



On the basis of mathematical modeling there are analyzed the different variants of placement of equipment and technology of blooms soft squeezing at casting of them at MNLZ-3 RUP "Belarussian metallurgical works". There is developed the project of the main sample of the soft squeezing system of the continuously cast slugs with cut 250x300, 300x400 mm.

*В. А. МАТОЧКИН, А. Б. СТЕБЛОВ, РУП «БМЗ»,
Ю. М. АЙЗИН, А. В. КУКЛЕВ, А. М. ТОПТЫГИН, В. В. ТИНЯКОВ,
ООО «Корад», ФГУП ЦНИИчермет*

УДК 621.746.047

РАЗРАБОТКА ГОЛОВНОГО ОБРАЗЦА СИСТЕМЫ ОБЖАТИЯ ЗАГОТОВКИ НА БЛЮМОВОЙ МНЛЗ БЕЛОРУССКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА

Улучшение служебных свойств конструкционных сталей требует их большей изотропности. Для этого необходимо подавить ликвацию в зоне окончательного затвердевания слитка, увеличить протяженность зоны равноосных кристаллов и уменьшить размеры дендритов. Эти вопросы успешно решаются на РУП «Белорусский металлургический завод», специализирующемся на выпуске предназначенной для металлокорда стали с повышенным содержанием углерода и равномерным его распределением в сечении проволоки.

В настоящее время в мире наблюдается тенденция увеличения содержания углерода в кордовой стали. Для подавления ликвации углерода на РУП «БМЗ» разработаны оптимальный температурно-скоростной режим непрерывной разливки с использованием электромагнитного перемешивания металла в кристаллизаторе, а также режим вторичного охлаждения блюмов. Применение таких технологических решений дало положительные результаты. Однако возрастающие требования к металлопродукции, а также необходимость увеличения рабочей скорости вытягивания заготовки вызывают необходимость дальнейшего совершенствования технологии разливки.

Электромагнитное перемешивание в зоне окончательного затвердевания не позволило кардинально улучшить макроструктуру высокоуглеродистой стали из-за низкого КПД индуктора, что связано с большими потерями энергии в толстой затвердевшей корке блюма. Кроме того, весьма затрудняются позиционирование индуктора в конце зоны затвердевания при изменении скорости разливки, а также организация 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 сердцевиной (так называемое

мягкое обжатие) на слябовых и блюмовых МНЛЗ [1 – 3]. Применение этой технологии позволило уменьшить осевую рыхлость и ликвацию в заготовке, улучшить ее кристаллическую структуру.

В рамках концепции «поузловой модернизации» МНЛЗ-3 на РУП «БМЗ» принято решение применить технологию и оборудование для мягкого обжатия блюмов сечением 300x400 и 250x300 мм для всего марочного сортамента стали. При создании головного образца потребовалось выбрать оптимальную конструкцию системы мягкого обжатия блюма, для чего необходимо было определить схему обжатия, протяженность и расположение зоны с незатвердевшей сердцевиной, число и диаметр обжимных валков, энергосиловые параметры деформации. Физические явления, происходящие при формировании заготовки совместно с деформацией твердой оболочки и твердо-жидкой области, весьма сложные. Неоптимальные параметры мягкого обжатия могут привести к недостаточной эффективности процесса, образованию дефекта макроструктуры типа «обратная ликвация» («белая полоса»), появлению внутренних трещин блюма и даже к поломке оборудования.

Для проведения технологических расчетов и оценки работоспособности оборудования использовали разработанные математические модели. Адекватность моделей была проверена при освоении технологии мягкого обжатия слябовой заготовки на вертикальной МНЛЗ электросталеплавильного цеха ОАО «Северсталь», там получена удовлетворительная сходимость результатов. Для условий РУП «БМЗ» проведена корректировка моделей МНЛЗ с учетом напряжений от разгиба заготовки и другой ее формы (другим соотношением периметра и площади сечения слитка, иным распределением температур и формы жидко-твердой зоны, а также более широким диапазоном содержания углерода в металле).

Проведены расчеты кристаллизации блюма по модели квазиравновесной кристаллизации расплава с учетом граничных условий теплообмена, создаваемых форсунками новой, усовершенствованной системы вторичного охлаждения. Рассчитаны распределение температуры по сечению и длине блюма, а также соотношение жидкой и твердой фазы и их протяженность. На основании результатов анализа литературных и опытных данных приняли, что оптимальная зона мягкого обжата начинается там, где доля твердой фазы в жидко-твердой 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 деформации при обжате.

Разработан алгоритм расчета обжата слитка в роликах тянущей клетки МНЛЗ. Использовано специальное уравнение состояния материала слитка, позволяющее учесть возможность деформирования материала с изменением объема, вариационный принцип минимума полной мощности диссипации и конечно-элементную аппроксимацию поля скоростей перемещений. При заданных величине обжата, скорости разливки и температурном поле слитка в тянущей клетке рассчитываются требуемые для обжата слитка мощность и усилие прижатия ролика. Для прогноза возможного образования трещин разработана математическая модель разрушения кристаллизующихся металлических сплавов с использованием концепции непрерывного накопления рассеянных повреждений с учетом возможности их залечивания. Отличительная особенность кристаллизующихся материалов заключается в наличии переходного от жидкого состояния к твердому двухфазному слою. Твердо-жидкая область этого слоя, характеризующаяся сформированным кристаллическим каркасом с жидкими прослойками, способна воспринимать нагрузку и испытывать деформацию. Однако деформационная способность слоя мала и в процессе кристаллизации возможно возникновение хрупких межкристаллитных разрушений. Кристаллизационные трещины, как правило, возникают в так называемом эффективном интервале кристаллизации. Верхняя граница интервала — температура переплетения и срастания дендритов в кристаллический каркас, а нижняя — температура реального солидуса. В результате хрупкие межкристаллитные разрушения могут появляться в слитке после момента его полного затвердевания, рассчитанного по квазиравновесной модели кристаллизации сплава.

Зарождение внутренних трещин описывается выражением макроскопического параметра состояния, что отвечает аналитическому описанию экспериментальных данных о длительной прочности. Кинетические уравнения, связывающие данный параметр состояния — функцию накопления

повреждений в точке тела ω с основными переменными процесса деформирования (с напряжениями, деформациями ползучести, временем), могут быть сформулированы в различном виде в зависимости от степени точности и подробности описания экспериментальных данных.

Поскольку экспериментальные данные ограничены, наиболее оправдано использование простейших теорий накопления повреждений. Процесс разрушения интерпретируется как процесс образования и развития микротрещин, который развертывается на фоне растущих деформаций ползучести и характеризуется параметром ω . Так как на образование трещин основное влияние оказывает хрупкое разрушение металла, примем, что процесс развития микротрещин в среднем не влияет на скорость деформации ползучести. В пользу этого предположения можно привести некоторые соображения. Прежде всего нужно отметить различный в общем случае механизм рассматриваемых процессов («хрупкие» разрушения развиваются по границам зерен, «вязкое» течение — в зернах). С другой стороны, если имеется влияние микротрещин на ползучесть, то кривые ползучести, по которым определяются коэффициенты в уравнениях состояния, отражают суммарный эффект, так как они получены на образцах, вырезанных из реальной непрерывнолитой заготовки.

Результаты расчетов по разработанным математическим моделям использовали для оценки вариантов оборудования и технологии мягкого обжата. Рассматривали несколько вариантов технических решений, в том числе:

1) обжатие двумя роликными обоймами не приводных роликов с малым шагом между ними и последующая калибровка с помощью дополнительной клетки; обжимные ролики при этом не имели индивидуального управления прижимом;

2) обжатие парами независимо обжимающих горизонтальных роликов с большим шагом между ними;

3) обжатие независимо обжимающими роликами с расположением их по технологической оси, исключая искажение профиля заготовки; длина зоны обжата по этому варианту максимальна; шаг между роликами имеет величину, промежуточную между шагом в первом и втором вариантах.

Анализ первого варианта показал, что зона мягкого обжата совпадает с зоной разгиба блюма. Это вызывает неравномерность напряжений по длине и сечению заготовки, а при неблагоприятных условиях — и появление внутренних трещин. Обжатие блюма всей обоймой роликов из-за разности распределения температуры и количества жидкой фазы по длине заготовки вызовет возрастание сопротивления деформации по мере затвердевания, что приведет к перегруженности за-

мыкающих гидроцилиндров секции по сравнению с передними (для расчетных обжатий в 1,5 – 2,0 раза). При одинаковых нагрузках на гидроцилиндры обжатие в первой паре роликов секции будет больше, чем в остальных парах (правда, если первая пара роликов находится в оптимальном диапазоне мягкого обжатия, в этом нет ничего плохого). Однако такая ситуация приведет к неоднозначности и распределению усилий по гидроцилиндрам секции при достижении одного и того же суммарного обжатия. При этом возможны трудности при реализации алгоритма управления. Кроме того, оптимальная протяженность зоны мягкого обжатия при некоторой скорости вытягивания заготовки меньше, чем длина одной секции мягкого обжатия, что приводит к трудностям позиционирования слитка по отношению к секции, так как нельзя допустить, чтобы на последней паре роликов находился практически уже затвердевший слиток. Такая ситуация из-за перегрузки замыкающих гидроцилиндров может просто сделать секцию неработоспособной и не реализующей технологию мягкого обжатия. Настройка скорости разливки с некоторым запасом (в сторону увеличения) приведет к тому, что фактически работать в оптимальном режиме мягкого обжатия будет только последняя пара роликов. Все это становится следствием того, что все пять пар роликов работают в одной обойме.

Калибровку слитка предполагается проводить в дополнительной тянущей клетки при довольно значительных обжатиях, что приближает всю конструкцию МНЛЗ к объединенному разливочно-прокатному агрегату со всеми проблемами, связанными с реализацией такой схемы. Остаточную кривизну из-за одностороннего кинематического нагружения в дополнительной тянущей клетки устранить практически нечем (за дополнительной тянущей клетью расположена только одна тянущая клеть). Система с роликами, имеющими независимый гидropriжим, лишена этих недостатков и обладает большей свободой в реализации различных алгоритмов мягкого обжатия.

Анализ двух других вариантов показывает, что шаг роликов для второго варианта несколько завышен: например, для малоуглеродистых сталей возможна ситуация, когда ни один из роликов не

попадает в оптимальный диапазон мягкого обжатия, что требует достаточно точной настройки скоростного режима разливки. Поэтому наличие вертикальных роликов делает третий вариант исполнения оборудования предпочтительным (фактически шаг роликов в этом случае составляет 0,525 м). Очевидно, что этому варианту присущ определенный запас по увеличению скорости разливки. Это особенно важно при возникновении проблем с мягким обжатием на участке зоны разгиба заготовки — зону мягкого обжатия можно перенести за пределы разгиба, на прямолинейный слиток. Третий вариант исполнения предпочтителен как для высоко-, так и малоуглеродистой стали. Кроме того, он позволяет увеличить скорость вытягивания заготовки до 0,9 м/мин. При использовании первого и второго вариантов из-за более короткой зоны мягкого обжатия затвердевание бляха может заканчиваться без приложения дополнительного давления, т.е. усилия прижатия роликов роликовой проводки будут только компенсировать свободную усадку при кристаллизации.

На основе проведенных расчетов и выбранной схемы совместно с машиностроительным концерном «ОРМЕТО-ЮУМЗ» разработан проект головного образца устройства мягкого обжатия бляховой заготовки сечением 300x400 и 250x300 мм, которую планируется установить при проведении на РУП «БМЗ» очередного этапа поузловой модернизации МНЛЗ-3. Применение этого устройства позволит значительно улучшить структуру осевой зоны бляха при одновременном увеличении рабочей скорости разливки, а также освоить разливку новых сталей с повышенными требованиями: для металлокорда повышенных категорий, а также для автомобилестроения.

Литература

1. Накацумо С., Такахаси Х., Китагава Ю. и др. Производство высококачественной стали с разливкой на УНРС № 2 на заводе «Дайдо Стал» // Дэнки Сэйко, 1995. Т. 66. № 1. С. 36–46.
2. Мисуми Х., Касама Т., Сэки Т. и др. Ликвация в слитке, подвергнутом обжатию в не полностью затвердевшем состоянии // Дзайре то пуросэку. 1994. Т. 7. № 4. С. 1212.
3. Ламухин А.М., Зиборов А.В., Имгрунт В.Я. и др. Результаты испытания системы мягкого обжатия непрерывнолитого сляба с жидкой сердцевиной // Сталь. 2002. № 3. С. 57–59.