



УДК 669.18.046.518

Смирнов А.Н. /д.т.н./, Ухин В.Е.
ДонНТУ

Цупрун А.Ю.
НПО «Доникс»

Жибоедов Е.Ю.
ОАО «ЕМЗ»

Принципы систематизации критериев комплексной оценки качества непрерывнолитой сортовой заготовки

Рассмотрены особенности разлива и формирования структуры непрерывнолитой сортовой заготовки и предложен комплексный подход к оценке ее качества и идентификации дефектов. Ил. 3. Табл. 2. Библиогр.: 11 назв.

критерии, качество, непрерывнолитая сортовая заготовка

На рынке длинномерной металлопродукции в Украине и странах СНГ в настоящее время имеется достаточно широкий выбор сортовой заготовки, полученной различными технологическими методами: заготовка, прокатанная из слитка; заготовка, прокатанная из слитка методом разделения; непрерывнолитая заготовка, полученная при разливе со скоростями 2-2,5 м/мин, непрерывнолитая заготовка, полученная при разливе с повышенными скоростями до 6 м/мин и пр. В связи с возрастающей конкуренцией к качеству сортовой заготовки предъявляются все более жесткие требования, которые стараются учесть сталеплавильщики, т.к. их продукция подвергается последовательному переделу, как правило, крупными партиями, без проведения комплексного входного контроля и только выборочными испытаниями конечной продукции.

Мировое производство сортовой непрерывнолитой заготовки в настоящее время оценивается на уровне 300-320 млн. т в год. В последнее десятилетие обозначилась тенденция использования многоручьевых сортовых МНЛЗ с высокой (до 6 м/мин) скоростью разлива, что позволяет получать сортовую заготовку в сталеплавильных цехах с плавильными агрегатами высокой единичной производительности. Однако, разлива стали на сортовую заготовку с большими скоростями существенным образом изменяет условия ее затвердевания как в кристаллизаторе, так и в зоне вторичного охлаждения, что обуславливает необходимость разработки системы строгой оценки ее качества заготовки и идентификации возникающих дефектов.

Разливка стали с повышенными скоростями обычно обуславливается технологическими ограничениями длительности разлива одного ковша (55-80 мин) при фиксированном числе ручьев МНЛЗ. Для определения рациональных скоростей разлива на заготовки мелких сечений целесообразно рассматривать условия формирования корочки заготовки в кристаллизаторе, на которое оказывает влияние способ подвода металла в жидкую ванну по двум схемам: открытой струей через стакан-дозатор и закрытой струей под уровень с помощью погружной трубы (стальковш-промковш) и стакана (промковш-

кристаллизатор) [1, 2].

Открытой струей обычно разливают стали, которые прокатываются в уголок, двутавр и проволоку и пр. без строгого контроля макроструктуры. Сечение таких заготовок обычно не превышает 140-150 мм по стороне квадрата.

Преимуществами второй схемы являются [3] высокая степень защиты стали от вторичного окисления; возможности регулирования расхода стали за счет изменения положения стопора-моноблока; существенного увеличения диаметра стакана-дозатора и увеличение времени зарастания его внутренней полости до предельно допустимой величины; вдувание аргона непосредственно в струю стали, которая движется в кристаллизаторе; применение шлакообразующих смесей, обеспечивающих повышение качества поверхности заготовки; подвод струи стали под уровень металла в кристаллизаторе, что предотвращает его бурление на границе раздела фаз.

В результате исследований установлено, что при разливе с высокими скоростями величина перегрева металла в промковше оказывает значительно большее влияние на весь технологический процесс разлива, чем при разливе с обычными скоростями

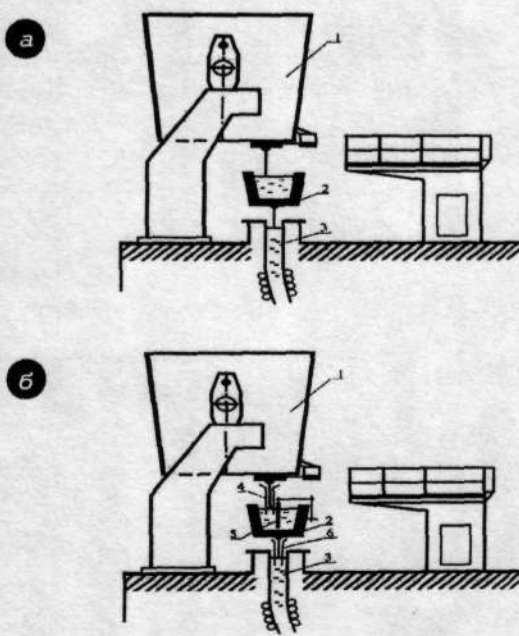


Рис. 1. Схема разлива стали на сортовые заготовки открытой струей а) и с защитой стали от вторичного окисления б): 1 – сталеразливочный ковш; 2 – промежуточный ковш; 3 – кристаллизатор; 4 – защитная труба; 5 – стопор; 6 – погружной стакан

© Смирнов А.Н., Ухин В.Е., Цупрун А.Ю., Жибоедов Е.Ю., 2008 г.

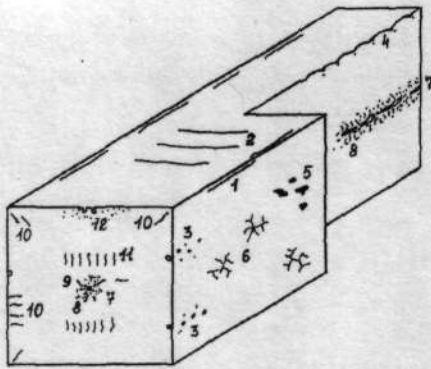


Рис. 2. Схематическое представление основных видов дефектов, встречающихся в непрерывнолитой сортовой заготовке: 1 – продольные угловые трещины; 2 – поперечные трещины; 3 – поры; 4 – следы качания кристаллизатора; 5 – загрязнения на поверхности заготовки; 6 – паукообразные трещины; 7 – осевая пористость; 8 – осевая химическая неоднородность; 9 – осевые трещины; 10 – трещины угловые и перпендикулярные граням; 11 – деформационные трещины; 12 – точечная неоднородность

ми, что связано с уменьшением толщины формирующейся корочки заготовки на выходе из кристаллизатора.

Характерной особенностью скоростной разливки является увеличение диаметра стакана-дозатора в среднем на 25-35 % по сравнению с разливкой с обычными скоростями. Это обуславливает высокий момент количества движения расплава на входе в кристаллизатор и соответственно более интенсивное движение в нем жидкости. Кроме того, установлено, что даже при незначительном (порядка 7-10 мм) отклонении струи от оси симметрии происходит существенное нарушение симметрии движения потоков в кристаллизаторе. При наложении колебаний кристаллизатора это приводит к частым «срывам» стабильной картины движения циркуляционных потоков в жидкой ванне. В процессе таких динамических «срывов» интенсивность перемешивания расплава в отдельных зонах кристаллизатора (прилегающих к стенке заготовки) возрастает в 5-10 раз, что, видимо, служит одной из основных причин неравномерного (или замедленного) роста твердой корочки по отдельным граням и прорывов металла под кристаллизатором.

Известно, что качание кристаллизатора способствует снижению силы трения между формиру-

щейся заготовкой и кристаллизатором во время вытягивания заготовки и уменьшению растягивающих напряжений в ее поверхностном слое, вызывающих образование трещин. При изменении направления движения кристаллизатора в твердой оболочке возникают напряжения сжатия, что обеспечивает эффект устаревания разрывов. Анализ формирования твердой корочки металла в кристаллизаторе позволяет принять, что глубина следов качания поверхности заготовки во многом определяется временем фазы сжатия, в течение которого кристаллизатор движется в направлении разливки. Известно, что неглубокие вмятины на заготовке возникают, когда кристаллизатор колеблется с высокой частотой и относительно коротким ходом, чтобы сократить промежутки времени на образование трещин. На практике его значение рекомендуется принимать 0,12-0,15 с [5-8] при величине амплитуды качания кристаллизатора в пределах 3-10 мм, а частота качания в зависимости от скорости разливки определяется из условия поддержания постоянного значения времени отрицательной реакции срыва.

Общая характеристика основных видов дефектов геометрической формы и поверхности непрерывнолитой сортовой заготовки (рис. 2) обобщена в табл. 1.

Процессы тепло- и массопереноса на границе жидкость-твердая фазы носят многокомпонентный характер и могут быть оценены на нескольких размерных уровнях:

- микроуровень: размеры неметаллических включений и зародышей твердой фазы в расплаве составляют порядка $10^0 - 10^1$ мкм;
- мидиуровень: размеры дендритных ветвей составляют обычно порядка 10^3 мкм и могут достигать даже нескольких сантиметров;
- макроуровень: размеры жидкой фазы непрерывнолитой заготовки и фронта затвердевания, а также протяженность зоны осевой ликвации составляют, по меньшей мере, 10^1 м.

Такие структурные особенности как состояние поверхности непрерывнолитой заготовки (наличие различного рода трещин, ужимин, выпуклостей и т.п.), структурная неоднородность, дефекты усадочного характера (усадочная пористость), макро- и микроликвация не могут быть оценены с учетом процессов, характеризующихся этими уровнями с учетом скорости массопереноса в различных зонах заготовки, меняющаяся от скоростей диффузионных процессов до перемещения жидкой фазы со скоростью в несколько метров в секунду.

Основные виды кристаллических структур, образующихся при затвердевании в масштабе, соответствующем размерам дендритов, представлены на рис. 2. Наиболее часто в слитках и непрерывнолитых заготовках встречается структура равноосных дендритов (рис. 3 а), оси которых разнонаправлены относительно поверхности заготовки. Характер развития зоны равноосных дендритов во мно-

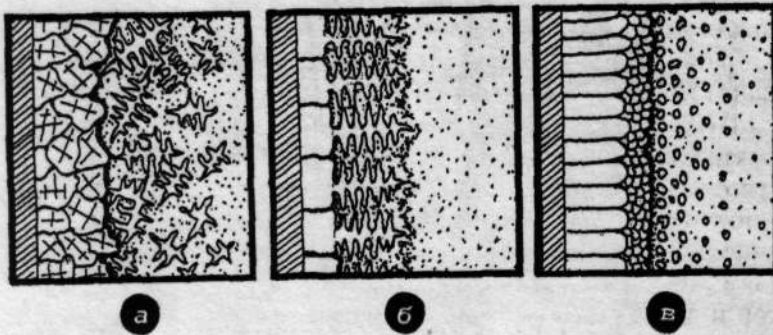


Рис. 3. Основные виды кристаллических структур, образующихся при затвердевании непрерывнолитых заготовок: а - структура равноосных дендритов; б - структура столбчатых дендритов; в - равноосная «недендритная» структура

Таблица 1. Общая характеристика дефектов формы и поверхности непрерывнолитой сортовой заготовки

Наименование дефекта	Описание дефекта	Причины возникновения	Меры по предупреждению
1. Ромбичность	Профиль поперечного сечения имеет форму ромба	Напряжения в корке заготовки из-за неравномерного отвода тепла в кристаллизаторе, износ рабочих стенок и отклонения геометрических параметров кристаллизатора	Равномерный теплоотвод, контроль геометрии гильзы кристаллизатора, контроль работы форсунок в зоне вторичного охлаждения
2. Раздутие (выпуклость)	Бочкообразность поперечного сечения	Высокая скорость или температура разлива, недостаточное охлаждение гильзы кристаллизатора, неудовлетворительная настройка правильно-тянущей клетки	Соблюдение температурного и скоростного режима разлива, режимов охлаждения, контроль геометрических параметров кристаллизатора
3. Продольная угловая трещина	Трещина, проходящая вдоль оси заготовки	Износ донной части кристаллизатора, неравномерное охлаждение заготовки в кристаллизаторе, повышенная температура стали в промковше, высокое содержание вредных примесей (S, P, Sn, Pb, Sb)	Контроль геометрических параметрами кристаллизатора, поддержание оптимальной температуры разлива, ограничение содержания вредных примесей
4. Поперечные трещины	Трещина, проходящая по боковой поверхности граней поперек продольной оси заготовки	Неравномерное затвердевание заготовки, повышенное трение слитка в кристаллизаторе, действие циклических надрывов оболочки при качании кристаллизатора, зависание слитка в кристаллизаторе	Соблюдение температурного интервала разлива, контроль состояния кристаллизатора, соблюдение режимов вторичного охлаждения, соблюдение режимов смазки
5. Поры	Углубления или полые пространства на поверхности заготовки	Избыточная влажность или избыточное количество смазочного масла с завышенным кислотным числом, газовыделение из Смазочного материала у края кристаллизатора	Регламентированное использование смазочного материала, обеспечение требуемой раскисленности стали
6. Следы качания кристаллизатора	Надрывы оболочки заготовки в виде поперечных углублений	Неправильный выбор режимов качания кристаллизатора, смазки, температуры разлива, а также неправильная настройка поддерживающих роликов	Соблюдение оптимального режима возвратно-поступательного движения кристаллизатора, контроль состояния кристаллизатора
7. Загрязнения на поверхности заготовки	Скопление неметаллических включений в виде частично залитых металлом частиц шлака	Размыв огнеупоров ковша, затягивание шлака из промковша, продукты вторичного окисления	Соблюдение технологии внепечной обработки стали, применение огнеупоров высокого качества и качественной шлакообразующей смеси для промковша и кристаллизатора
8. Паукообразные трещины	Расходящиеся от центра тонкие трещины	Внутренние напряжения вследствие местного экстремального периодического переохлаждения или разогрева поверхности заготовки	Использование специальных шлакообразующих смесей в совокупности с равномерной подачей водовоздушной смеси в зоне вторичного охлаждения

гом зависит от химического состава металла, степени его перегрева над температурой ликвидус. Затвердевание в зоне равноосных дендритов идет по механизму гетерогенного зарождения центров кристаллизации или по механизму дендритной мультипликации (умножения числа зародышей за счет разрушения ветвей дендритов). Процесс дендритной мультипликации усиливается при наличии конвективных и вихревых течений, а также пульсирующих перепадов давления жидкости у фронта затвердевания. Обычно в макроструктуре непрерывнолитых заготовок различают две зоны равноосных дендритных кристаллов. Одна из них пролегает от поверхности на глубину нескольких миллиметров и имеет ярко выраженную мелкозернистую структуру, другая располагается в осевой зоне заготовки с размерами кристаллов в десятки раз больше, чем в первой зоне.

В том случае, если процесс гетерогенного заро-

дышеобразования не получает значительного развития, а дендритная мультипликация минимального развития термогравитационной конвекции при большом температурном градиенте, то в заготовках наблюдается преимущественно направленный рост столбчатых дендритов (рис. 3 б). Протяженность зоны столбчатых дендритов, располагающаяся между зонами равноосных дендритов и ее плотность заметно влияют на прочностные и пластические свойства заготовок. Размеры дендритов определяются динамикой процесса их формирования, то есть измельчаются с уменьшением интенсивности процесса. Для предотвращения чрезмерного развития зоны крупных столбчатых дендритов перегрев стали должен быть по возможности небольшим и тем меньше, чем выше скорость разлива.

Если жидкий металл интенсивно перемещивается на начальной стадии затвердевания (кристал-

Таблица 2. Общая характеристика дефектов макроструктуры непрерывнолитой сортовой заготовки

Наименование дефекта	Описание дефекта	Причины возникновения	Меры по предупреждению
1. Осевая пористость	Поры различного размера, локализованные вблизи теплового центра заготовки	Значительный перегрев стали в проковше и неравномерное охлаждение заготовки	Уменьшение перегрева стали в проковше, обеспечение большей температурной однородности стали по длине проковша
2. Осевая химическая неоднородность	На продольных темплетях наблюдается в виде отдельных точек, сплошного шнура или V-образных участков повышенной травимости	Температурная усадка стали, высокий уровень перегрева стали в проковше, повышенное содержание ликвирующих элементов (C, S, P)	Уменьшение перегрева стали в проковше, повышение температурной однородности стали по длине проковша, снижение содержания серы и фосфора в стали
3. Осевые трещины	Чаще всего имеют «паукообразный» вид	Термические напряжения, возникающие при неправильном выборе режимов вторичного охлаждения	Оптимизация режимов вторичного охлаждения, повышение однородности водовоздушной смеси
4. Трещины, перпендикулярные граням, угловые трещины	Нитевидные потемнения повышенной травимости по контуру заготовки	Термические напряжения, возникающие при неправильном выборе режимов вторичного охлаждения и искажении профили заготовки	Оптимизация режимов вторичного охлаждения, выбор рациональных смазок и шлакообразующих смесей
5. Деформационные трещины	В поперечном сечении имеют вид гнездообразного скопления трещин или полос повышенной травимости; продольном – слой трещин примерно одной длины	Деформация заготовки в 2-х фазном состоянии роликами зоны вторичного охлаждения и разгиба	Контроль установки роликов зоны вторичного охлаждения и разгиба
6. Точечная неоднородность	Точечные скопления ликватов вблизи поверхности преимущественно по стороне меньшего радиуса	Нарушение режимов раскисления стали, неправильно выбранный расход или состав шлакообразующей смеси, разрушение огнеупоров	Оптимизация условий раскисления стали, защита от вторичного окисления, продувка стали аргоном, использование качественных огнеупоров и смесей
7. Внеосевая химическая неоднородность	Полоса более светлая, чем основной фон серного отпечатка или полоса пониженной травимости	Использование интенсивного электромагнитного перемешивания металла, нестабильная технология литья	Оптимизация режимов электромагнитного перемешивания и выбор места его приложения

лизатор сортовой МНЛЗ, электромагнитное перемешивание), то дендритная мультипликация существенно уменьшает дендритную протяженность структуры. В ряде случаев интенсивное перемешивание жидкой фазы вообще останавливает направленный рост дендритов [9], а затвердевание идет из сфероидально растущих центров. В этой зоне перед фронтом затвердевания в жидкости содержится большое количество мелких частиц твердой фазы. Условно можно назвать эту зону «недендритной» равноосной структурой. Экстремальное развитие процесса затвердевания по этой схеме представлен на рис. 3 в. Реологические свойства материала в этой зоне могут значительно отличаться от свойств в зоне с дендритной структурой, что позволяет достаточно точно идентифицировать эту зону на практике.

Существование чисто равноосной «недендритной» структуры в сортовых непрерывнолитых заготовках представляется маловероятным. Однако, в зонах, подвергнутых мощному принудительному перемешиванию непосредственно в процессе затвердевания, многими исследователями отмечается изменение реологических свойств материала при измельчении его кристаллической структуры (например, так называемые «белые» полосы при электромагнитном перемешивании).

Кроме рассмотренных типов кристаллических структур, в макроструктуре заготовки следует различать зоны с так называемыми «переходными» или «смешанными» структурами. Наиболее уязвимой с точки зрения значительного изменения уровня ме-

ханических свойств представляется область перехода от зоны столбчатых дендритных кристаллов к зоне равноосных дендритов. С теплофизической точки зрения она соответствует моменту времени, в который скорость отвода тепла через твердую корочку становится равной скорости тепла, выделяющегося перед фронтом затвердевания твердых кристаллов [10]. Протяженность этой зоны во многом зависит от условий затвердевания заготовки.

Условия формирования осевой зоны заготовки имеют следующие особенности:

- затвердевание происходит при малом температурном градиенте в переохлажденном расплаве, который обогащен ликватами, что обуславливает формирование ярко выраженной зоны осевой химической неоднородности;

- формирование твердой фазы происходит в условиях дефицита жидкой фазы вследствие затрудненного подвода жидкости из более высоких горизонтов, что приводит к формированию усадочной рыхлости и пористости, а в отдельных случаях и к появлению осевой усадочной полости на границе смыкания фронтов затвердевания.

Неметаллические включения могут располагаться обособленно или создавать группы и скопления (конгломераты). Они могут расти по дендритному, недендритному механизму или попадать в заготовку в сформированном виде. Их рост может идти до или в течение роста металлической корки, взаимодействуя с последней. Многие специалисты в области теории затвердевания металлов считают, что

определенная часть неметаллических включений способствует образованию зародышей твердой фазы металла. Крайне актуальной для непрерывной разливки сортовых заготовок является проблема образования различных видов включений глинозема Al_2O_3 в сталях, раскисленных алюминием: от мелкодисперсных включений Al_2O_3 до конгломератов в несколько десятков включений Al_2O_3 с другими включениями (например, сульфидами). Они создают значительные трудности при разливке стали через стакан-дозатор малого диаметра из-за осаждения включений на поверхности огнеупорного материала. Попадание конгломератов неметаллических включений в поверхностные слои сортовой заготовки может существенно ухудшить качество ее поверхности.

Расположение и протяженность описанных зон, а также степень их развития могут существенно влиять на конечную оценку качества непрерывнолитой заготовки и получаемой из нее металлопродукции [11].

Сортовая непрерывнолитая заготовка представляет собой предмет экспорта на мировой рынок, в тоже время опыт прокатки ее малых сечений недостаточен, что требует создание системы идентификации дефектов, возникающих в ней выяснение причин их появления. В основу предлагаемой системы положены как рассмотренные соображения, так и стандарты известных производителей непрерывнолитых заготовок в Европе, Японии и США.

В качестве базовой системы оценки качества макроструктуры принят метод, регламентированный ОСТ 14-1-235-91 «Сталь. Метод контроля макроструктуры непрерывнолитых заготовок для производства сортового проката и трубных заготовок», дополняемый контролем дефекта по продольным осевым темплетам дефекта «Деформационные трещины», «Осевая рыхлость» и «Осевая химическая неоднородность» (табл. 2).

Выполненный анализ условий разливки и формирования непрерывнолитой сортовой заготовки показывает, что в ее макроструктуре может быть выделено достаточно большое количество структурных и сопряженных переходных зон, протяженность и степень развития которых может существенным образом влиять на оценку качества заготовки и конечной продукции, что требует расширения базовой отечественной системы оценки качества макроструктуры непрерывнолитых заготовок, в том числе и по продольным осевым темплетам. Крупносериальные производители сортовой непрерывнолитой заготов-

ки должны в максимальной степени использовать дополнительные возможности автоматизации и текущего контроля процесса разливки, износа кристаллизаторов и направляющих клетей в ходе эксплуатации, а также использования стабильных приемов водовоздушного охлаждения заготовки и исключения влияния на качество факторов окружающей среды.

Вывод

Осуществлена комплексная оценка качества непрерывнолитой сортовой заготовки, предложено дополнить действующий стандарт контролем ряда дефектов осевой зоны.

Библиографический список

1. Теория и практика непрерывного литья заготовок / А.Н. Смирнов, А.Я. Глазков, В.Л. Пилюшенко и др. — Донецк: ДонГУУ, 2000. — 371 с.
2. Производство мелких непрерывнолитых заготовок / А.Я. Глазков, Б.Н. Моргалев, М.Г. Чигринов и др. — М.: Metallurgia, 1975. — 104 с.
3. Хорбах У., Коккентидт Й., Юнг В. Литье сортовых заготовок с высокой скоростью через кристаллизатор параболического профиля // МРТ. - 1998. - С. 42-51.
4. Исследование процесса непрерывной разливки на сортовые заготовки с защитой стали от вторичного окисления / А.Н. Смирнов, С.С. Бродский, А.Я. Глазков, В.В. Несвет // Процессы литья. - 2001. - № 2. - С. 10-17.
5. Development in Mould Oscillation / T.Yamashita, J.Radot, I.McNeil, M.Wolf // Proc. 4th Int. Conf. Cont. Casting. — Brussell: CRM/VDEh, 1988. — P. 329-340.
6. Horbach U., Kockentiedt J., Jung W. High speed billet casting with parabolical mould taper// Stahl und Eisen. - 1997. - No. 12. — P. 95-101.
7. Stilli A. Hot processing of billets// Concast Standard News. 1997. No 1 (36). — P. 3-4.
8. Bohnenberger J., Stilli A. High Speed casting with CONVEX Technology// Concast Standard News. Vol.35. May. 1996. — 11 p.
9. Tzavaras A.A. Solidification control by Electromagnetic Stirring-State of the art // Continuous Casting. Vol. 3. — Michigan: Book Crafters, 1984. — P.47-67.
10. Lipton J., Kurz W., Heinemann L. Modelling Columnar to Equiaxed Transition // J. Concast Technology News. V.22. — No 2. - 1983. — P. 4-6.
11. Смирнов А.Н. Свойства и структура заготовок из непрерывнолитого металла для производства проката ответственного назначения // Металл и литье Украины. - 2001. - № 3-4. — С. 17-20.

Поступила 09.11.07