

УДК 620.192.43

Н.А. ГЛАЗУНОВА; О.В. РОГОВЦОВА

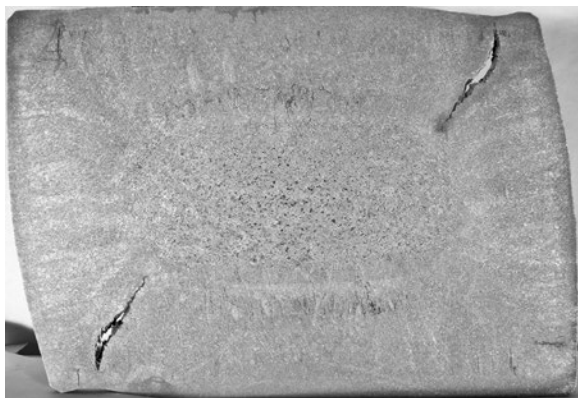
ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК», г. Минск, Республика Беларусь

## ЛИКВАЦИОННЫЕ ПОЛОСКИ И ТРЕЩИНЫ В НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КАЧЕСТВО ГОРЯЧЕДЕФОРМИРОВАННОЙ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ

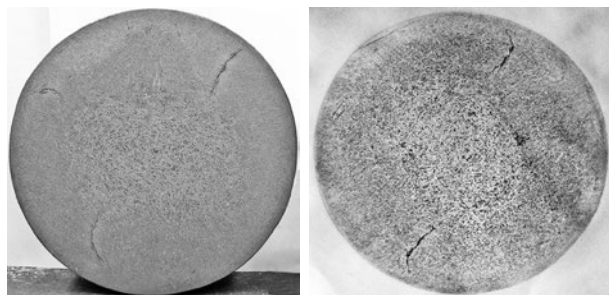
Несмотря на постоянное совершенствование технологии непрерывной разливки стали в непрерывнолитой заготовке (НЛЗ) выявляются внутренние дефекты, такие как ликвационные полосы (ЛП) и трещины, которые в прокатном переделе трансформируются в ЛП различной степени развития. ЛП — внутренний дефект непрерывнолитой заготовки и горячекатаного проката, выявляемый при контроле макроструктуры. ЛП в зависимости от факторов, вызывающих их образование, могут располагаться в различных участках поперечного сечения заготовки. В зависимости от места расположения в поперечном сечении металлопродукции ЛП подразделяются на: ЛП 1-го ряда (подповерхностные); ЛП 2-го ряда (в промежуточной зоне); ЛП 3-го ряда (в центральной зоне). Наибольшее влияние на качество проката и дальнейшую его переработку оказывают ЛП 1-го ряда, которые могут быть по расположению угловые и перпендикулярные граням. Не все ЛП 1-го ряда приводят к отбраковке металлопродукции. Для изучения влияния ЛП в прокате на дальнейшую горячую переработку металлопродукции проведено исследование по трансформации ЛП в процессе горячей осадки.

**Ключевые слова:** разливка, кристаллизация, заготовка, прокат, макроструктура, трещины, ликвация, травление, нагрев, осадка, качество, исследование, микроструктура, трансформация

Современное производство металлопродукции базируется на использовании проката из НЛЗ. Несмотря на постоянное совершенствование технологии непрерывной разливки стали в НЛЗ выявляются внутренние дефекты, такие как ЛП и трещины (рисунок 1 а), которые в прокате трансформируются в ЛП различной степени развития (см. рисунок 1 б).



а



б

в

**Рисунок 1 — Макроструктура:** а — непрерывнолитая заготовка с ЛП и внутренними трещинами; б — прокат из непрерывнолитой заготовки с ЛП и трещинами; в — серный отпечаток по Бауману проката с ЛП

ЛП — внутренний дефект НЛЗ и готового проката, выявляемый при контроле макроструктуры на поперечных образцах после горячего травления в 50-процентном растворе соляной кислоты, а также на серных отпечатках по Бауману (см. рисунок 1 в) [1]. ЛП представляют собой нитевидные потемнения на серном отпечатке или нитевидные участки повышенной травимости на макротемплете, создавая впечатление трещин [2]. Таким образом, ЛП — это следы полностью или частично залеченных маточным раствором трещин (надрывов), образовавшихся в процессе затвердения слитка в температурном интервале хрупкости. В зоне ЛП наблюдается ликвационная неоднородность металла, которая сказывается на механических и технологических свойствах металлопродукции [3].

Основными причинами, влияющими на возникновение трещин (надрывов), являются прочность, деформационная способность и скорость деформации металла при температурах затвердевания стали.

Из-за низкой пластичности стали при температуре вблизи температуры солидуса граница зерна у межфазной поверхности затвердевания может разрушиться тогда, когда напряжения превысят некоторую пороговую величину. Междендритная жидкость, обогащенная ликвирующими элементами и фазами (особенно фосфором и серой), из прилегающей лунки втягивается и накапливается в зоне разрушения [4].

ЛП в зависимости от факторов, вызывающих их образование, могут располагаться в различных участках поперечного сечения заготовки [5]. В зависимости от места расположения в поперечном сечении металлопродукции ЛП подразделяются на (рисунок 2):

- ЛП 1-го ряда (подповерхностные);
- ЛП 2-го ряда (в промежуточной зоне);
- ЛП 3-го ряда (в центральной зоне).

ЛП 1-го ряда могут приводить к образованию дефектов проката и в зависимости от причины образования и места расположения подразделяются на:

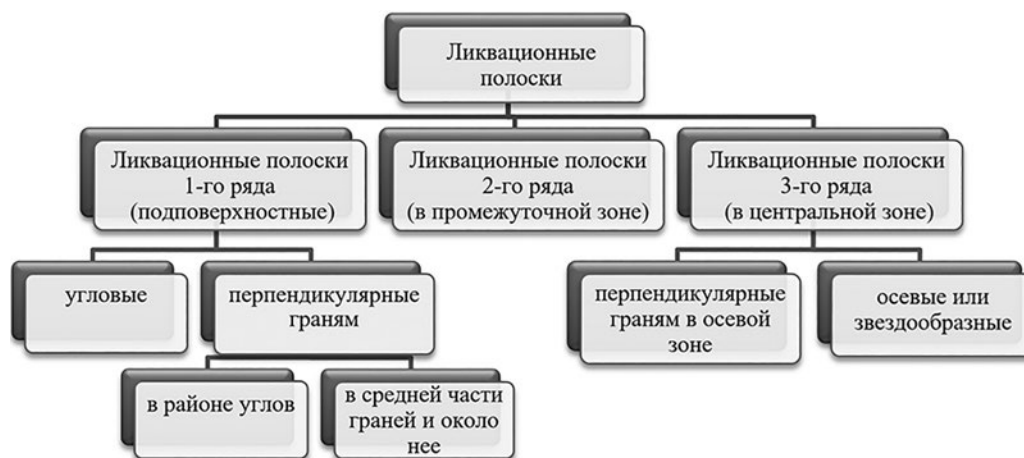


Рисунок 2 — Классификационная схема ЛП

- угловые (см. рисунок 1) — проходят по диагоналям поперечного сечения вдоль границы различных фронтов кристаллизации, могут распространяться по всей длине диагонали сечения слитка. Данные трещины образуются в результате усадочных напряжений (в наружных слоях возникают напряжения сжатия, а во внутренних — растяжения);

- перпендикулярные граням (рисунок 3):

- в районе тупых углов зарождаются в кристаллизаторе, в зоне подбоя и далее в ЗВО. Образование тупого угла может сопровождаться искажением прилегающей к нему грани (ужимина) и ромбичностью заготовки. В районе острых углов образуются уже после выхода слитка из кристаллизатора в зоне подбоя, также развиваются в ЗВО в результате разогрева и расширения участков корки, примыкающей к острому углу;

- в средней части граней и около нее — являются термическими, образуются под кристаллизатором и в верхних секциях ЗВО в результате разогрева и температурного расширения средних участков корки заготовки (см. рисунок 3). Могут распространяться в глубину слитка и сопровождаться продольной ужиминной.

ЛП 2-го ряда образуются в основном в ЗВО, располагаются в промежуточной зоне, дендритная структура которой характеризуется направленной кристаллизацией. Образуются в результате одновременного воздействия усадочных и термических напряжений растяжения внутренних и внешних слоев.

ЛП, расположенные в промежуточной зоне (ближе к осевой зоне), могут образовываться в результате напря-



Рисунок 3 — Макроструктура НЛЗ с ЛП, перпендикулярными граням (1) в районе углов и перпендикулярными граням в средней их части (2)

жений деформации не полностью затвердевшего слитка (с жидкой сердцевиной при применении мягкого обжатия). ЛП 2-го ряда находятся далеко от поверхности (рисунок 4) и не приводят к образованию поверхностных дефектов при прокатке.

ЛП 3-го ряда:

- перпендикулярные граням в осевой зоне — это ЛП деформации, которые проходят через центр слитка и направлены в основном перпендикулярно граням. Образуются в случае значительного обжатия заготовки при одновременном интенсивном вторичном охлаждении, при обжиме заготовок с незатвердевшей сердцевиной, а также в результате разгиба заготовок при высоких скоростях вытягивания и температуре металла. Могут развиваться в промежуточную зону (2 ряд). В поперечном сечении слиток может принять бочкообразную форму;

- осевые или звездообразные исходят радиально из центра заготовки (рисунок 5). Являются следствием интенсивного вторичного охлаждения в нижних секциях ЗВО. У заготовки, выходящей из ЗВО, поверхность может быть холодной, а центральная часть горячей. Пока заготовка движется к тянуще-правильному аппарату, тепло, передаваемое от центра к поверхности, может привести к разогреву корки с последующим расширением. В центре наоборот имеется склонность к сжатию, вызванная снижением температуры металла. Паук образуется в результате этих противоположных воздействий.

Как уже отмечалось выше, наибольшее влияние на качество проката и дальнейшую его переработку оказывают ЛП 1-го ряда. На рисунке 6 приведены фотографии серных отпечатков горячекатанного проката с ЛП 1-го ряда различной степени развития.

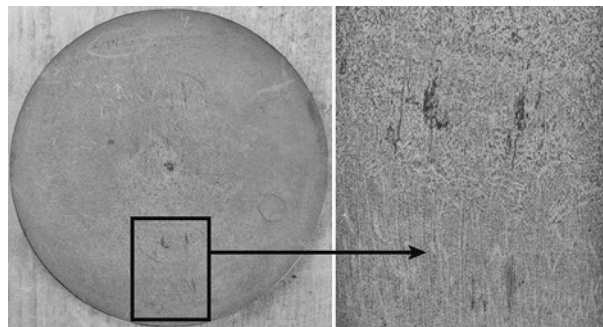


Рисунок 4 — ЛП 2-го ряда

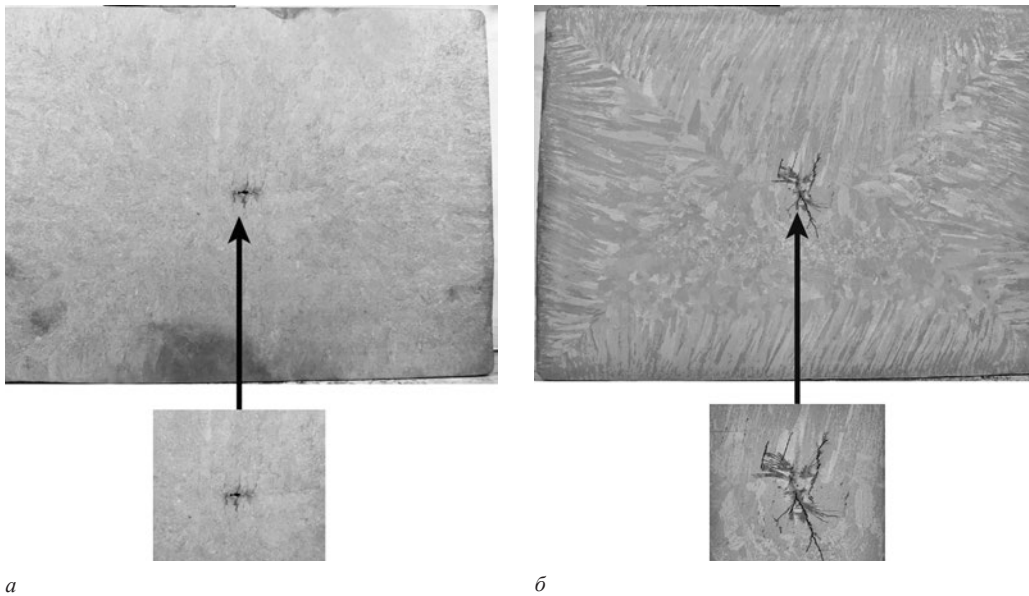
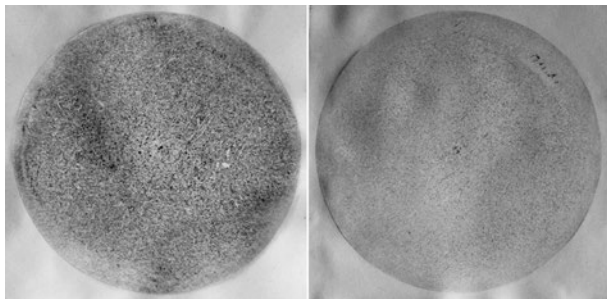
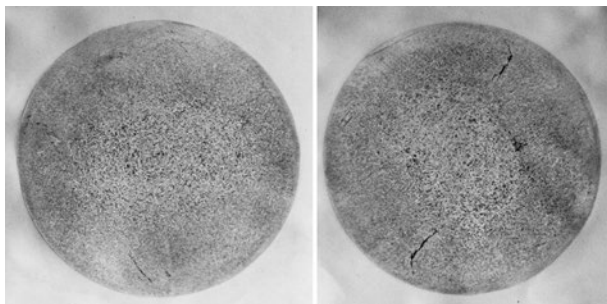


Рисунок 5 — Макроструктура НЛЗ с ЛП 3-го ряда: *а* — перпендикулярные граням в осевой зоне; *б* — осевые или звездообразные



*а*



*б*

Рисунок 6 — Серные отпечатки по Бауману проката с ЛП 1-го ряда: *а* — перпендикулярные граням исходной заготовки; *б* — угловые

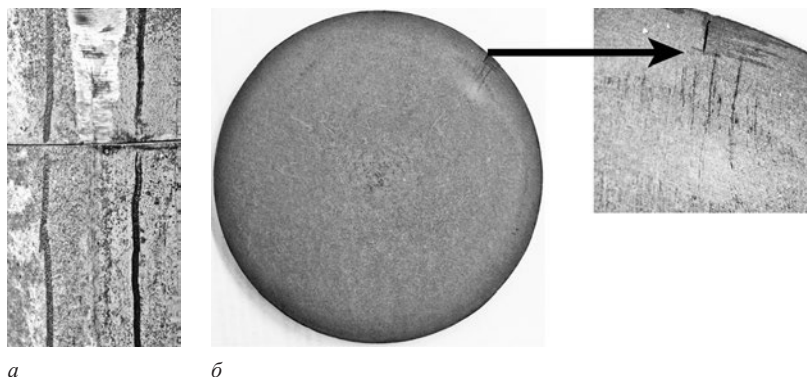
Если ЛП располагаются близко к поверхности, то в процессе горячей деформации (прокат, ковка, штамповка) могут выходить на поверхность в виде раскатанных (раскованных) трещин [6].

На рисунке 7 приведен поверхностный дефект горячекатаной заготовки, образовавшийся из-за вышедших на поверхность ЛП в процессе деформации.

Но не все ЛП 1-го ряда приводят к отбраковке металлопродукции. Метод оценки ЛП и требования согласуются производителем металлопроката с потребителем. Для качественных марок сталей ЛП в прокате нормируется, и должны быть не более 1 балла шкал [2].

Для изучения влияния ЛП в горячекатаной заготовке более 1 балла на дальнейшую горячую переработку металлопродукции проведено исследование по трансформации ЛП в процессе горячей осадки на 2/3 высоты пробы. Для исследования выбраны образцы с ЛП 1-го ряда (с угловыми и перпендикулярными гранями) различной степени развития в зависимости от их длины и ширины раскрытия [7]. Длина ЛП первой пробы составляет 10 % диаметра, длина ЛП второй пробы — 15 % диаметра и длина ЛП третьей пробы — 20 % диаметра. От поверхности ЛП расположены на расстоянии 2–6 мм. Ширина ЛП мене 0,5 мм. Макроструктура поперечного сечения опытных проб показаны на рисунках 8–10.

От каждой исследуемой пробы в зоне расположения ЛП для исследования вырезали поперечные образцы.



*а*

*б*

Рисунок 7 — Поверхностный дефект горячекатаной заготовки из-за вышедших на поверхность ЛП в процессе деформации: *а* — поверхность заготовки; *б* — макроструктура



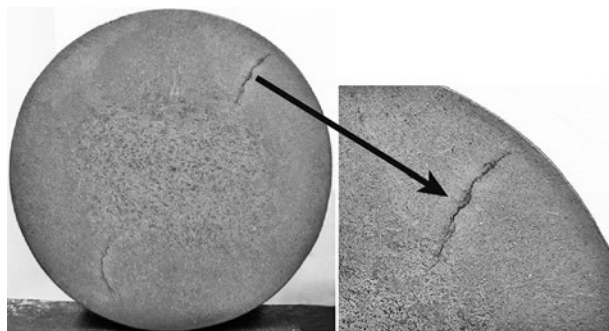


Рисунок 8 — ЛП длиной 9 мм (10 % от диаметра) в прокате Ø90 мм

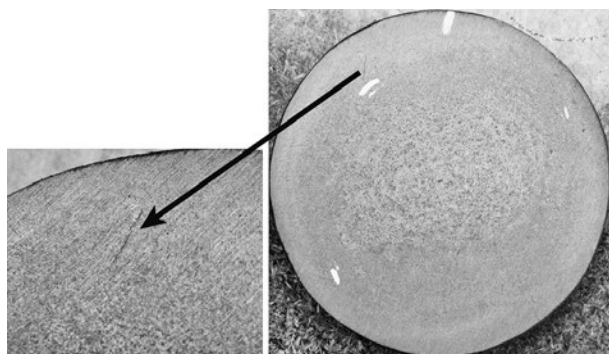


Рисунок 9 — ЛП длиной 13 мм (15 % от диаметра) в прокате Ø85 мм

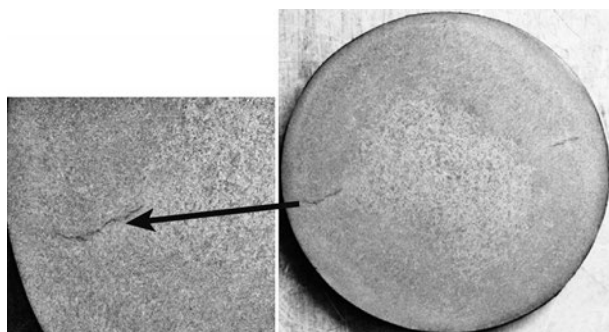
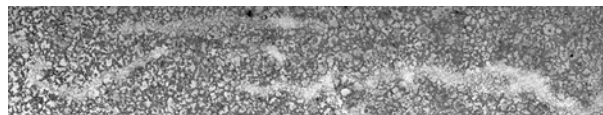


Рисунок 10 — ЛП длиной 20 мм (20 % от диаметра) в прокате Ø100 мм

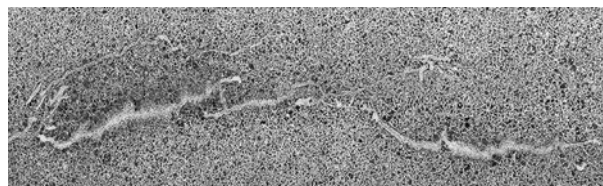
При исследовании микрошлифов в зоне расположения ЛП несплошности металла отсутствуют. Наблюдаются скопления сульфидных включений в виде дорожек (рисунки 11 а, 12 а), после травление в реактиве Обергоффера в зоне расположения ЛП выявляется ликвация серы



а



б



в

Рисунок 12 — Микроструктура в месте расположения ЛП длиной 20мм: а — не травлено, 100<sup>х</sup>; б — травление в реактиве Обергоффера, 100<sup>х</sup>; в — травление в реактиве Nital, 50<sup>х</sup>

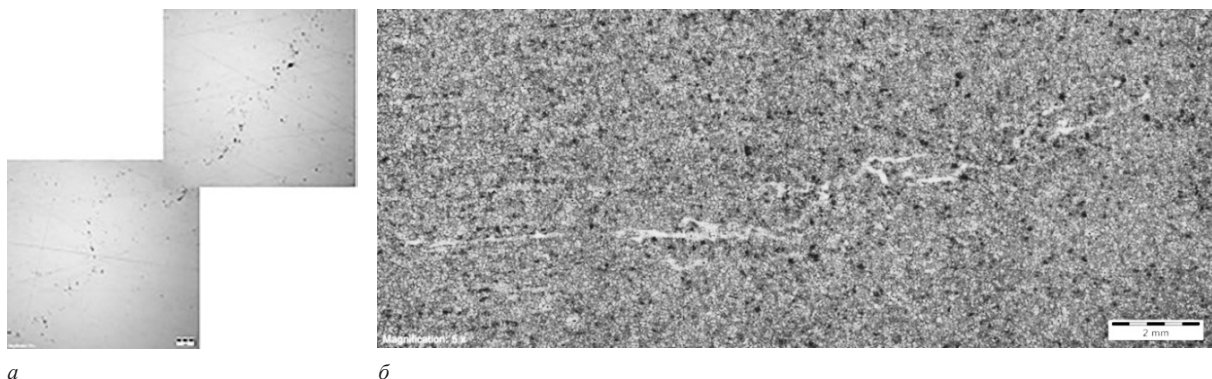
и фосфора в виде светлых полос (см. рисунки 11 б, 12 б) [8, 9]. Наблюдается некоторое увеличение количества перлита (см. рисунки 12 в), свидетельствующее о ликвации углерода [10]. Окислы железа в зоне расположения ЛП не обнаружены.

Все исследуемые пробы подвергались нагреву в лабораторной печи до 950 °С, выдержке 3–4 часа и последующей осадке на 2/3 высоты.

После горячей осадки исследовалась поверхность и поперечное сечение проб. В процессе эксперимента установлено:

- по ЛП, перпендикулярным граням, внутренних и поверхностных дефектов не образовалось;
- по ЛП угловым длиной 13 мм, расположенным на расстоянии 6 мм от поверхности, внутренних и поверхностных дефектов не образовалось (рисунок 13);
- по ЛП угловым длиной 20 мм, расположенным на расстоянии 2–4 мм от поверхности, образовались трещины с выходом на поверхность (рисунок 14). Длина трещин превышает размер ЛП исходной заготовки.

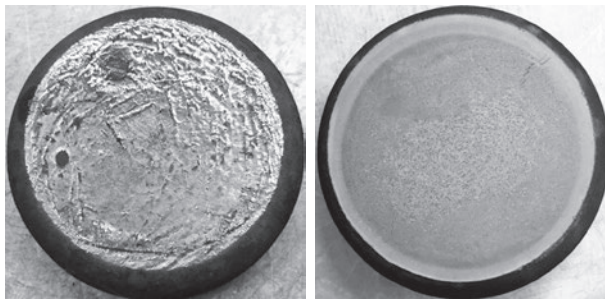
Дополнительно было исследовано возможное влияние большей степени деформации на образование поверхностных и внутренних дефектов в зоне ЛП 1-го ряда. Для этого пробу с ЛП длиной 15 % от диаметра, расположенными на расстоянии 6 мм от поверхности



а

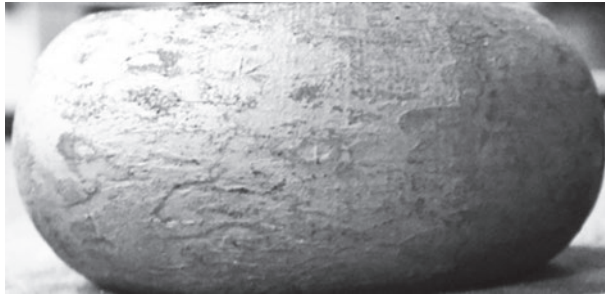
б

Рисунок 11 — Микроструктура в месте расположения ЛП длиной 9 мм, поперечное сечение: а — не травлено, 100<sup>х</sup>; б — травление в реактиве Обергоффера, 50<sup>х</sup>



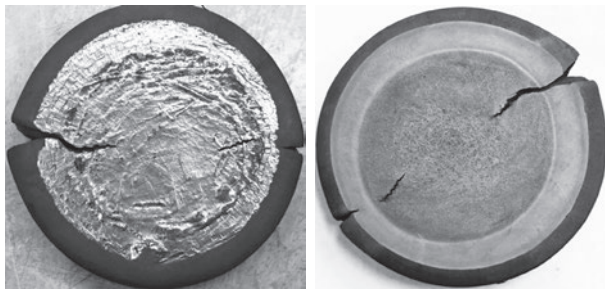
*a*

*б*



*в*

**Рисунок 13** — Проба с ЛП угловыми длиной 9–13 мм после осадки на 2/3 высоты: *a* — торец пробы; *б* — макроструктура; *в* — поверхность



*a*

*б*



*в*

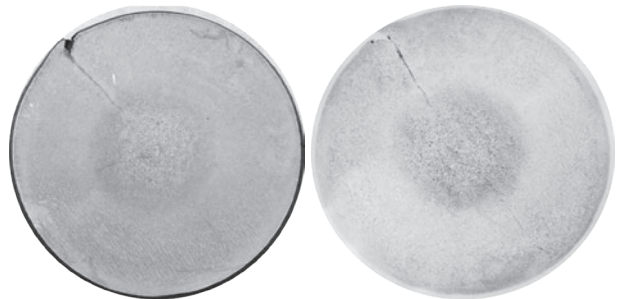
**Рисунок 14** — Проба с ЛП угловыми длиной 20 мм после осадки на 2/3 высоты: *a* — торец пробы; *б* — макроструктура; *в* — поверхность

(см. рисунок 9), на которой после осадки на 2/3 высоты поверхностные дефекты не образовались, подвергли горячей осадке на 3/4 высоты.

После осадки на 3/4 высоты на поверхности пробы образовался дефект (рисунок 15 *a*). Для исследования характера дефекта был сделан серный отпечаток и макротемплет поперечного сечения (см. рисунок 15 *б, в*). При исследовании макроструктуры выявлено, что образование дефекта произошло по ЛП. Длина ЛП значи-



*a*



*б*

*в*

**Рисунок 15** — Проба с ЛП угловыми длиной 13 мм после осадки на 3/4 высоты: *a* — торец пробы; *б* — серный отпечаток; *в* — макроструктура

тельно превысила длину ЛП в исходной горячекатаной заготовке.

Экспериментально установлено, что дефекты поковок образовались в месте расположения ЛП.

Таким образом, на образование дефектов по ЛП в прокате при дальнейшей горячей переработке металлопродукции (ковке, штамповке) оказывают влияние следующие факторы:

- место расположения ЛП;
- степень развития ЛП (размер);
- величина осадки при ковке.

**Выводы.** 1. ЛП и трещины непрерывнолитой заготовки трансформируются в ЛП в прокате.

В процессе горячей деформации (прокат, ковка, штамповка) ЛП 1-го ряда могут выйти на поверхность с образованием трещин.

Экспериментально установлено, что дефекты поковок образуются в месте расположения ЛП.

Влияние ЛП на качество горячедеформированной металлопродукции зависит от места расположения ЛП, их размера и степени деформации исходной заготовки.

Образования внутренних и поверхностных трещин не происходит по ЛП, перпендикулярным граням, и угловым ЛП длиной до 15 % диаметра, расположенным на расстоянии более 6 мм от поверхности при степени осадки не более 2/3 (до 66 %) высоты исходной заготовки.

ЛП, расположенные на расстоянии от поверхности менее 6 мм и длиной более 15% диаметра исходной заготовки, при горячей деформации приводят к образованию поверхностных и внутренних трещин.



Увеличение степени осадки до 75 % высоты исходной заготовки также приводит к образованию поверхностных и внутренних трещин даже по ЛП длиной до 15 % от диаметра.

#### Список литературы

1. Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры: ГОСТ 10243-75. — Взамен ГОСТ 10243-62; введ. 19.08.1975. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 46 с.
2. Заготовка стальная непрерывнолитая. Методы контроля и оценки макроструктуры: ГОСТ Р 58228-2018. — Введ. 19.09.2018. — М.: Стандартинформ, 2018. — 50 с.
3. Лейтес, А.В. Защита стали в процессе непрерывной разливки / А.В. Лейтес. — М.: Metallurgia, 1984. — 200 с.
4. Непрерывная разливка сортовой заготовки: монография [Электронный ресурс] / А.Н. Смирнов [и др.]. — Донецк: Цифровая типография, 2012. — 417 с. — Режим доступа: <https://steeltimes.ru/books/casting/sortccm/sortccm.php>. — Дата доступа: 07.06.2021.
5. Ботников, С.А. Современный атлас дефектов непрерывнолитой заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла / С.А. Ботников. — Волгоград: Панорама, 2011. — 97 с.
6. Прокат черных металлов. Термины и определения дефектов поверхности: ГОСТ 21014-88. — Введ. 01.01.1990. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 60 с.
7. Дефекты стальных заготовок и металлопродукции: справ.-атлас / З.А. Микирова [и др.]; под общ. ред. А.Н. Савенка. — Минск: СтройМедиаПроект, 2019. — 327 с.
8. Дефекты стали: справ. / С.М. Новокщенова, М.И. Виноград. — М.: Metallurgia, 1984. — 199 с.
9. Металлографическое травление металлов и сплавов: справочник / Л.В. Баранова, Э.Л. Демина. — М.: Metallurgia, 1986. — 256 с.
10. Особенности макро- и микроструктуры ступицы железнодорожных колес Ø957 мм, изготовленных из непрерывнолитой заготовки / А.И. Бабаченко [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. науч. тр. / ИЧМ НАН Украины. — Днепропетровск, 2013. — Вып. 27. — С. 222–234.

Glazunova N.A., Rogovtsova O.V.

#### Segregation streaks and cracks in a concast billet and their effect on the quality of hot-deformed steel products

In spite of the constant improvement of the steel continuous casting technology, the internal defects such as segregation strips and cracks, which in the rolling processing are transformed into segregation strips of varying degrees of development, are revealed in the concast billet. Segregation strips are an internal defect of concast billets and hot-rolled products which is detected during the macrostructure test. The segregation strips depending on the factors causing their formation can be located in different areas of the billet cross-section. Depending on the location in the cross-section of steel products, segregation strips are subdivided into: segregation strips of the 1st layer (subsurface); segregation strips of the 2nd layer (in the intermediate area); segregation strips of the 3rd layer (in the central area). The greatest influence on the quality of rolled products and its further processing is exerted by segregation strips of the 1st layer which can be angular and perpendicular to the edges in arrangement. Not all segregation strips of the 1st layer lead to rejection of steel products. To study the influence of segregation strips in rolled products on further hot processing of steel products, a research was carried out on the transformation of segregation strips in the process of hot upsetting.

Поступила в редакцию 14.07.2021.