



The perspective ways of development of the steel continuous cast in conditions of RUP "BMZ" are shown.

Н. В. АНДРИАНОВ, Н. А. ГОДИНСКИЙ, РУП «БМЗ»

УДК 669

ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗЛИВКИ СТАЛИ ДЛЯ МЕТАЛЛОКОРДА В УСЛОВИЯХ РУП «БМЗ»

Осевая ликвация – осевая неоднородность, обогащение или обеднение осевой зоны примесями [1].

Основной причиной ликвации является меньшая растворимость примесей в твердой фазе, чем в жидкости. Поэтому тип и характер соответствующей диаграммы состояния будут определять склонность элементов к ликвации. Так, элементы, обладающие ограниченной растворимостью в твердом металле (сера, фосфор, углерод), при кристаллизации будут ликвировать сильнее, чем элементы с неограниченной растворимостью (никель, хром). Значения коэффициентов ликвации (1-К) в δ -железе у углерода, серы и фосфора равны соответственно 0,87, 0,98, 0,87, в γ -железе – 0,64, 0,98, 0,94 [2]. Коэффициент (1-К) характеризует тенденцию элемента к ликвации: чем выше коэффициент, тем выше способность элемента к ликвированию. Для сравнения коэффициент ликвации для хрома в δ - и γ -железе равен соответственно 0,05 и 0,15.

При непрерывной разливке стали получают два вида осевой неоднородности: V-образную и «шнуровую». Ликвация обоих видов может сопровождаться отрицательной ликвацией [1].

Осевая неоднородность обусловлена двумя явлениями: ликвационным обогащением центральных зон примесями и усадкой осевой зоны при затвердевании. Под действием усадочных перемещений металл осевой зоны, находящейся в двухфазном «кашеобразном» состоянии, опускается вниз, в результате чего возникает так называемая V-образная ликвация. Принципиальной особенностью формирования осевой зоны непрерывного слитка является значительная протяженность лунки жидкого металла. Фронт кристаллизации слитка по высоте сходится под очень малым углом. При кристаллизации непрерывного слитка небольших сечений образуется протяженная зона столбчатых дендритов. В процессе затвердевания по мере роста столбчатых дендритов жидкая фаза, обогащенная ликвирующими примесями, оттесняется к центру.

Из-за различной скорости роста столбчатых дендритов периодически образуются перехваты, так называемые «мосты». Ниже «моста» кристаллизация идет при недостаточном питании жидким металлом в обособленной зоне. В этой зоне могут возникать крупные усадочные поры. Поступающий в эту зону жидкий металл, обогащенный ликватами, имеющими пониженную температуру плавления, образует грубую V-образную или «шнуровую» ликвацию. Непосредственно под «мостом» лунка жидкого металла некоторое время остается расширенной: кристаллизация идет в условиях улучшенного питания осевой зоны, образуя незначительную V-образную и «шнуровую» ликвацию. В слитках относительно крупного сечения зона твердожидкого состояния в центре получает существенное развитие: образуется структура с ограниченной зоной столбчатых кристаллов в осевой зоне. Вероятность образования «мостов» в этом случае уменьшается. Усадочная пористость оказывается рассредоточенной в виде отдельных небольших пор, сопровождающихся незначительной V-образной ликвацией.

Таким образом, в зависимости от величины и скорости усадки металла в осевой зоне, а это в свою очередь определяется маркой стали, скоростью разливки, интенсивностью вторичного охлаждения, профилем и размерами сечения слитка и рядом других факторов, усадочные пустоты приобретают различные формы и размеры. В образующиеся пустоты проникает обогащенный ликватами металл, имеющий более низкую температуру плавления. При этом образуется соответствующего вида ликвация:

- V-образная различной интенсивности;
- «шнуровая», часто представляющая собой чередующиеся участки положительной и отрицательной ликвации.

Более грубая «шнуровая» ликвация образуется вследствие заполнения осевой трещины металлом, обогащенным ликватами [1].

При росте столбчатых кристаллов перед фронтом затвердевания образуются отдельные изолированные кристаллы железа с пониженным содержанием примесей [2].

Плотность кристаллов на 4-5% больше плотности жидкой стали: поэтому они опускаются в жидком расплаве и образуют в нижней части слитка конус осаждения мелких различно ориентированных кристаллов. Этим можно также объяснить чередование в центральной части слитка положительной и отрицательной ликвации.

Обычно осевая ликвация возрастает при повышении скорости разливки, уменьшении интенсивности вторичного охлаждения и увеличении содержания в стали легко ликвирующих компонентов [3].

Экспериментально установлено, что длина жидкой лунки пропорциональна скорости вытягивания заготовки:

$$L = t v,$$

где L – глубина жидкой фазы (лунки), мм; t – время полной кристаллизации заготовки данного сечения, мин; v – скорость вытягивания слитка, мм/мин.

Из номограмм, построенных на основании многочисленных экспериментов [2], следует, что при сечении заготовки 250x300 мм и скоростях 0,5, 0,6, 0,7, 0,8 м/мин длина жидкой фазы равна соответственно 8, 10, 12 и 14 м, т.е. при возрастании скорости от 0,5 до 0,8 м/мин угол схождения жидкой лунки уменьшается почти в 2 раза. Тем самым создаются более благоприятные условия для развития подусадочной ликвации.

Химический состав стали также влияет на развитие ликвационных процессов. Степень ликвации сильно ликвирующих элементов (C, S, P) увеличивается с возрастанием концентрации этого элемента в стали.

Опыты показывают, что ликвация выражена сильнее при сильном перегреве стали, что объясняется более медленной и неравномерной кристаллизацией стали [4].

Под действием электромагнитного вращающегося поля происходит то же самое, что и при встряхивании заготовки, оксидные включения коагулируют, верхушки растущих дендритов отламываются, образуя многочисленные новые центры зарождения кристаллизации, в результате измельчается зерно, уменьшается осевая ликвация, так как обогащенная примесями жидкая сталь кристаллизуется рассосредоточенно [3].

Полностью избежать ликвации невозможно. Она может быть снижена путем ограничения содержания ликвирующих элементов и соблюдения оптимальных условий разливки [5].

Освоение технологии разливки стали на МНЛЗ-3 с использованием катушек ЭМП в кристаллизаторе и зумпфовой зоне

Проводимое поэтапное исследование стали 80К, направленное на снижение величины подусадочной ликвации и анализ данных показали, что наибольший выход годного металла 79,5% с оценкой величины ликвации до 3-го балла получен без применения ЭМП в зумпфовой зоне и температурой перегрева металла над температурой ликвидус 18–21°C.

Продольный разрез катанки диаметром 5,5 мм с применением ЭМП при разливке свидетельствует о наличии слоистой химической неоднородности по углероду. Белый контур обратной ликвации занимает различную площадь, находится либо в самом центре катанки, либо идущей к периферии. При волочении катанки диаметром 5,5 мм до требуемого диаметра металлокорда дефекты в центральной части вызывают конусный тип разрыва кордовой проволоки, а также приводит к дефекту усталости металла, что в свою очередь снижает технологичность при производстве корда.

Экспериментом с варьированием скоростей разливки и определением глубины жидкой лунки доказано, что влияние катушек ЭМП при оптимальной скорости $0,7 \pm 0,1$ и ниже проявляется лишь в размывании кристаллических зон слитка и увеличении дисперсности структуры, не оказывая практического влияния на осевую зону заготовки, что свидетельствует о недостаточности жидкой фазы в зоне действия финальной катушки. С повышением скорости разливки и доли жидкой фазы протяженность жидкой лунки увеличивается, проявляется четкое влияние ЭМП в виде светлого контура, однако степень осевой химической неоднородности резко возрастает.

Таким образом, наличие светлого контура обратной ликвации при дальнейшей переработке кордовой катанки приводит к появлению анизотропии свойств металла в виде чередующихся участков различных механических свойств по сечению катанки. Такое положение неизменно приводит к расслоению катанки и ее разрыву в процессе волочения.

Плавки, разлитые в автоматическом режиме поддержания скорости разливки от температуры металла в промежуточном ковше и без ЭМП в зумпфовой зоне, показали на наличие снижения подусадочной ликвации в катанке на 9,6%.

Положение с подусадочной ликвацией после исключения из технологии катушек ЭМП в зумпфовой зоне и введение автоматического поддержания скорости разливки от температуры металла в промежуточном ковше

Автоматический режим поддержания скорости разливки от температуры металла в промковше

производили с помощью АСУ по разработанному алгоритму зависимости:

$$V = \frac{V_2 - V_1}{T_2 - T_1} (T - T_1) + V_1, \text{ м/мин,}$$

где V – текущая скорость разливки, м/мин; V_1 и V_2 – соответственно скорость разливки при максимальной (T_2) и минимальной (T_1) температуре металла в проковше, м/мин; T – текущая температура металла в проковше, °С.

При превышении температуры металла в проковше больше максимально допустимой, указанной в ТК 840-С-05-2001, скорость раз-

ливки не снижалась менее 0,5 м/мин, а при падении температуры ниже минимальной скорость разливки не превышала максимально допустимую.

Среднее значение подусадочной ликвации в катанке диаметром 5,5 мм снизилось по бунтам на 9,6%, по максимальному баллу – на 8% и составило соответственно 1,9 и 2,5 балла.

Основной недостаток: падение температуры в промежуточном ковше ведет к увеличению скорости разливки, что напрямую связано с увеличением степени образования V -образной и строчечной ликвации.

Таблица 1. Количество плавков с подусадочной ликвацией выше 3-го балла на стали 70К

Диаметр 5,5 мм	2002 г.	2003 г.	5мес. 2004 г.
Стан 150- прокат ПЛ > 3 б	1229 85 / 6,9%	1245 30 / 2,4%	504 20 / 4,0%
СтПЦ-1 – прокат ПЛ > 3 б	568 33 / 5,8%	56 24 / 4,3%	266 7 / 2,6%
СтПЦ-2 – прокат ПЛ > 3 б	704 61 / 8,7%	663 22 / 3,3%	314 13 / 4,1%

Из табл. 1 видно, что полностью исключить или свести к минимуму сегрегацию углерода и серы существующая технология не позволила.

Поэтому было предложено внести следующие изменения в НД:

1) разливку стали 70-75К производить с температурой в промежуточном ковше не более 25°С над ликвидусом;

2) скорость разливки ограничить до значений 0,6+0,05 м/мин;

3) перепад температуры в промежуточном ковше между первым и последним замером должен быть не более 7°С.

После внедрения мероприятий получены результаты, приведенные в табл. 2.

Как видно из таблицы, такие мероприятия стабилизировали технологию и уменьшили долю неаттестованных плавков, но не исключили проблему в целом.

Таблица 2. Температурно-скоростной режим разливки стали 70К

Значение параметра	Сталь 70				Сталь 75			
	всего	%	ПЛ>3б	%	всего	%	ПЛ>3б	%
Перегрев более 30°С	127	47,9	8	3,0	20	43,5	4	8,7
Перегрев менее 25°С	30	11,3	2	0,8	7	15,2	1	2,2
Скорость более 0,6 м/мин	96	36,2	7	2,6	18	39,1	4	8,7
Скорость не более 0,55 м/мин	60	22,6	4	1,5	9	19,6	2	4,4

Перспективные пути развития непрерывной разливки стали в условиях РУП «БМЗ»

Одним из основных назначений при строительстве в 1986 г. МНЛЗ-3 явилась разливка стали для металлокорда и рукавов высокого давления (РМЛ). На основе многолетнего собственного опыта и практики зарубежных производителей наиболее важным аспектом качества кордовой стали является низкая степень сегрегации элементов, в первую очередь углерода и серы.

Существенное улучшение качества макроструктуры непрерывнолитой стали можно достичь при разливке с минимальным перегревом стали над температурой ликвидус, что требует снижения тепловых потерь за счет крышки на сталеразливочном ковше; специального защитного шлака; подогрева ковша на участке «печь-ковш» с созданием теплового ядра в верхней части ковша.

Мировая практика показала, что при установке системы плазменного подогрева в промежуточном ковше среднюю температуру перегрева снизили на 10°С. Кроме того, сделан вывод о значительно более высокой экономической эффективности подогрева расплава только последних 15–20 т с пониженной температурой, что позволяет успешно разливать холодные плавки. В процессе серийной разливки плавков уровень расплава в промежуточном ковше поддерживается в пределах 800–900 мм, а температура $\Delta t = t_1 - t_2$ не более 7–8°С. Струя металла между ковшом герметизируется огнеупорной трубой с подачей в стыковочный узел аргона. При плазменном подогреве в ковше необходимо использовать аргон, чтобы исключить прирост азота в металле.

Для снижения развития осевой ликвации и рыхлости на ряду с минимальным перегревом

важное значение имеет электромагнитное перемешивание (ЭМП) затвердевающего слитка в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения (ЗВО). Показателем интенсивности ЭМП в мировой практике принято считать достигаемое значение линейной скорости жидкого металла в потоке, которую должен развивать статор ЭМП ($V_{\max} = 0,3+1,0$ м/с). При $V_{\max} < 0,3$ м/с эффективность перемешивания уменьшается, при $V_{\max} > 1,0$ м/с возникает отрицательная ликвация. Интенсивное движение потока металла вдоль области затвердевания быстрее (в 1,8 раза) снижает перегрев. Более полного воздействия на осевую рыхлость и центральную пористость сортовых заготовок можно достичь, если устройство ЭМП расположено также в зоне вторичного охлаждения и скользящий индуктор в конце затвердевания слитка.

Согласно сообщению, вертикальная МНЛЗ фирмы «Daido Steel», оборудованная ЭМП в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения, подогревом металла в промежуточном ковше способна отливать сталь для металлокорда диаметром 350 мм. Для этого МНЛЗ оборудовали устройством мягкого обжатия, состоящим из двух пар приводных роликов диаметром 400 мм.

В последние годы фирма «Concast AG» провела успешную серию промышленных опытов по механическому мягкому обжатию (ММО) сортовых заготовок размером 150x160 мм. Было показано, что эффективность обжатия твердой части заготовок возрастает при использовании поперечного сечения с двумя выпуклыми поверхностями заготовок на их верхней и нижней стороне. Преимущество такого профиля сечения состоит в том, что оно хорошо подходит для высокоскоростных гильзовых кристаллизаторов «Конвекс».

В этом случае требуются также незначительные изменения процесса по сравнению с традиционно квадратной заготовкой (кристаллизатор, направляющие ролики, а ЗВО остается без изменения). Эта схема была успешно опробована, рекомендованная выпуклость заготовок — 8 мм (по 4 мм на сторону). Исследования по использованию «мягкого» механического обжатия проводятся на многих предприятиях. Фирмой «Корад» (г. Москва) мягкое обжатие удачно опробовано на слябовой МНЛЗ ОАО «Северсталь». Планируется разработка и внедрение в 2005 г. базового образца на РУП «БМЗ».

В последние годы производство стали для металлокорда из непрерывнолитых сортовых заготовок (180x180 мм) расширяется (Япония, Гер-

мания, Китай и т. д.). Сортные заготовки, как правило, отливают на многоручьевых МНЛЗ со скоростью до 3 м/мин. Высокие скорости достигаются за счет применения гильзовых кристаллизаторов специальной конструкции. Рабочий профиль гильз по высоте выполнен в виде системы убывания обратных конусов («Конвекс») или в виде кривой, близкой к параболе в продольном направлении и специального профиля в поперечном сечении.

Более плотный теплоконтакт с оболочкой слитка по всей длине кристаллизатора требует увеличения интенсивности и равномерности охлаждения стенок кристаллизатора. В таких кристаллизаторах зазор между гильзой и корпусом не превышает 3–4 мм, скорость потока воды в зазоре до 15 м/с, а удельный расход на охлаждение кристаллизатора квадратного сечения не менее 35–40 л/мин на 1 см периметра.

Заключение

С целью максимального уменьшения подусадочной ликвации в литых заготовках и катанке диаметром 5,5 мм при разливке кордовых марок стали на МНЛЗ-3 в условиях РУП «БМЗ» проведены следующие мероприятия: стабилизирован температурно-скоростной режим разливки, при этом оптимальная скорость составила $0,6 \pm 0,05$ м/мин, температура перегрева металла над ликвидусом не более 25°C, перепад температур между первым и последним замером не более 7°C.

Перспективными направлениями являются:

- установка плазменного подогрева металла в промежуточном ковше;
- секции ЗВО, позволяющие установить плоскую катушку ЭМП в зоне вторичного охлаждения;
- система изменения положения катушки ЭМП в зоне затвердевания в зависимости от скорости разливки;
- установка кристаллизаторов с гильзами переменного сечения системы «Конвекс».

Литература

1. Дефекты стали / М.И. Виноград, С.М. Новокшекова, М.: Металлургия, 1984.
2. Скребцов А.М. Конвенция и кристаллизация металлургического расплава в слитках и отливках. М.: Металлургия, 1993.
3. Металлургия стали / В.И. Явойский, Г.Н. Ойкс, М.: Металлургия, 1973.
4. Китаев Е.М. Затвердевание стальных слитков. М.: Металлургия, 1982.
5. Бернштейн М.Л. Атлас дефектов стали. М.: Металлургия, 1979.