторе в зоне высокотемпературной хрупкости стали (рис. 1). Прерывистый характер трещины, оплавленные края, наличие окалины, диффузионных оксидов, обезуглероженного слоя подтверждают эту гипотезу. Изучение макроизлома показало, что структура металла в области распространения трещины грубая, излом проходит в зоне столбчатых кристаллов. Структура основного металла у поверхности заготовки – пер-

---

\* Республиканское унитарное предприятие «Белорусский металлургический завод».

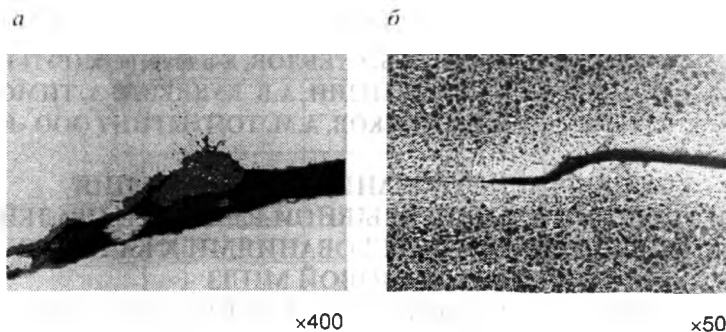


Рис. 1. Микроструктура продольной трещины:

*a* – диффузионное окисление по трещине; *b* – обезуглероживание по трещине

лит, зернистый и видманштеттовский феррит. Цементит перлита пластинчатый, сорбит и троостит. Ближе к центру заготовки структура перлитная с ферритной сеткой. Сетка феррита имеет видманштеттово строение. Внутри трещины встречаются включения алюмосиликатов кальция и марганца с примесью титана, калия и натрия, а также сульфиды марганца. Кроме этих включений в приповерхностной зоне трещины встречаются частицы металлической меди и хрома, причем частицы хрома окислены с поверхности. Можно утверждать, что зарождение трещин происходит в кристаллизаторе, а дальнейшее раскрытие – в зоне вторичного охлаждения. Причины образования трещины – термический удар и механические нагрузки при чрезмерно плотном контакте корочки слитка со стенкой кристаллизатора в результате смещения заготовки к одной стороне кристаллизатора из-за смещения технологической оси МНЛЗ. Это подтверждается наличием материала кристаллизатора и его покрытия, а также высоким и неравномерным по периметру износом медных стенок.

Основным дефектом макроструктуры являются «ликвационные полоски» (рис. 2). Механизм появления дефекта – образование трещин на фронте кристаллизации, в которые засасываются ликваты; происходит «залечи-

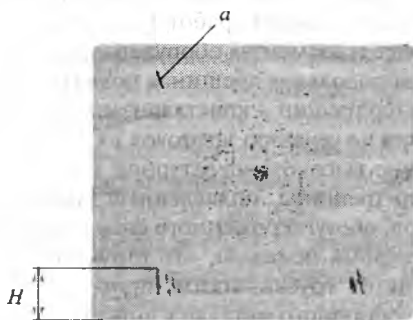


Рис. 2. Схема расположения дефекта «ликвационная полоска» (*a* – «ликвационная полоска»; *H* – глубина залегания дефекта)

вание» трещин и образование ликвационных дефектов. Трещины в корочке блюма возникают, когда сумма напряжений (термические напряжения, напряжения от ферростатического давления, напряжения в результате действия сил трения от вытягивания заготовки, от внешних нагрузок, усадочные напряжения) превышает предел прочности стали при температуре кристаллизации. Анализ показал, что частота появления дефекта зависит от количества плавок, разлитых после замены роликовой секции. Это косвенно свидетельствует о том, что основной причиной дефекта являются напряжения от внешних нагрузок. Глубина залегания дефектов – 30... 40 мм от внешней поверхности. Так как дефект образуется на фронте кристаллизации, координату его образования можно определить по формуле

$$H = k\sqrt{L/v},$$

где  $H$  – толщина корочки (глубина залегания «ликвационной полоски»), см;  $k$  – коэффициент затвердевания, см/мин<sup>1/2</sup>;  $L$  – расстояние от мениска до места образования дефекта, м;  $v$  – скорость вытягивания блюма, м/мин. При скорости вытягивания блюма 0,6 м/мин дефект образуется на расстоянии 1,2 м от мениска, т. е. в верхней части роликовой секции.

Для определения влияния работы оборудования на образование вышеописанных дефектов проведен анализ конструктивных особенностей узлов МНЛЗ и возникающих при их работе силовых воздействий на заготовку. В результате анализа и расчетов выявлено, что узел крепления кристаллизатора на столе механизма качания выполнен так, что его составные части подвешены к нижнему торцу корпуса на восьми шпильках М20, которые воспринимают все внешние нагрузки на кристаллизатор (рис. 3). Эти

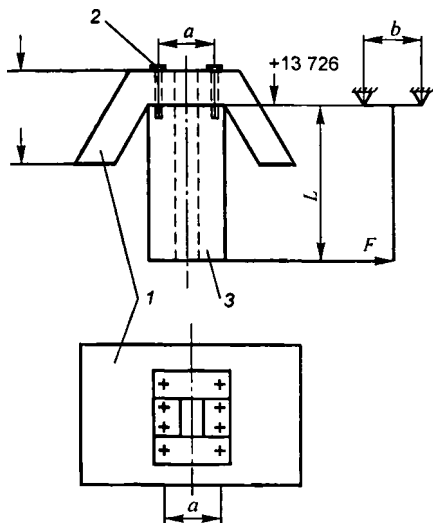


Рис. 3. Схема существующего кристаллизатора МНЛЗ:

1 – корпус кристаллизатора; 2 – болты крепления кристаллизатора к обтекаемому корпусу; 3 – кристаллизатор

резьбовые соединения имеют знакопеременное циклическое нагружение, что приводит к ослаблению затяжки в процессе эксплуатации, образованию люфтов в соединениях, посторонним колебаниям кристаллизатора. Кроме того, существенным недостатком крепления кристаллизатора является то, что каждая из его боковых частей, включая медные и стальные плиты, крепится к корпусу независимо шпильками, в результате чего из-за неравномерной затяжки шпилек и различной податливости металла происходит искажение рабочей полости кристаллизатора с раскрытием стыков медных плит. Из-за консольного крепления кристаллизатора на отметке +13 726 возникают боковые нагрузки  $F$ , что вызывает повышенную выработку нижней части медных плит, возникновение опрокидывающего момента, перекоса и колебания кристаллизатора. Точность крепления корпуса кристаллизатора к столу качания штифтами с коническими захватами недостаточна. Выработка и искажение стыков стола качания и корпуса, выдерживание противоположных значений полей допусков каждой из двух опор корпуса кристаллизатора приводят к перекосу кристаллизатора. Качание кристаллизатора осуществляется от электропривода через два кривошипно-эксцентрикового вала. Траектория перемещения кристаллизатора определяется двумя рессорами, связанными со столом качания. Отсутствие кинематических развязок и степеней свободы вызывает появление боковых составляющих сил, действующих на рессоры. Рессорная подвеска кристаллизатора выполнена однорядной по высоте, что является недостаточным по уровню связей, приводящих к колебаниям и искажению траектории качания кристаллизатора. Отсутствуют четко выраженные базы и привалочные поверхности, относительно которых фиксируются привязочные точки кристаллизатора и расположенной ниже роликовой секции, а также средства контроля положения кристаллизатора на столе качания в статике и динамике. Кроме того, тепловые расчеты кристаллизатора показали, что его охлаждающие каналы, профрезерованные не в медной, а в стальной части, не оптимальны с точки зрения отвода теплоты, что приводит к разупрочнению медных плит.

Вышеизложенные причины вызывают неравномерный несимметричный теплоотвод в кристаллизаторе при смещении заготовки к одной стороне и соответственно рост термических напряжений в корочке слитка. Возникают также боковые нагрузки, вызывающие рост механических напряжений в корочке, которая находится в кристаллизаторе и в верхней части роликовой секции, происходит разрушение поверхности кристаллизатора, выдавливание шлака из зазора между корочкой и слитком, попадание частиц шлака и разрушенного материала кристаллизатора в образующиеся трещины. В результате можно отметить, что конструкция кристаллизатора и механизма качания оказывает значительное влияние на появление продольных трещин на поверхности заготовки, а также частичное влияние на образование «ликвационных полосок» и стойкость роликовых секций за счет увеличения боковых нагрузок на ролики верхней части секции.

Расчет нагрузок на направляющую роликовую секцию показал, что рама секции не соответствует условиям прочности и жесткости при возникновении в аварийных ситуациях внешних нагрузок со стороны заго-

товки, передающихся на раму и рассчитываемых по схеме термических деформаций слитка. Кроме того, конструкция секции (рис. 4) имеет существенные недостатки. Роликовая секция имеет в качестве замкнутой опоры 2, воспринимающей боковую нагрузку, шарнир 4 звена, который одновременно служит опорой для расположенного ниже сегмента 3. Вследствие переменных упругих и тепловых деформаций опорного звена и самого сегмента возможно искажение положения роликовой секции относительно технологической оси. Плавающая верхняя опора 1 не имеет угловой развязки, что вносит в систему дополнительные напряжения. Конструкция роликовой секции не имеет явно выраженных привалочных баз для координации технологической оси и баз для станочной обработки, отсутствует возможность корректировки положения роликовой секции относительно технологической оси. Встройка подшипников в бочки роликов снижает их стойкость из-за перегрева. Бесступенчатая регулировка положения роликов эксцентриковыми осями ненадежна и вызывает искажение настройки роликов. Расстояние между роликами недостаточно, что вызывает выпучивание корочки и растягивающие напряжения на фронте кристаллизации. Кроме того, как роликовая секция, так и кольцевые коллекторы вторичного охлаждения неудобны в обслуживании. Выявленные недостатки конструкции вызывают избыточную нагрузку и деформацию как формирующейся заготовки, так и самой секции, что обуславливает появление «ликвационных полосок» и других дефектов бляма, а также снижает стойкость оборудования.

На основании проведенного анализа было принято решение о поузловой модификации МНЛЗ. Разрабатывается также новый механизм качания, отличающийся стабильностью траектории и законов качания, повышенной надежностью работы. В настоящее время на заводе изготовлена и смонтирована опора (разливочная дуга) повышенной жесткости. Так как значительная доля дефектов бляма вызвана недостатками конструкции роликовой секции, на первом этапе разработан и изготовлен головной образец роликовой секции. Секция (рис. 5) имеет фиксированную верхнюю опору 1, которая базируется на металлоконструкции МНЛЗ и воспринимает основную продольную и весовую нагрузку, и нижнюю плавающую опору 2, воспринимающую нагрузку  $R$  от опрокидывающего момента на секцию. Изменена конструкция верхней опоры, которая уменьшает внутренние напряжения в секции. Стационарная верхняя опора сделана регулируемой для корректировки выставки секции. Разработана рама усиленной конструкции.

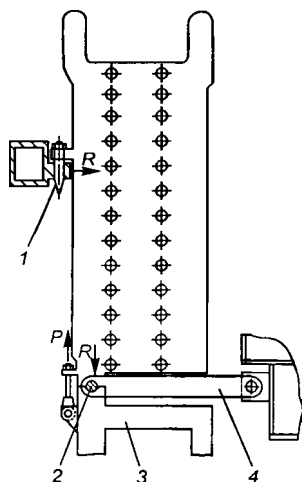


Рис. 4. Схема существующей роликовой секции ( $P$  — усилие затяжки опоры 2;  $R$  — реакция в опоре 4 от опрокидывающего момента на секцию)

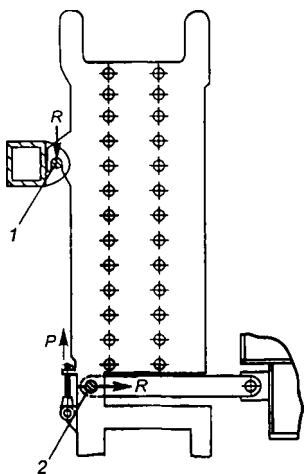


Рис. 5. Схема секции разработанной конструкции

Изменены расположение и конструкция роликов. Подшипники узлов имеют смазку на основе масляно-воздушной смеси типа Oil-Air Lubrication Systems фирмы TTC Engineering GmbH (Германия). Роликовая секция имеет базу для координации относительно технологической оси и станочные базы. Для облегчения разборки при заливках секция сделана разборной по сторонам. Верхняя трехрядная обойма выполнена как часть роликовой секции, имеет унифицированную конструкцию. Регулировка роликов осуществляется прокладками под подушками, что упрощает конструкцию и увеличивает стойкость подшипников. Кроме роликовой секции спроектированы и изготовлены контрольно-измерительные устройства для настройки секции. В настоящее время

опытная секция подготовлена к установке на МНЛЗ-3 для промышленного испытания.

Планируется изменить конструкцию кристаллизатора с заменой расположенных в стальной плите охлаждающих каналов на каналы, фрезерованные в медной стенке. Прорабатывается также вопрос о применении технологии мягкого обжатия бляма с не полностью затвердевшей сердцевиной, что позволит получать высокоуглеродистые стали с улучшенной макроструктурой.

Для уменьшения ликвации углерода на МНЛЗ-3 БМЗ разработан усовершенствованный температурно-скоростной режим непрерывной разливки, режим вторичного охлаждения блямов, применяется также электромагнитное перемешивание металла в кристаллизаторе. Использование этих методов дало положительные результаты, но возрастающие требования к качеству металлопродукции, необходимость увеличения рабочей скорости вытягивания заготовки обуславливают дальнейшее совершенствование процесса непрерывной разливки стали.

Проблемой при производстве высокоуглеродистой стали является повышенная ликвация углерода в осевой зоне бляма и дендритная ликвация. На МНЛЗ-3 при непрерывной разливке высокоуглеродистой стали опробовано электромагнитное перемешивание в зоне окончательного затвердевания металла. Кардинального улучшения макроструктуры с помощью этого метода получить не удалось по нескольким причинам:

- 1) низкий КПД индуктора, обусловленный большими потерями энергии в толстой затвердевшей корочке бляма;
- 2) сложность позиционирования индуктора в конце зоны затвердевания при изменении скорости разливки;

3) трудность организации охлаждения как поверхности блюма в районе индуктора, так и самого индуктора.

Возникла потребность в применении других методов воздействия на кристаллизующуюся заготовку. В 90-х годах прошлого века получила распространение технология обжатия слитка с незатвердевшей сердцевинной (так называемое «мягкое обжатие») как для слябовых, так и для блюмовых МНЛЗ. Применение этой технологии позволило уменьшить осевую рыхлость, осевую ликвацию непрерывнолитой заготовки, улучшить ее кристаллическую структуру. В рамках концепции «поузловой модернизации» МНЛЗ принято решение применить технологию и оборудование для «мягкого обжатия» блюмов сечением 300×400 и 250×300 мм для всего марочно-сортамента стали.

При создании головного образца требовалось выбрать оптимальную конструкцию системы «мягкого обжатия» блюма, для чего необходимо было выбрать схему обжатия, протяженность и расположение зоны «мягкого обжатия», количество и диаметр обжимных валков, энергосиловые параметры процесса деформации блюма с не полностью затвердевшей сердцевиной. Анализ физических явлений, происходящих при формировании непрерывнолитой заготовки совместно с деформацией твердой оболочки и твердой жидкой области, отличается большой сложностью. Неоптимальные параметры «мягкого обжатия» могут привести к недостаточной эффективности процесса, появлению дефекта макроструктуры заготовки типа «обратная ликвация» («белая полоса»), внутренних трещин блюма и поломке оборудования. Поэтому для проведения технологических расчетов и оценки работоспособности оборудования использовались разработанные математические модели.

Проверка адекватности моделей проведена при освоении технологии «мягкого обжатия» слябовой заготовки на вертикальной МНЛЗ электроплавильного цеха ОАО «Северсталь», где модели показали удовлетворительную сходимость результатов.

Для условий МНЛЗ-3 проведена корректировка моделей, обусловленная криволинейностью технологической МНЛЗ, добавлением напряжений от разгиба заготовки, иной формой заготовки (другим соотношением периметра и площади сечения слитка), иным распределением температур и иной формой жидкотвердой зоны, а также содержанием углерода в металле в более широком диапазоне). Проведены расчеты кристаллизации блюма по модели квазиравновесной кристаллизации расплава с учетом граничных условий теплообмена, создаваемых форсунками перспективной системы вторичного охлаждения. Установлены распределение температуры по сечению и длине блюма, протяженность жидкой фазы и соотношение жидкой и твердой фаз в жидкой лунке. По результатам анализа литературных данных и опытным результатам принято, что оптимальная зона «мягкого обжатия» начинается там, где количество твердой фазы в жидкотвердой зоне не превышает 30%, а заканчивается в районе содержания 70% твердой фазы. Расчетное распределение температур блюма используется для определения усадки заготовки и расчета напряжений и деформаций при обжатии.

Разработан алгоритм расчета обжатия слитка в роликах тянущей клетки МНЛЗ. Используются специальное уравнение состояния материала слитка, позволяющее учитывать возможность деформирования материала с изменением объема, вариационный принцип минимума полной мощности диссипации и конечноэлементная аппроксимация поля скоростей перемещений. На основе разработанных программ выбрана оптимальная схема «мягкого обжатия» и разработан проект головного образца устройства для редуцирования блюма с не полностью затвердевшей сердцевиной. Применение разработанного устройства позволит значительно улучшить структуру осевой зоны блюма при одновременном увеличении рабочей скорости разливки, а также освоить новые марки сталей, к которым предъявляются повышенные требования (стали для металлокорда повышенных категорий, стали для автомобилестроения, инструментальные стали).

Таким образом, выбранная стратегия поузловой модернизации МНЛЗ-3 БМЗ позволяет при умеренных финансовых затратах постепенно ликвидировать «узкие» места в технологии разливки, не останавливая производство и не снижая производительность.

*УДК 669.18:538.911*

**В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ**, д-р техн. наук (ИТМО НАН Беларуси),  
**Ю.А. САМОЙЛОВИЧ**, д-р техн. наук (НПП «Платан»,  
г. Екатеринбург, Россия),  
**И.А. ТРУСОВА**, канд. техн. наук,  
**Н.Л. МАНДЕЛЬ**, канд. техн. наук,  
**Д.Н. АНДРИАНОВ**, канд. техн. наук (БНТУ)

## **РАСЧЕТЫ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ)**

При решении задач теплопроводности для конкретных прикладных проблем в настоящее время получили развитие два основных направления. В первом из них для описания температурного поля исследуемых объектов используют дифференциальные уравнения в частных производных для некоторой произвольной бесконечно малой области. В последующем уравнения заменяются конечно-разностными соотношениями, для решения которых разработаны весьма эффективные вычислительные методы [1, 2]. Второе направление основано на постулировании вариационного экстремального принципа, справедливого для всей изучаемой области объекта. В данном случае решение минимизирует определенный функционал, представляющий собой интеграл от неизвестных значений температуры на различных участках объекта. При этом изучаемая непрерывная функция заменяется набором дискретных значений, поле которых