



*It is shown that the important factor for receiving of high quality of continuously-casted ingot is construction and state of machine equipment of the slug continuous casting.*

Е. П. БАРАДЫНЦЕВА, Н. А. ГЛАЗУНОВА, И. А. КОВАЛЕВА, О. В. РОЖКОВА, РУП «БМЗ»

УДК 669.

## КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ МАКРОСТРУКТУРЫ ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ ШХ15СГ ПРОИЗВОДСТВА РУП «БМЗ»

В 2001 г. на РУП «БМЗ» впервые была опробована технология изготовления сортового проката подшипниковой стали из непрерывнолитых заготовок сечением 300x400 и 250x300 мм. Для завода это новый вид продукции. За пять лет работы с подшипниковой сталью был отработан и собран определенный объем материалов по дефектам макроструктуры, которые были получены при производстве сортового проката диаметром 80–150 мм подшипниковой стали, изучено влияние различных параметров на эти виды дефектов и приняты меры по их устранению.

Макроструктуру непрерывнолитых заготовок исследовали только в процессе освоения нового вида продукции.

Качество сортового проката подшипниковой стали диаметром 80–150 мм контролируется в лаборатории металловедения на соответствие требованиям ГОСТ 801. Макроструктура подшипниковой стали оценивается по поперечному сечению образцов, отобранных от горячекатаных заготовок, и по продольному закаленному излому.

Грубые дефекты (усадочная раковина, усадочная рыхлость, флокены, газовые пузыри, пятнистая ликвация, крупные неметаллические включения) в макроструктуре проката подшипниковой стали не допускаются, так как они вызывают появление трещин при пластической деформации, при термической обработке, а также разрушение деталей в процессе эксплуатации. За весь период работы с подшипниковой сталью такие грубые дефекты, как флокены, газовые пузыри, пятнистая ликвация, шлаковые включения в стали производства РУП «БМЗ» не отмечались.

С целью снятия внутренних напряжений и исключения образования межкристаллитных трещин прокат подвергается термообработке в коiled замедленного охлаждения.

Менее опасные макродефекты сортового проката, к которым относятся точечная неоднородность, центральная пористость и ликвационный

квадрат, являются следствием химической неоднородности непрерывнолитого слитка и нормируются шкалами ГОСТ 10243-75.

Рассматривая особенности кристаллического строения непрерывнолитой заготовки подшипниковой стали, отмечено, что в направлении продвижения фронта кристаллизации структура темплета неоднородна. После горячего травления в 50%-ном растворе соляной кислоты видно, что от корковой зоны мелких неориентированных трудноразличимых кристаллов вглубь непрерывнолитого слитка проходит зона столбчатых кристаллов, в центральной части темплета – усиленная зональная ликвация, обусловленная концентрацией ликвирующих элементов.

Процессы ликвации в непрерывнолитой заготовке легированной стали приводят к обогащению отдельных участков объема стали из-за вытеснения остаточного расплава фронтом кристаллизации одновременно несколькими ликвирующими элементами в одном направлении, что часто дает многократное усиление влияния этих элементов на структурные характеристики стали. Все это приводит к неравномерному распределению ликвирующих элементов в объеме стали, где особое место занимает осевая ликвация (рис. 1).

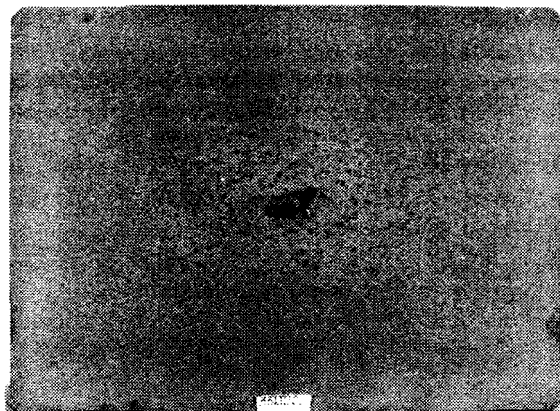


Рис. 1. Макроструктура непрерывнолитой заготовки сечением 300x400 мм из стали ШХ15СГ с ярко выраженной осевой ликвацией

**Осевая ликвация** представляет собой повышенную концентрацию ликвирующих примесей в сердцевине. Из-за различной скорости роста столбчатых кристаллов, обусловленной неравномерностью фронта кристаллизации, как по периметру, так и по высоте слитка, столбчатые дендриты периодически образуют перехваты «мосты». Ниже «моста» кристаллизация происходит при недостаточном питании жидким металлом, а нижний конусообразный участок лунки, отсеченный от верхних питающих слоев затвердевшим металлом, представляет собой обособленную зону кристаллизации. В этой зоне могут возникать крупные усадочные поры – вторичные усадочные раковины. Поступающий в данную зону жидкий металл, обогащенный ликватами с пониженной температурой плавления, образует грубую V-образную и шнуровую ликвации. Избежать ликвации полностью невозможно.

Важным фактором получения высокого качества непрерывнолитого слитка является конструкция и состояние оборудования машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), немаловажное влияние на осевую ликвацию оказывают соотношение скорости, температуры разливки и интенсивности охлаждения.

Тесно связана с осевой ликвацией центральной пористостью. Пористость обычно сопровождается ликвацией.

**Центральная пористость** представляет собой сосредоточение крупных и мелких пор вдоль теплового центра слитка в зоне встречи фронтов затвердевания и может быть двух типов – рассредоточенная и сосредоточенная.

Рассредоточенная центральная пористость непрерывнолитой заготовки представляет собой усадочные поры небольшого сечения, разбросанные по осевой зоне, получает развитие в зоне равноосных кристаллов, ограниченных зоной столбчатых дендритов. На рис. 2 показана макроструктура круглого проката из непрерывнолитой заготовки с дефектом «центральная пористость (рассредоточенная)».

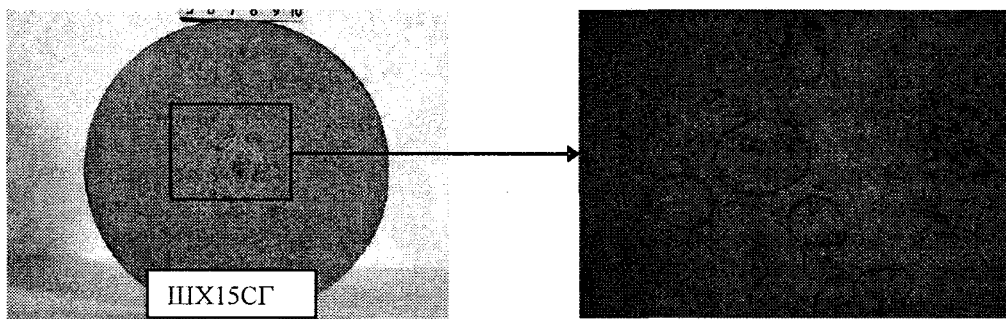


Рис. 2. Макроструктура проката из непрерывнолитой заготовки с дефектом «центральная пористость (рассредоточенная)»

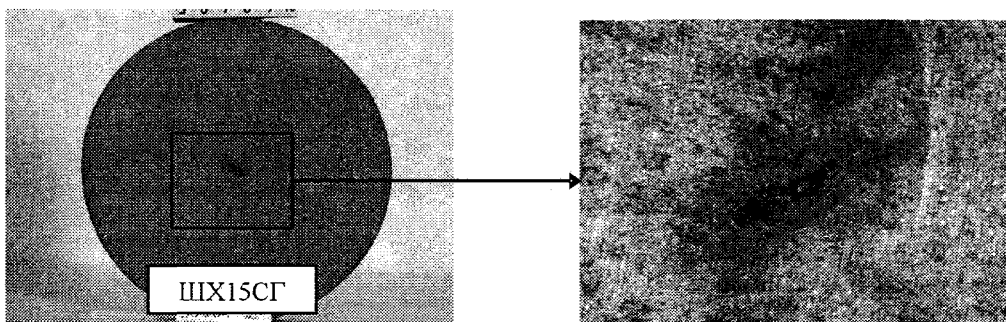


Рис. 3. Макроструктура проката из непрерывнолитой заготовки с дефектом «центральная пористость (сосредоточенная)»

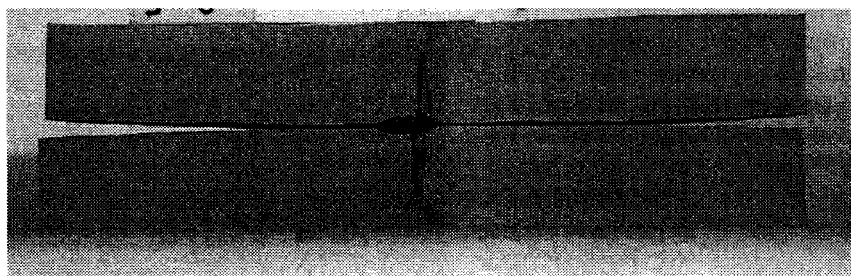


Рис. 4. Усадочная пора в продольном изломе проката подшипниковой стали ШХ15СГ

Сосредоточенная пористость – это крупные усадочные поры, сконцентрированные по теплому центру слитка, которые могут образовывать в осевой зоне несплошность. На рис. 3 показана макроструктура проката из непрерывнолитой заготовки с дефектом «центральная пористость (сосредоточенная)». На рис. 4 показан дефект «усадочная пора», выявленный в продольном изломе прокатанного металла.

Сосредоточенная пористость обычно обнаруживается при развитой столбчатой структуре и концентрируется вдоль вертикальной оси в виде прерывистых пустот. Высокое содержание углерода и хрома увеличивают вязкость стали, что затрудняет заполнение образующихся пор при ее затвердевании. Поэтому в подшипниковой стали центральная пористость развита значительно больше, чем в сталях с более низким содержанием углерода.

Наличие тугоплавких неметаллических включений ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , нитридов) снижает жидкотекучесть стали, а также затрудняет питание образую-

шихся пор. Выделяющиеся при затвердевании двухфазной области слитка газы могут создавать в капиллярах противодействие течению жидкого металла и тем самым затруднять питание образующихся пор. Поэтому чем меньше вязкость металла, чем меньше неметаллических включений и газов в том жидком маточном сплаве, который накапливается в ходе кристаллизации в осевой зоне слитка, тем меньше при прочих равных условиях опасность образования центральной пористости, тем плотнее и здоровее будет сердцевина непрерывнолитой заготовки и полученного из нее проката.

Одним из условий, усиливающих центральную пористость и осевую ликвацию, является изменение геометрии сечения непрерывнолитой заготовки (раздутия) вследствие деформации слитка в поддерживающей системе установки. Раздутия вызывают специфические потоки в жидкой фазе, которые приводят к перераспределению легирующих элементов и примесей, образуя центральную пористость и осевую ликвацию. Причем с увеличением раздутия непрерывного слитка центральная пористость и осевая ликвация возрастают.

Снижение центральной пористости достигается за счет перегрева металла перед выпуском в кристаллизатор на 20–30°C выше температуры ликвидуса, создания оптимального соотношения скорости разливки и интенсивности охлаждения.

**Осевой пережог** является одним из характерных дефектов проката из высокоуглеродистой стали и представляет собой грубые нарушения сплошности осевой зоны заготовки, имеющие вид периодически повторяющихся местных поперечных разрывов. В зоне мелких разрывов на макрошлифах наблюдается повышенная травимость. Из-за темного цвета участков с разрывами после травления в 50%-ном растворе соляной кислоты дефект называют «черновины» (рис. 5).

Темный цвет участков с разрывами — это следствие окисления металла в процессе нагрева под прокатку. В продольном сечении темплета от круглого проката «черновины» имеют вид темно-травящихся извилистых полосок (рис. 6).

При большой степени развития осевого пережога разрушение захватывает целые области осевой части обжатой заготовки.

В продольном изломе в местах «черновин» наблюдаются четкие кристаллические нити (рис. 7).

Относительно причин возникновения этого дефекта существуют различные точки зрения. Исследования поперечного сечения проката, изломов и микрошлифов подшипниковой стали показали, что одной из причин возникновения осевого пережога является усиленная зональная ликвация. Для борьбы с осевым пережогом, связанным с ликвацией хрома, углерода и других ликвирующих элементов, особое внимание уделяется процессу томления подшипниковой стали при нагре-

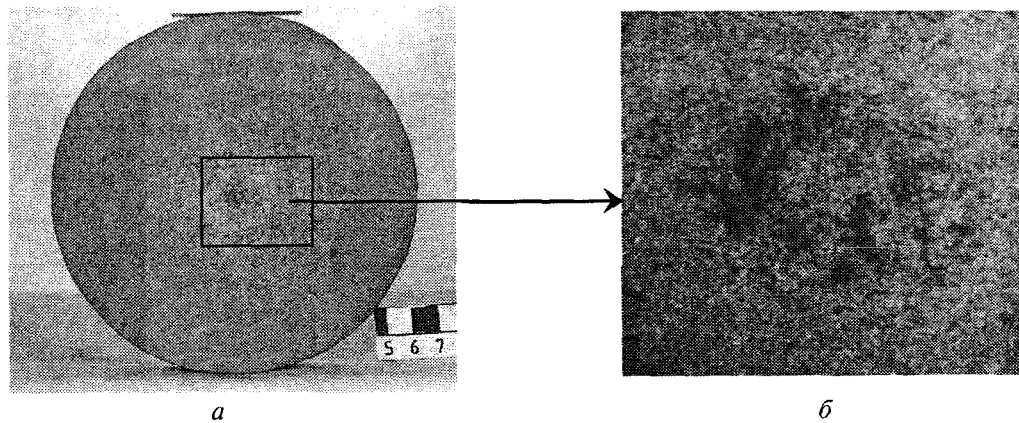


Рис. 5. Горячекатаная заготовка из стали ШХ15СГ с дефектом макроструктуры «осевой пережог» («черновины») (а); при увеличении — темные пятна с выявляющимися надрывами в виде сетки (б)

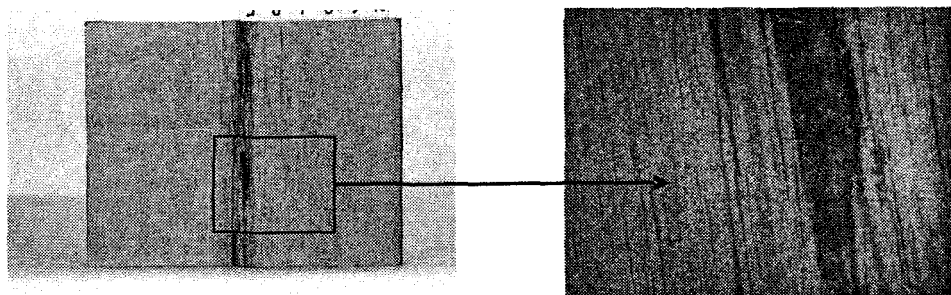


Рис. 6. Продольный макротемплет от круглого проката с дефектом осевой пережог «черновины»

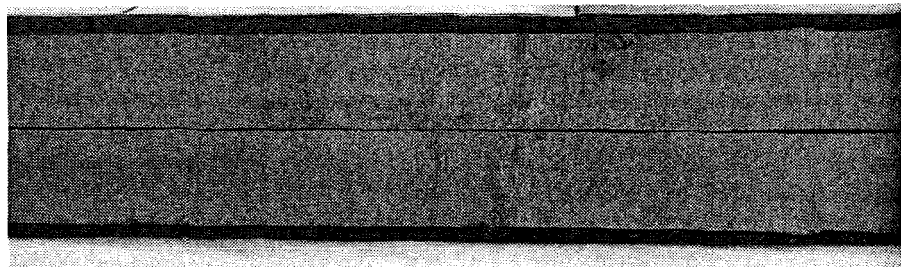
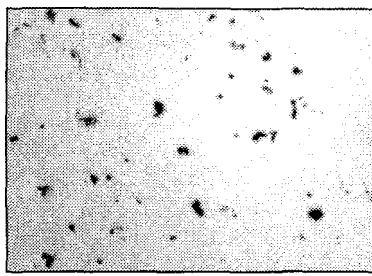


Рис. 7. Излом с наличием осевого пережога

ве под прокатку. Предусматривается выдержка металла в зоне температур 1100–1200°C (по стенке печи) в течение не менее 40% от общей продолжительности нагрева (гомогенизирующий нагрев). Пораженность металла осевым пережогом сопровождается, как правило, увеличением балла по центральной пористости и карбидной ликвации, а при микроконтроле дефектного металла наблюдается полное нарушение его сплошности в виде микропористости и микротрещин различной величины, часто располагающихся рядом с крупными карбидными и сульфидными включениями.

Микропоры и микротрещины являются грубым дефектом макроструктуры. Они встречаются в центральной части горячекатаных заготовок (рис. 8).

Микропоры характерны для проката диаметром 90 мм и выше. Они имеют вид мелких надрывов, пустот или трещин, расположенных под различными углами к направлению волокон; отдельные мелкие поры группируются в строчки или полоски, идущие вдоль волокна, в которых встречаются отдельные сульфидные включения или карбидная ликвация. Микропоры обычно располагаются в участках с повышенной концентрацией углерода и наличием карбидов. Существует предположение, что образование микротрещин связано с начальной стадией осевого пережога. Начальная стадия осевого пережога дает микропоры и микротрещины, а сильно развитый осевой



*a*



*b*

Рис. 8. Микропоры в осевой зоне проката подшипниковой стали ШХ15СГ: *a* – в поперечном сечении образца; *b* – в продольном сечении образца

пережог приводит к полному разрушению внутренней части заготовки.

Большинство дефектов макроструктуры являются концентраторами напряжений и очагами зарождения усталостных трещин в процессе производства и эксплуатации подшипников, поэтому весьма нежелательны большая общая и центральная пористость прутков, осевая ликвация.

#### Вывод

1. Важным фактором получения высокого качества непрерывнолитого слитка является конструкция и состояние оборудования машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

2. Большое влияние на осевую ликвацию оказывают оптимальное соотношение скорости разливки и интенсивности охлаждения.

3. На качество центральной зоны подшипниковой стали оказывают влияние химический состав стали, степень осевой ликвации, а также температура нагрева и время выдержки перед деформацией.