



The factors influencing on carbon elimination of cord steel of RUP "BMZ" are investigated.

А. В. ОЛЕНЧЕНКО, М. Е. КОНТАНИСТОВ, РУП «БМЗ»

УДК 669.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЛИКВАЦИЮ УГЛЕРОДА КОРДОВОЙ СТАЛИ

При производстве кордовой стали на РУП «БМЗ» одним из основных факторов, влияющих на качество готовой продукции, является величина осевой неоднородности слитка (ликвация).

Осевая ликвация возникает в слитке в зоне окончательного затвердевания, в то время как сердцевина слитка находится в двухфазном (жидкотвердом) состоянии. Поскольку при разной температуре примеси имеют различную растворимость в железе, то междендритные пространства постепенно насыщаются элементами, которые склонны к ликвации (углерод, сера, хром и др.). При содержании жидкой фазы в двухфазной зоне в пределах 30–70% появляются перемычки, препятствующие попаданию маточного расплава в зону окончательного затвердевания, что приводит к появлению пустот в сердцевине слитка и образованию осевой пористости. При этом в образующиеся пустоты проникает расплав из междендритных пространств, который обогащен ликвирующими элементами, что приводит к образованию осевой ликвации.

Чем шире температурный интервал кристаллизации сплава, тем большее развитие получает ликвация, зависящая от концентрации ликвирующих элементов в металле.

Значения коэффициентов ликвации ($1-K$) углерода, серы и фосфора в δ -железе равны соответственно $-0,87$; $0,98$; $0,87$, в γ -железе — $0,64$; $0,98$; $0,94$ [1]. Коэффициент ликвации характеризует тенденцию элемента к ликвации: чем выше коэффициент, тем выше способность элемента к ликвированию.

Отмечаются два вида осевой неоднородности при непрерывной разливке стали: *V*-образная и «шнуровая». В процессе избирательной кристаллизации ликвация сопровождается отрицательной ликвацией [2].

При росте столбчатых кристаллов перед фронтом затвердевания образуются отдельные изолированные кристаллы железа с пониженным содержанием примесей [3]. 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 положительных и отрицательных ликваций.

Особенностью формирования осевой зоны слитка является значительная протяженность лунки жидкого металла. Фронт кристаллизации слитка по высоте сходится под очень малым углом. При кристаллизации под действием усадочных перемещений металл осевой зоны, находящейся в двухфазном «кашеобразном» состоянии, опускается вниз, в результате чего в осевой зоне возникает так называемая *V*-образная ликвация.

Рассматривая процесс кристаллизации непрерывного слитка небольших сечений (сортовая заготовка) и заготовки больших размеров (блюд), наблюдается существенное отличие в формировании осевой неоднородности. Так, при кристаллизации заготовок небольших размеров по сечению образуется протяженная зона столбчатых дендритов, в результате избирательной кристаллизации маточный раствор, обогащенный примесями, оттесняется в осевую зону. Из-за различной скорости роста столбчатых кристаллов в некоторых местах центральной области слитка образуются участки, отсеченные от верхних питающих жидких слоев затвердевшим металлом. Они представляют собой своеобразную полость по отношению к окружающим участкам, которые периодически повторяются, образуя перехваты, так называемые «мосты». В эту полость стремятся ликваты, имеющие пониженную температуру плавления и находящиеся в жидком состоянии, образуя иногда грубую *V*-образную или «шнуровую» ликвацию. Непосредственно под «мостом», если лунка жидкого металла некоторое время остается расширенной, происходит большее поступление маточного раствора в зону, в результате чего образуются незначительные *V*-образная и «шнуровая» ликвации. 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.

Внешними параметрами, влияющими на характер затвердевания и макроструктуру непрерывных заготовок, являются перегрев металла над температурой ликвидус, скорость разливки, интенсивность вторичного охлаждения, воздействие электромагнитного поля на кристаллизующийся слиток.

Величина скорости усадки металла в осевой зоне определяется маркой стали, профилем и размерами сечения слитка, а также воздействием внешних факторов, при этом усадочные пустоты приобретают различные формы и размеры.

Наиболее важными внешними параметрами, влияющими на характер затвердевания и макроструктуру непрерывнолитых заготовок, являются температура и скорость разлива металла. Общее снижение температуры в объеме расплава, а также в локальных макро- и микрообъемах до температуры ликвидус способствует интенсификации процесса кристаллизации расплава вследствие уменьшения кристаллических размеров зародышей и увеличения линейной скорости их роста. Опыты показывают, что ликвация выражена сильнее при сильном перегреве стали, что объясняется более медленной и неравномерной кристаллизацией стали [1]. Так, с повышением температуры металла в ковше на 40 °С значение ликвации углерода увеличивается в 2 раза, а при увеличении 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.

Внешний параметр воздействия, как характер интенсивности вторичного охлаждения слитка, оказывает влияние на формирование кристаллической структуры и чем больше интенсивность вторичного охлаждения, тем меньше осевая ликвация. Интенсификация вторичного охлаждения приводит к понижению температуры поверхности заготовки, ускорению роста столбчатых кристаллов; при этом уменьшаются глубина лунки жидкого металла и раздутие заготовки под влиянием ферростатического давления. Особенно заметно положительное влияние интенсификации охлаждения при отливке слябов. При отливке блюмовых заготовок полезно в некоторой мере снизить интенсивное охлаждение, так как при этом увеличивается зона равноосных кристаллов и в заготовках из сталей с ограниченным интервалом кристаллизации происходит заметное рассредоточение осевой пористости и осевой ликвации.

Рациональная организация вторичного охлаждения определяется рядом факторов, в том числе формой и размерами заготовки. Очень важным параметром, влияющим на качество заготовки, является чистота стали от газов нежелательных примесей, прежде всего серы и примесей цветных металлов.

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

Применение электромагнитного перемешивания (ЭМП) приводит к изменению внутренней структуры заготовки, т.е. измельчению структуры, снижению степени ликвации в средней и центральной частях, уменьшению центральной пористости. Электромагнитное перемешивание металла приводит к улучшению поверхности заготовки, в частности к снижению числа поверхностных дефектов, количества неметаллических включений в поверхностном слое, повышению толщины наружной плотности корочки.

Механизм воздействия ЭМП на металл основан на снижении перегрева, обламывании ветвей дендритов и создании циркуляции металла в жидкой сердцевине, а также создании потоков на поверхности металла в кристаллизаторе.

В настоящее время в основном применяют два вида перемешивания: круговое (вращательное) и осевое. Круговое перемешивание применяют в кристаллизаторах, так как оно тормозит струи поступающего металла в кристаллизатор, что предотвращает захлаживание мениска металла, снижает глубину проникновения поступающего горячего металла в жидкую лунку, удаляет включения от поверхности заготовки, улучшает теплоотвод и снижает вероятность прорыва корочки.

Осевое перемешивание применяется в зоне вторичного охлаждения. Оно способствует улучшению макроструктуры слитка как по ликвации, так и по осевой пористости [2].

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 рассредоточенно.

Полностью избежать ликвации невозможно. Она может быть снижена путем ограничения содержания ликвирующих элементов и соблюдения оптимальных условий разливки [4].

На РУП «БМЗ» разливка стали кордового сортамента осуществляется на МНЛЗ сечением 250x300 мм с содержанием углерода более 0,70% и содержанием серы, фосфора не более 0,015%.

Учитывая большой температурный интервал кристаллизации металла с данным содержанием углерода, величина ликвации углерода в процессе затвердевания заготовки велика.

В условиях РУП «БМЗ» производится контроль величины ликвации углерода при входном контроле в катаной проволоке диаметром 5,5 мм, минуя два передела, и оценивается по заводским техническим условиям согласно приведенной шкале (рис. 1), значение которой не должно превышать 3 балла. Превышение данной неоднородности приводит к большим потерям металла при производстве кордовых нитей (расслоение при волочении и обрывность).

В процессе освоения технологии производства стали кордового сортамента на РУП «БМЗ» было проведено ряд исследовательских работ по изучению влияния технологических факторов на закономерность развития ликвации углерода в слитке.

Проведенные исследования макроструктуры продольного сечения литой заготовки (вдоль оси слитка) кордовой стали (рис. 2) позволили произвести описание закономерностей кристаллизации слитка.

Предварительные результаты оценки макроструктуры блюмовой заготовки позволили установить причину нестабильного значения величины ликвации углерода в процессе кристаллизации слитка, а также указать путь частичного решения данной проблемы применением «мягкого» обжата заготовки.

Учитывая, что по данным расчета, подтвержденного фактическими результатами, глубина жидкой лунки заканчивается перед первым трайб-аппаратом тянущей клетки, было решено увеличить скорость разливки и давление на прижимном ролике этого трайб-аппарата.

При проведении испытаний скорость разливки при температуре перегрева металла над темпе-

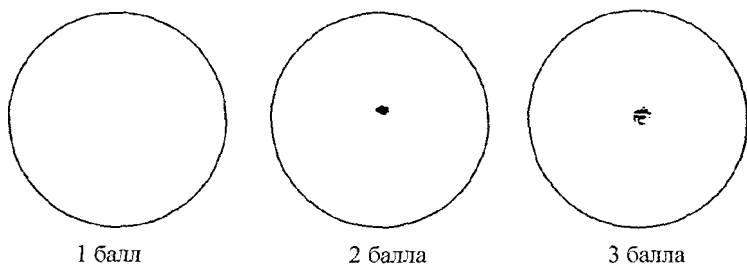


Рис. 1. Шкала оценки подусадочной ликвации в катанке диаметром 5,5 мм (сталь 70К)

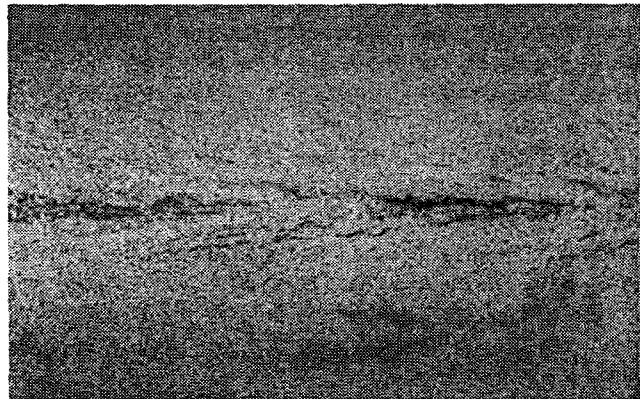


Рис. 2. Макроструктура продольного сечения литой заготовки из стали 70К

ратурой ликвидус 25–30 °С установили 0,85–0,90 м/мин, а давление в гидросистеме прижимного ролика увеличили от 30–40 до 80 бар. Такая величина давления обусловлена тем, что не требовалось никаких внесенных изменений в гидросистему МНЛЗ.

В результате исследования структурных зон макротемплетов опытных плавов (рис. 3, 4, табл. 1) установлено, что наружная мелкозернистая корка увеличилась от 11 до 14 мм. Ширина столбчатых кристаллов на опытном темплете составила 50 мм, на сравнительном – 55 мм. При повышении давления до 80 бар в гидросистеме прижимного ролика и скорости от 0,85 до 0,90 м/мин расстояние между большими гранями макротемп-

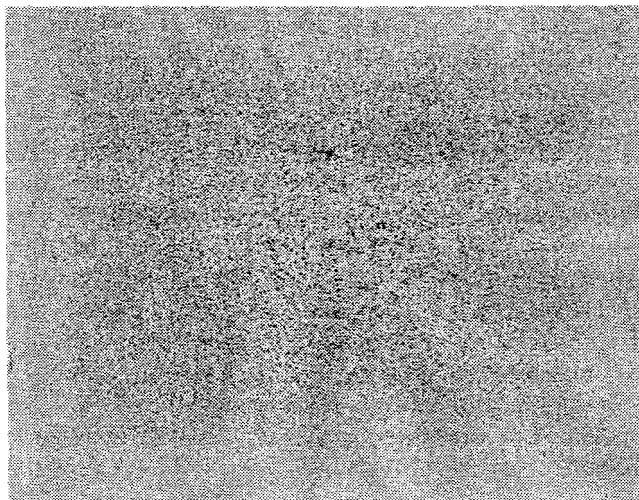


Рис. 3. Макроструктура литой заготовки плавки №35529 2-1

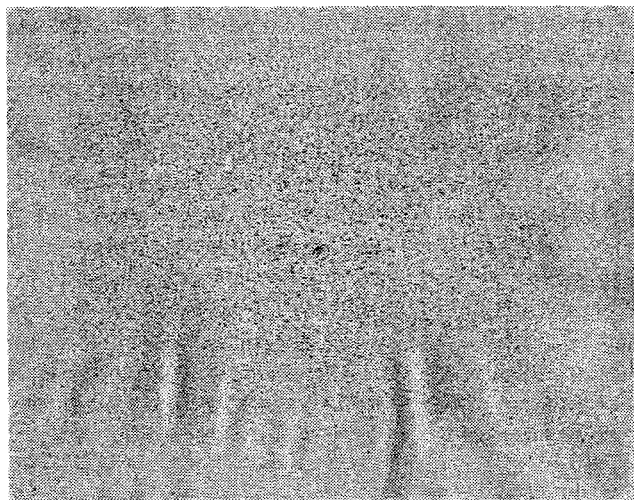


Рис. 4. Макроструктура литой заготовки плавки №35529 2-2

Таблица 1. Результаты оценки макроструктуры непрерывнолитых заготовок

Номер плавки	ОСТ 14-1-235-91, балл							ГОСТ 10243 ПП, балл	Ромбичность, мм
	ЦП	ОЛ	ЛПТоб	ЛПТос	ЛПТугл	СП	КТЗ		
35529 2-1	2,0	3,0	2,0	0,5	0	0	0,5	0,5	384x380
35529 2-2	2,0	1,5	1,5	0	0	0	0	0,5	381x379

Таблица 2. Размеры кристаллизационных зон

Номер плавки	Наружная мелкозернистая корка, мм (среднее)	Ширина зоны столбчатых кристаллов, мм			
		до большой грани		до малой грани	
		35529 2-1	11	50	55
35529 2-2	14	50	45	60	60

лета составило 243 мм, на сравнительном – 246 мм, раздутье малых граней составило соответственно 2,5 и 3,0 мм.

Осевая зона макротемплета хорошо выявлена в серных отпечатках, имеет плотноупакованное строение на опытной заготовке, дефект «осевая ликвация» сконцентрирован в центре и оценивается 1,5 баллом, на сравнительной заготовке этот дефект рассредоточен и имеет 3 балла.

После проката опытных и сравнительных блюмов в заготовку сечением 125x125 мм проводили оценку значения ликвации углерода (коэффициент K) в катаной заготовке по методике фирмы «Даниели» с отбором проб стружки согласно схеме, приведенной на рис. 5.

$$K = \frac{C(1),\%}{C(2)_{cp},\%}$$

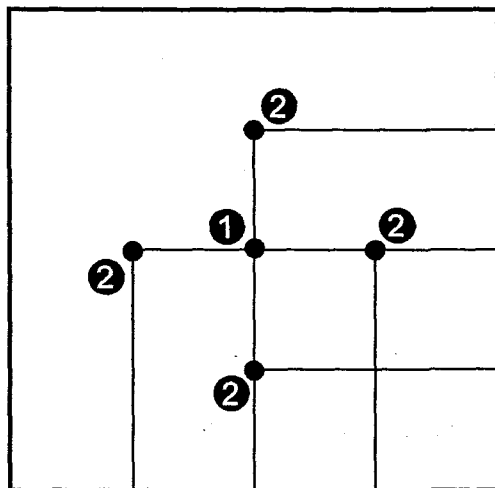


Рис. 5. Схема отбора проб с катаной заготовки сечением 125x125 мм

В результате установлено, что коэффициент сегрегации углерода на опытных заготовках при скорости разливки 0,85–0,90 м/мин и давления на прижимной ролик 80 бар составил 1,02, а на сравнительных – 1,07.

Исследование качества макроструктуры катанки диаметром 5,5 мм показало, что средний балл подусадочной ликвации на опытных плавках составил 2,4, на сравнительных – 2,6 балла.

Таким образом, было подтверждено, что при содержании жидкой фазы в двухфазной зоне в пределах 30–50% появляются перемычки, которые препятствуют попаданию маточного расплава в зону окончательного затвердевания, что приводит к появлению пустот в сердцевине слитка и образованию осевой пористости.

С применением мягкого обжатия жидкая ликвированная сердцевина вытесняется из зоны окончательной кристаллизации, что приводит к уменьшению осевой ликвации, компенсируется усадка металла при кристаллизации, а также разрушаются перемычки, которые не позволяют жидкому металлу проникнуть в зону окончательного затвердевания, что снижает осевую пористость.

Опробование статического обжатия заготовки показало возможность снижения ликвации углерода при условии выполнения определенных требований технологического процесса и очень проблематично при использовании одной тянущей клетки. Малая продолжительность разливки экспериментальной плавки объясняется невозможностью обеспечения серийности разливки, а также работы оборудования МНЛЗ на предельно допустимых проектных значениях.

Реализация мягкого обжатия возможна во время отливки слитка путем приложения обжатия от 3 до 6 обжимающих клеток, которые расположены последовательно по длине непрерывнолитого слитка в зоне его окончательной кристаллизации.

Для обеспечения получения гарантированного значения ликвации углерода в слитке на РУП «БМЗ» подписан контракт на реконструкцию в 2008 г. существующей МНЛЗ, включающей в себя систему динамического мягкого обжатия.

Проведенный анализ зависимости значения подусадочной ликвации в катанке диаметром 5,5 мм от температуры перегрева металла в

промежуточном ковше над температурой ликвидус и скоростью разливки позволил установить закономерность температурно-скоростного режима разливки стали 70К и получить значение подсушечной ликвации в катанке диаметром 5,5 мм не более 3 баллов. Использование термопары непрерывного замера температуры металла в промежуточном ковше позволило перевести разливку стали в автоматический режим поддержания скорости от температуры без ущерба производства и качества металлокорда, при этом скоростной ре-

жим разливки стали 70К сечением 250x300 мм установлен в диапазоне 0,50–0,80 м/мин.

Литература

1. Китаев Е.М. Затвердевание стальных слитков. М.: Металлургия, 1982.
2. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали. М.: Металлургия, 2003.
3. Явойский В.И., Ойкс Г.Н. Металлургия стали. М.: Металлургия, 1973.
4. Бернштейн М.Л. Атлас дефектов стали. М.: Металлургия, 1979.