



*Features formation of cracks in steel 18ХГТ are investigated. It is established that in the course of crystallization the peritectic transformation goes on phase reactions: formation of primary ferrite from liquid and formation of peritectic austenite from this ferrite and residual liquid.*

С. М. БОРЦОВ, ОАО «БМЗ», В. А. ЛУЦЕНКО, Т. Н. ГОЛУБЕНКО, ИЧМ НАН Украины,  
И. А. КОВАЛЕВА, А. В. ВЕНГУРА, А. Н. ХОДОСОВСКАЯ, В. И. ГРИЦАЕНКО, ОАО «БМЗ»

УДК 669.14.018.29:621.771.2:620.191.33

## СНИЖЕНИЕ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В НИЗКОУГЛЕРОДИСТОМ КОНСТРУКЦИОННОМ СОРТОВОМ ПРОКАТЕ ИЗ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ

На качественные показатели сортового проката влияют такие металлургические аспекты производства, как исходное сырье, технология производства стали, условия разливки, кристаллизации стали, последующий нагрев и прокатка заготовок. В процессе производства в прокате могут образоваться различного рода дефекты, связанные с физической и химической неоднородностью.

Уменьшение поверхностных дефектов и неоднородности конструкционного проката достигается технологией непрерывного литья заготовок на МНЛЗ. После образования твердого внешнего слоя и жидкого «ядра» максимальная скорость охлаждения заготовки в поверхностных слоях около 400°С/мин, а в центре – до 100°С/мин. В таких условиях трещиностойкость металла может зависеть от скорости вытягивания [1]. Наиболее подвержены образованию трещин непрерывнолитые заготовки, при затвердевании которых происходит перитектическое превращение.

Производство готового проката на ОАО «БМЗ» является завершающей стадией металлургического цикла и оказывает большое влияние на качество выпускаемой продукции.

Природу образования трещин изучали в конструкционном сортовом прокате из сталей 18ХГТ и S355J2 (см. таблицу) производства ОАО «БМЗ». Материалом для исследований были пробы из непрерывнолитого бруса сечением 300x400 мм и горячекатаного проката.

Повышенная склонность к образованию трещин доэвтектоидных сталей, к которым относятся стали марки 18ГТ и S355J2, обусловлена особенностями кристаллизации и структурными превращениями в твердом состоянии. Высокая скорость затвердевания таких сталей способствует образованию кристаллитов значительных размеров. Росту кристаллитов способствует также значительное количество тепла, выделяющееся при перитектическом превращении, которое отсутствует при кристаллизации сталей с более высоким содержанием углерода. Чем меньше содержание углерода в стали, тем выше температура начала кристаллизации и тем уже интервал кристаллизации. Кристаллизационные трещины образуются в конце затвердевания, при участии остаточной межкристаллитной жидкости.

Кристаллизацию стали 18ХГТ моделировали при выплавке проб, охлаждаемых в тигле или в клиновидном кокиле со скоростью 1–10 °С/с до 1200 °С и закаленных по ходу охлаждения.

Результатами исследований<sup>1</sup> был подтвержден двухстадийный ход перитектического превращения по фазовым реакциям: образование первичного феррита ( $\delta$ ) из жидкости и образование перитектического аустенита ( $\gamma$ ) из этого феррита и остаточной жидкости. Наблюдали также дополнительную стадию – затвердевание ликвиционной межкри-

<sup>1</sup> При участии А. И. Яценко.

Химический состав исследуемых сталей 18ХГТ и S355J2

Марка стали	Содержание химических элементов, %						
	C	Si	Mn	Cr	Ti	P	S
18ХГТ	0,18	0,28	1,10	1,20	0,07	≤0,035	≤0,035
S355J2 [3]	0,22	0,55	1,60	–	–	≤0,035	≤0,035

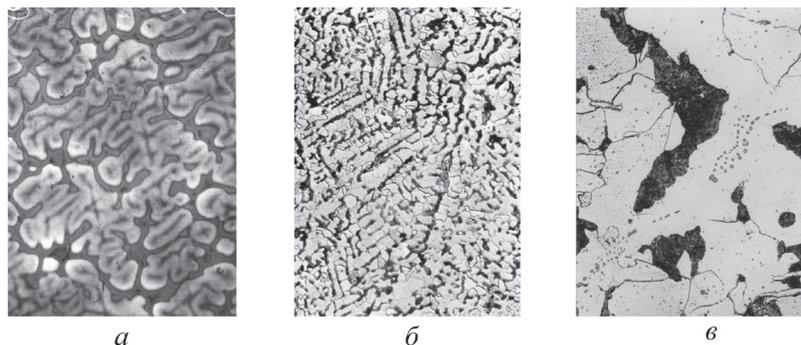


Рис. 1. Структура непрерывнолитой заготовки из стали 18ХГТ: а, б – общий вид; в – по месту дефекта; а – травление щелочным раствором пикрата натрия; б, в – ниталем. а, б –  $\times 63$ ; в –  $\times 320$

сталлитной жидкости. Первичная структура после затвердевания показана на рис. 1, а. Ниже  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$  образуется феррит по реакции  $\gamma \rightarrow \alpha + \gamma_{\text{ост}}$ .

Конечная структура литого металла содержит феррит и дендритно упорядоченные участки перлита (рис. 1, б). От поверхности к центру встречаются «светловины» – ферритные участки в бывших междендритных пространствах, содержащие скопления неметаллических включений, в основном сульфидов. Эти скопления состоят из мелких (около 1 мкм) глобулярных зерен (рис. 1, в). Появление в ферритной матрице сульфидных глобулей можно предположительно объяснить следующими явлениями:

- нарушением непрерывности сульфидных прожилок в ликвационных участках с сульфидной эвтектикой (фазового типа Fe-FeS), коалесценцией и сфероидизацией их при нагреве блюма, с переходом фазы FeS (пирит) в FeS<sub>2</sub> (пирротин);
- влиянием марганца в растворе на конечный период процесса кристаллизации.

Добавка марганца изменяет форму и распределение сульфидных включений, способствуя изменению положения сплава относительно границ фазовых областей в системе Fe-S-Mn. После кристаллизации аустенитных дендритов возможно появление капель новой высокосернистой жидкости (расслоение остаточной жидкости) либо изменение фазового механизма образования сернистой эвтектики. Вместо эвтектической реакции  $\text{ж} \rightarrow \gamma + \text{FeS}$  с образованием сульфидных пленок при температурах около  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  произойдет реакция  $\text{ж} \rightarrow \gamma + \text{MnS}$  при температуре около  $1240\text{ }^{\circ}\text{C}$  согласно равновесиям в сплаве Fe-Mn-FeS-MnS [4].

Специальное травление подтвердило, что участки аномальной структуры соответствуют пограничным зонам между крупными дендритами – бывшей ликвационной жидкости в изолированных каплях или капиллярных каналах. Легкоплавкая жидкость способствует зарождению и росту микротрещин, проникающих в наружный слой (рис. 2).

Если жидкость проходит сквозь поры в корочке, возможно окисление внутренних полостей, следы которых не ликвидируются последующим нагревом и прокаткой.

Структура исследованного горячекатаного проката феррито-перлитная, с полосчатостью 2–3-го балла (рис. 3, а). После зачистки наблюдаются трещины (0,5–1,2 мм) искривленной или клиновидной формы (рис. 3, б–г), заполненные оксидами (в основном магнетитом Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и гематитом  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  слоистого или «кружевного» строения). Матрица вокруг них обезуглерожена, обеднена кремнием и содержит дисперсные оксидные включения, особенно в зонах бывших аустенитных зерен. Глубина внутреннего окисления больше трещин и соответствует положению ферритных «светловин» в литой структуре.

Очевидно, зарождение этих трещин происходит при нагреве до прокатки и сопровождается окислением при росте окалины и твердорастворным выделением дисперсных комплексных оксидов [5]. Характерная структурная особенность – образование вокруг и в окисленной трещине шлейфа мельчайших «сателлитов». Кроме описанных дефектов, во внутренних зонах структуры каких-либо междендритных или флокеноподобных трещин нет. Твердофазные (зернограничные) трещины исключаются по условиям структурообразования.

Устойчивость к трещинообразованию может увеличиваться при рекристаллизации феррита, уменьшении количества водородных ловушек – де-



Рис. 2. Ликвационные междендритные зоны по месту дефекта в непрерывнолитой заготовке из стали 18ХГТ.  $\times 50$

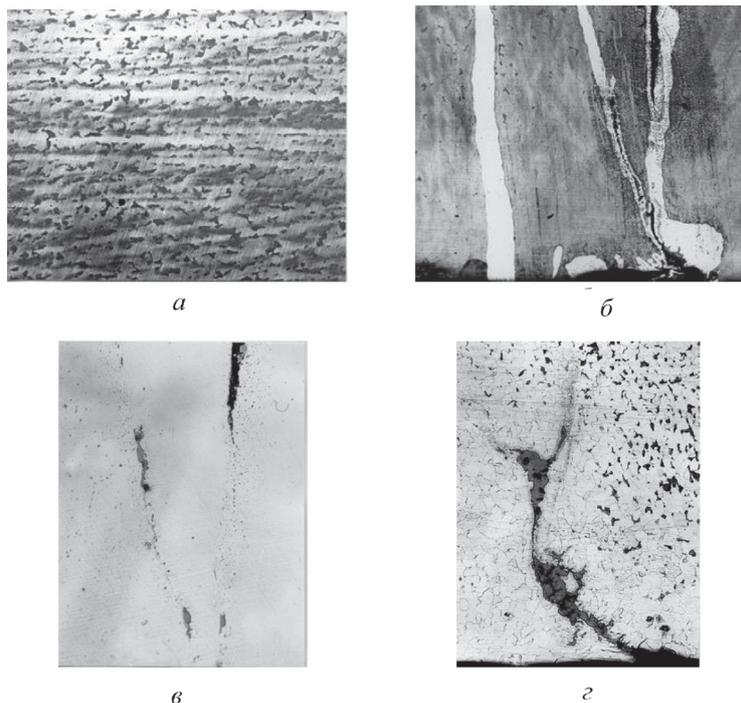


Рис. 3. Структура горячекатаной заготовки диаметром 80 мм из стали 18ХГТ: *а* – общий вид; *б–г* – по месту трещин: *а, б, г* –  $\times 100$ ; *в* –  $\times 200$

фектов решетки, выделений при оптимальных режимах охлаждения. Поэтому улучшение качества непрерывнолитой продукции текущего производства непосредственно зависит от управления высокотемпературными процессами структурообразования.

Технологический процесс прокатного производства на различных стадиях обработки металла (нагрев, прокатка, охлаждение и др.) связан с неравномерностью деформации отдельных частей объема металла, что вызывает в последнем различные напряжения. Неоднородность структуры непрерывнолитого металла, расположение и свойства различных кристаллов, наличие поверхностных и внутренних дефектов усугубляют неравномерность распределения напряжений в процессе обработки металла давлением.

Различные дефекты (поверхностные, подповерхностные) непрерывнолитой заготовки, являясь местами повышенной концентрации напряжений и подвергаясь растягивающим напряжениям в процессе прокатки, могут привести к образованию

местных хрупких разрушений до того, как среднее напряжение достигнет предела текучести. В большинстве случаев причиной получения несоответствующей продукции является не только качество исходной (непрерывнолитой) заготовки, но и вид посадки металла перед деформацией.

На ОАО «БМЗ» используются следующие технологические схемы по передаче непрерывнолитой заготовки для дальнейшего проката на стане 850:

1. Машина непрерывного литья заготовки № 3 (далее МЛНЗ-3) → нагревательная печь стана 850 («горячий» посад).

2. МЛНЗ-3 → печь предварительного нагрева → нагревательная печь стана 850 («теплый» посад).

3. МЛНЗ-3 → охлаждение непрерывнолитой заготовки под колпаками → печь предварительного нагрева → нагревательная печь стана 850 («холодный» посад).

Технология нагрева металла в сочетании с правильно выбранным видом посадки способствует в значительной степени локализации отдельных



Рис. 4. Трещины в непрерывнолитой заготовке из стали S355J2 сечением 300×400 мм: *а* – наружная поверхность; *б* – корковая зона макротемплета (поперечное сечение)

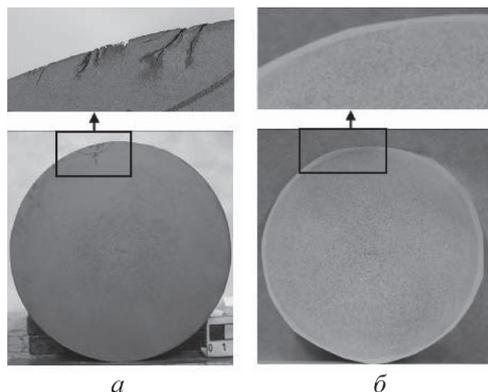


Рис. 5. Поперечное сечение горячекатаной заготовки диаметром 140 мм из стали S355J2: *a* – серный отпечаток; *б* – макроструктура

дефектов непрерывнолитой заготовки (рис. 5), улучшению некоторых характеристик готового сорта.

Определение влияния на образование трещин вида посадки производили на непрерывнолитой (рис. 4) и горячекатаной (рис. 5) заготовке из стали S355J2<sup>1</sup>, заporоченной поверхностными дефектами, которые представляли собой взаимно пересекающиеся небольшие извилистые трещины, в некоторых местах сопровождающиеся рваниной [6].

При макроструктурном анализе выявлены трещины, вышедшие и не вышедшие на поверхность (рис. 5, *a*), при этом в месте расположения дефектов ликвации серы не наблюдается (рис. 5, *б*).

Поверхностные трещины расположены под прямым углом, извилисты, малой ширины, с наличием ответвлений и незначительного обезуглероживания (рис. 6, *a*). Вокруг полости трещины характерных участков с ликвацией легкоплавких компонентов не обнаружено (рис. 6, *б*).

Поверхностные дефекты могут наследоваться с непрерывнолитых заготовок и трансформироваться с образованием грубых нарушений сплошности наружных и подповерхностных слоев металла. Известно [7], что с увеличением продолжительности выдержки непрерывнолитых заготовок под колпаками после разливки перед посадом в нагревательную печь снижается вероятность появления поверхностных дефектов в прокате.

При остывании низкоуглеродистая сталь претерпевает фазовые превращения: в точке  $A_{T3}$  из аустенита начинается выделение феррита, а ниже точки  $A_{T1}$  происходит превращение в перлит. Из-за разницы кристаллических решеток аустенита и феррита эти превращения сопровождаются значительными объемными изменениями. Поэтому если посадка непрерывнолитой заготовки в нагреватель-

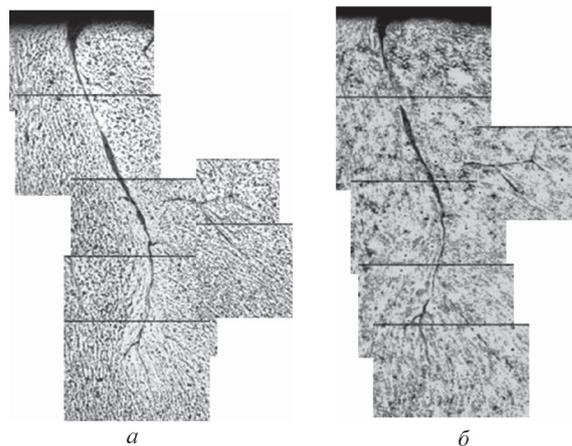


Рис. 6. Трещины в поперечном сечении микрошлифа стали S355J2 ( $\times 50$ ): *a* – травленный в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты; *б* – травленный в реактиве Обергоффера

ную печь происходит до начала выделения феррита (при температурах выше точки  $A_{T3}$ ), то при нагреве в металле объемные изменения не происходят.

При посадке заготовок в температурном интервале  $A_{T3}$ - $A_{T1}$  (или несколько ниже  $A_{T1}$ ) в процессе нагрева происходит аустенитизация, приводящая к уменьшению удельного объема и появлению на поверхности блюмов растягивающих напряжений. Наиболее опасными с точки зрения возникновения трещин являются слои, близкие к внешней границе, на которых действуют максимальные растягивающие напряжения. При низкой пластичности и прочности подкоркового слоя такие напряжения будут вызывать разрывы металла. При нагреве холодных непрерывнолитых заготовок напряжения, вызванные полиморфными превращениями, компенсируются тепловыми напряжениями [8] и возникновение значительных поверхностных напряжений не происходит.

С точки зрения снижения энергозатрат (удельного расхода газа) на подогрев заготовки и увеличения производительности наиболее предпочтительным является «горячий» посад. Однако при наличии на непрерывнолитой заготовке поверхностных дефектов (трещин) использование такой схемы не исключает возможность дальнейшего развития и трансформации дефектов в готовом сорте. В этом случае целесообразно применение «теплого» или «холодного» посадков, что обеспечивает удовлетворительное качество горячекатаной заготовки.

### Выводы

1. Установлено, что в непрерывнолитой заготовке из низкоуглеродистой конструкционной стали образование поверхностных и подповерхностных дефектов (трещин) происходит вследствие

<sup>1</sup> При участии В. В. Гордиенко.

ликвационной неоднородности первичной структуры.

2. Во избежание появления температурных трещин при производстве низкоуглеродистого конструкционного сортового проката целесо-

образно использование схемы «теплого» или «холодного» посада непрерывнолитой заготовки в нагревательную печь перед прокаткой, что позволит повысить качество готовой металлопродукции.

### Литература

1. О температурно-деформационном состоянии крупногабаритных слитков / З. Н. Гецелев, В. А. Калашников, Б. Ф. Трахтенберг и др. // Цветные металлы. 1974. № 4. С. 54–56.
2. ГОСТ 4543. Прокат из легированной конструкционной стали.
3. DIN EN 10025–2:2004. Изделия горячекатаные из конструкционных сталей.
4. Журавлев Л. Н., Колачев Б. А., Чучурючин А. Д. Фазовый состав и склонность сплавов Ti-Mo к водородной хрупкости I рода // Изв. АН СССР. Металлы. 1976. № 4. С. 184–189.
5. Образование высокотемпературных трещин в крупносортовом прокате из непрерывнолитой заготовки / А. И. Яценко, В. А. Луценко, Т. Н. Панфилова и др. // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. тр. Днепропетровск: ПГАСА. 2008. Вып. 42. Ч. 2. С. 69–74.
6. Новокщенова С. М., Виноград М. И. Дефекты стали: Справ. М.: Металлургия, 1984.
7. Жадан В. Т., Осадчий А. Н., Стеценко Н. В. Отделка и термическая обработка сортового проката. М.: Металлургия, 1978.
8. Гуляев А. П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986.