

# НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ И ПРИРОДА ДЕФЕКТОВ ХОЛОДНОКАТАНОГО ЛИСТА

## Часть 2. ДЕФЕКТЫ, ОБРАЗОВАВШИЕСЯ НА ЭТАПЕ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А. А. КАЗАКОВ, П. В. КОВАЛЕВ, Е. И. КАЗАКОВА, С. Д. ЗИНЧЕНКО, П. Б. ГОРЕЛИК \*

Среди поверхностных дефектов холоднокатаного листа можно выделить группу дефектов, причиной образования которых является нарушение технологических режимов пластической обработки материала. При этом рассматриваются только те из них, которые принято связывать с неметаллическими включениями в стали. К таким дефектам относят поверхностные дефекты, условно названные «белая полоса с надрывом», «белая полоса без надрыва» и «серая полоса». Природа образования таких дефектов трактуется как стале-плави́льная, что обосновывают наличием в области дефектов неметаллических включений [1–9]. Целью данной работы является проверка обоснованности суждений о природе упомянутых выше поверхностных дефектов, выявляемых на этапе прокатного производства холоднокатаного листа из стали для глубокой вытяжки.

Были исследованы образцы холоднокатаного листа из сталей (08Ю, 08ПС, 01ЮТ, ДС03, ДС05), абразивные материалы, используемые для зачистки поверхности рабочих валков и слэбов, шлам после зачистки валков, а также поверхность рабочих валков станов горячей и холодной прокатки. Определен состав более 100 различных неметаллических включений, обнаруженных в исследованных образцах. Для металлографических исследований использовали анализатор изображения «Thixomet», который позволяет изготавливать большие по площади панорамы изображений с высоким разрешением.

**Дефект «белая полоса с надрывом».** Данный тип дефекта представляет собой светлую сплошную полосу, ориентированную в направлении прокатки, на фоне которой хорошо различимы серпообразные надрывы, расположенные периодически, примерно на одинаковом расстоянии друг от друга. Эти надрывы могут достигать 5 мм в ширину и часто распространяются почти на всю длину дефекта (рис. 1).

\* А. А. Казаков, П. В. Ковалев, Е. И. Казакова, С. Д. Зинченко, П. Б. Горелик, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ОАО «Северсталь»



Рис. 1. Внешний вид дефекта «белая полоса с надрывом»



Рис. 2. Панорамное изображение дефекта «белая полоса с надрывом» с незначительными поверхностными надрывами (×500)



Рис. 3. Панорамное изображение дефекта «белая полоса с надрывом» с глубокими клинообразными надрывами (×500)

Морфология «белой полосы с надрывом» разнообразна. Встречаются как незначительные поверхностные надрывы (рис. 2), так и глубокие клинообразные надрывы поверхности листа, представляющие собой транскристаллитные трещины, расположенные под углом 45 град. относительно направления прокатки (рис. 3). Глубина транскристаллитных трещин может достигать до 200 мкм и более.

Как следует из ряда отечественных и зарубежных классификаторов, загрязнения, заполнившие полости надрывов, при исследованиях поверхности таких дефектов на плоскостных шлифах идентифицируют как «цепочки неметаллических включений». На этом основании данный дефект относят к разряду стале-плави́льных [2–6]. Однако исследования мето-

дами оптической металлографии и микрорентгеноспектрального анализа не только на плоскостных, но и главным образом на поперечных шлифах показали отсутствие каких-либо неметаллических включений как в самом дефекте, так и в непосредственной близости от него. В связи с этим причины появления этого дефекта следует искать в особенностях деформации стали в окрестности дефектной области.

Обращает на себя внимание значительная разнородность стали в зоне повреждения, а также синусоидальный характер течения металла в приповерхностных областях возле дефекта. В тех местах, где синусоида течения металла выходит на поверхность листа, образуются транскристаллитные надрывы под углом 45 град. (рис. 4.). Линия надрыва отделяет зону основного «здорового» металла с крупным рекристаллизованным зерном от труднодеформируемой приповерхностной зоны, где процессы рекристаллизации не завершены. В этой зоне видны только зародыши новых зерен (рис. 4, б). Для более глубокого понимания механизмов образования этого дефекта необходимо проведение дополнительных исследований, однако уже имеющиеся результаты позволяют отклонить гипотезу о неметаллических включениях как о причине образования дефекта. Найденное упорядоченное синусоидальное течение металла в тонком поверхностном слое в окрестности разрушения позволяет совершенно определенно отнести этот дефект к дефектам прокатного производства. Причиной такой неравномерной деформации может быть вибрация стана или его валков.

**Дефект «белая полоса без надрыва»** является одним из наиболее распространенных и часто встречающихся дефектов холоднокатаного листа и пред-

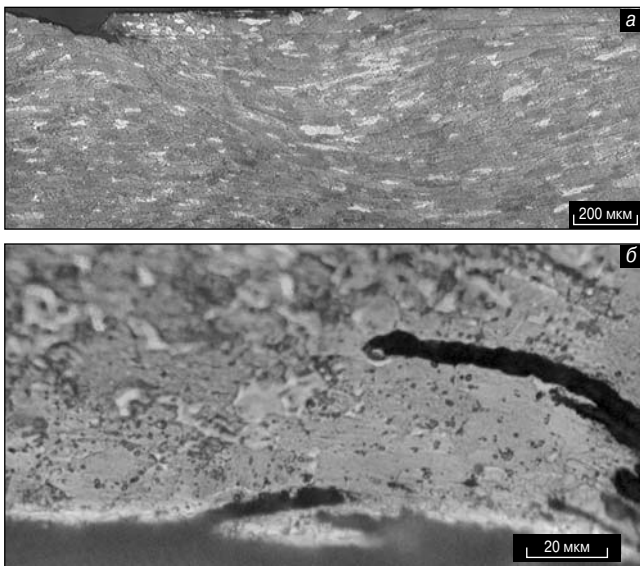


Рис. 4. Микроструктура дефекта «белая полоса с надрывом», образец после травления (а —  $\times 200$ , б —  $\times 1000$ )



Рис. 5. Внешний вид дефекта «белая полоса без надрыва»

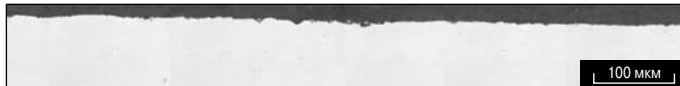


Рис. 6. Незначительные нарушения поверхности дефекта «белая полоса без надрыва» ( $\times 500$ )

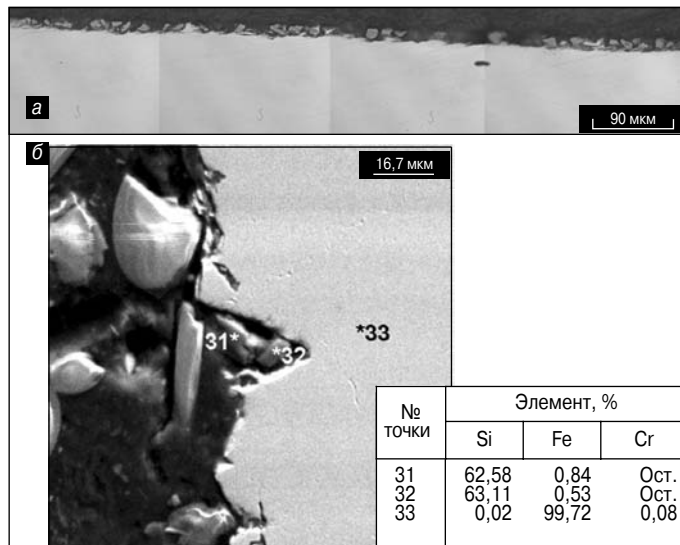


Рис. 7. Дефект «белая полоса без надрыва» с включениями карбида кремния:

а — включения карбида кремния на поверхности дефекта ( $\times 500$ ); б — результаты микрорентгеноспектрального анализа дефектной зоны

ставляет собой тонкую сплошную полосу шириной 1–2 мм и длиной более 30 см, ориентированную вдоль направления прокатки (рис. 5). В зависимости от характера освещенности и угла зрения цвет полосы меняется от блестящего металлического до матового светло-серого. Часто этот дефект трудно различить на фоне основного металла.

Металлографические исследования образцов, пораженных этим дефектом, показали его значительное морфологическое разнообразие: от небольших изъянов до грубых повреждений с расслоениями на поверхности листа. В полостях таких дефектов обнаружены металлические частицы, выкрошившиеся с поверхности валков, или карбида кремния. На рис. 6 показан пример дефектной области образца холоднокатаного листа, где видны только незначительные нарушения рельефа поверхности в виде микроскопических отслоений металла и ямок размером 5–10 мкм.

Другой пример дефекта с включениями карбида кремния размером до 5 мкм, расположенными как на поверхности металла, так и вдавленными на глубину до 15 мкм, приведен на рис. 7.

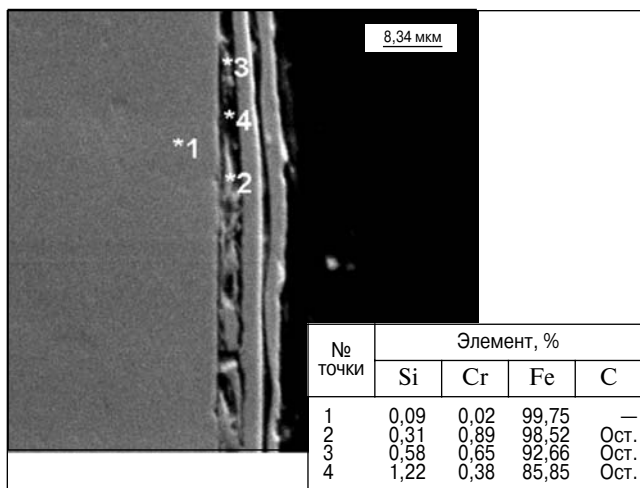


Рис. 8. Результаты микрорентгеноспектрального анализа дефекта «белая полоса без надрыва»

Грубое повреждение поверхности листа валком, где между основным металлом и поверхностным слоем найдены металлические частицы, содержащие до 0,9 % хрома, показано на рис. 8. Повышенные концентрации хрома в металлических частицах свидетельствуют о том, что такая частица была закатана в полость дефекта с деградирующей поверхности вала.

Несмотря на разнообразие поверхности дефекта «белая полоса без надрыва» практически на всех образцах, пораженных этим дефектом, удалось обнаружить мельчайшие строчечные скопления оксидных включений, вытянутых вдоль границ зерен и расположенных на глубине до 10–15 мкм вдоль поверхности листа (рис. 9). Эти внутренне окисленные границы настолько тонкие, что при исследовании на оптическом микроскопе они выявляются только после травления и с использованием специальных приемов формирования изображения при значительном увеличении (×1000). Сложность наблюдения состоит в том, что дефект расположен в очень тонкой приповерхностной зоне, где, несмотря на прецизионную шлифподготовку, невозможно получить четкое изображение по всей глубине дефекта. В связи с этим с помощью анализатора изображения «Thixomet» провели реконструкцию поверхностного слоя последовательной вертикальной склейкой частично расфокусированных изображений, так что вся кромка образца с окисленными границами зерен оказалась в фокусе (рис. 10).

В отличие от оптического микроскопа, исследования на электронном микроскопе характеризуются

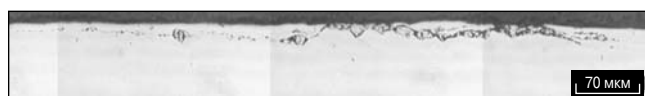


Рис. 9. Скопления оксидных включений в дефекте «белая полоса без надрыва» (×500)

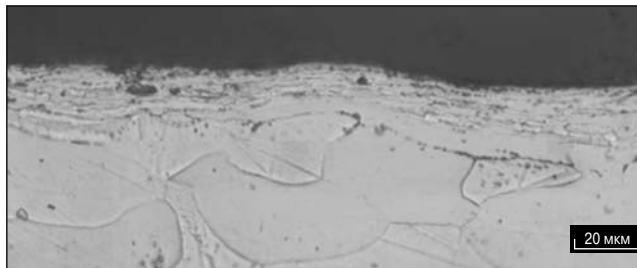


Рис. 10. Микроструктура дефекта «белая полоса без надрыва», образец после травления, панорама создана вертикальной склейкой расфокусированных изображений (×1000)

большой глубиной резкости, поэтому на поверхности дефекта хорошо видна сотовая структура, образованная окисленными границами зерен, а также большое число микронадрывов вдоль окисленных границ зерен (рис. 11). Действительно, окисленные границы плохо деформируются, в результате чего при холодной пластической деформации на поверхности листа образуются локальные микронадрывы.

Образование оксидов вдоль границ зерен по механизму внутреннего окисления могло быть спровоцировано механическими повреждениями поверхности при горячей прокатке листа. Такие микроповреждения могли быть нанесены как собственно поверхностью поврежденных валков, так и металлическими частицами, выкрошившимися с их поверхности. Частицы карбида кремния из шлама в оборотной воде, подаваемой под высоким давлением на поверхность металла для сбива окалины, также могли нанести механические повреждения поверхности. Как было показано выше, частицы карбида кремния и металлические частицы, близкие по составу к материалу валков, были обнаружены в дефекте. Поврежденные области листа, обладая развитой поверхностью, наиболее подвержены внутреннему окислению по сравнению со «здоровой» ровной поверхностью металла, поэтому в таких приповерх-

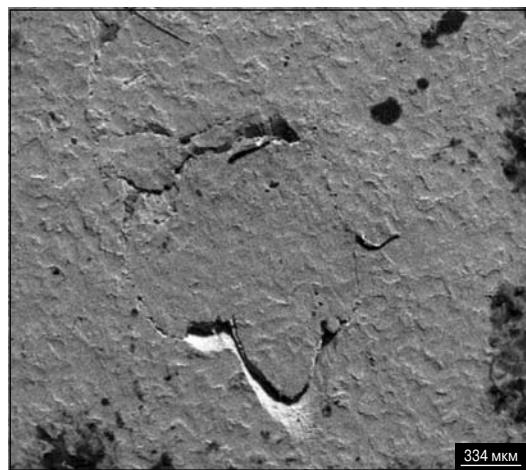


Рис. 11. Фрагмент поверхности дефекта «белая полоса без надрыва», электронный микроскоп (×200)

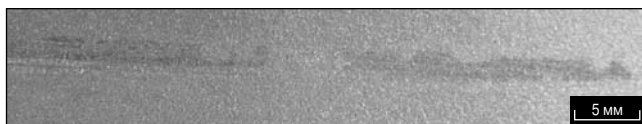


Рис. 12. Внешний вид дефекта «серая полоса»



Рис. 13. Панорамное изображение дефекта «серая полоса» (×500)

ностных слоях металла наблюдаются окисленные границы зерен, вытянутые вдоль линий прокатки [8, 9, 10]. При этом по числу таких окисленных слоев, закатанных при горячей прокатке, можно сделать вывод о числе проходов металла через валки, наносящие механические повреждения. Как следует из рис. 10, для данного дефекта можно насчитать до 12 таких проходов. При дальнейшей холодной прокатке тонкий приповерхностный слой, представляющий собой хрупкий слоистый композит, деформируется с образованием множества микронадрывов. Несмотря на рекристаллизационный отжиг после холодной прокатки, приповерхностные зерна, жестко закрепленные окисленными границами, остаются нерекристаллизованными, тогда как в основном объеме «здорового» металла процессы рекристаллизации прошли в полной мере с образованием крупных рекристаллизованных зерен (см. рис. 10).

**Дефект «серая полоса».** Внешне дефект «серая полоса» очень похож на дефект «белая полоса без надрыва», так как при наблюдении под определенным углом зрения полоса светлеет и становится трудно-различимой от «белой полосы без надрыва». Но дефект «серая полоса» значительно шире (до 5 мм) и при определенном ракурсе наблюдения его легче распознать на фоне основного металла. Дефект представляет собой сплошные серые полосы, ориентированные в направлении прокатки (рис. 12).

Панорамное представление дефектной области позволило определить глубину проникновения частиц абразивного материала в толщу листа, обнаружить образованные этими частицами полости и микрорванины, оценить сложную многоуровневую морфологию дефекта (рис. 13).

«Серая полоса» — это единственный из всех исследованных дефектов, в котором обнаружены исключительно включения карбида кремния. На основании микрорентгеноспектрального анализа абразивного материала, применявшегося для шлифовки валков горячей прокатки, можно утверждать, что именно карбид кремния из абразива вкатывается в поверхность листа и вызывает образование дефекта «серая полоса» (рис. 14).

Небольшое количество частиц карбида кремния могут попадать на поверхность листа при горячей про-

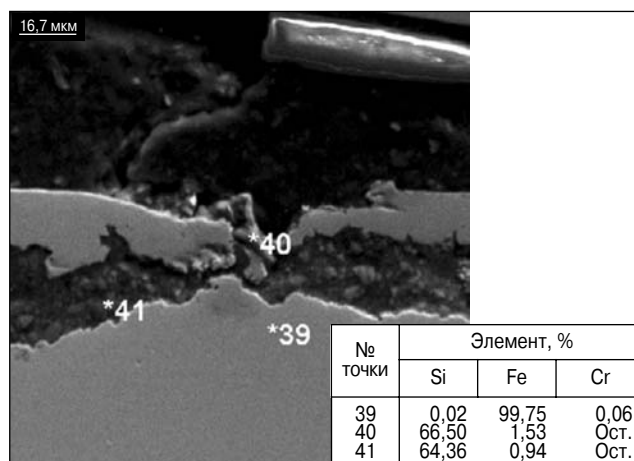


Рис. 14. Результаты микрорентгеноспектрального анализа дефекта «серая полоса»

катке с поверхности рабочих валков. Установлено, что эти частицы имеются в поверхностном слое вала непосредственно после его шлифовки и отсутствуют после его кампании перед следующей шлифовкой. Известно также, что при нештатной работе очистных сооружений ступки шлама могут попадать в систему водоснабжения [7, 11, 12]. Поэтому основным источником карбида кремния в рассматриваемых дефектах является шлам, поступающий из оборотной воды, используемой для сбива окалины с поверхности листа и охлаждения валков. Идентичность состава включений из шлама (Si = 63,52 %, C = ост.) и частиц, обнаруженных в дефекте (Si = 64,36 %, C = ост.), было подтверждено микрорентгеноспектральными исследованиями. Эти частицы попадают на поверхность листа на этапе горячей прокатки, поэтому закатываются в поверхность на различную глубину без значительных повреждений. При холодной прокатке металл, не имеющий прочной адгезионной связи с инородными частицами абразива, обтекает их, раскрывая дефект в виде обширных полостей, заполненных не только этими частицами, но и стружкой, не отличающейся по составу от основного металла, нарезанной острыми кромками карбида кремния при образовании полостей в процессе холодной прокатки (см. рис. 13, 14).

\* \* \*

Таким образом, на основании проведенных исследований можно утверждать, что исследованные в данной работе поверхностные дефекты холоднокатаного листа не связаны с неметаллическими включениями, наследованными от сталеплавильного производства, а обусловлены нарушениями технологии горячей и холодной прокатки. Чтобы исключить образование «белой полосы без надрыва» следует избегать механических повреждений поверхности листа при горячей прокатке, в том числе абразивными

частицами из оборотной воды. Для предотвращения образования дефекта «серая полоса» необходимо тщательно очищать оборотную воду, используемую для сбива окалины и охлаждения рабочих валков при горячей прокатке, от абразивных частиц. Для устранения «белой полосы с надрывом» должна быть устранена вибрация стана или его валков.

#### Библиографический список

1. *Беняковский М. А.* Дефекты поверхности автомобильного листа (альбом). 2-е изд. — М.: Металлургия, 1974. — 72 с.
2. *Новокищенко С. М.* Дефекты стали. Справочник. — М.: Металлургия, 1984. — 199 с.
3. Catalog of surface defects on hot deep metal coated steel sheet. StahlEisen. Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Hauptabteilung Umformtechnik. — 1996. — 69 p.
4. Catalog of surface defects on hot rolled flat steel production. StahlEisen. Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Hauptabteilung Umformtechnik. — 1997. — 45 p.
5. Catalog of surface defects on cold rolled uncoated sheet, StahlEisen, Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Hauptabteilung Umformtechnik. — 1998. — 47 p.
6. Атлас дефектов стали. Пер. с нем. — М.: Металлургия, 1979. — 188 с.
7. *Беняковский М. А.* Качество поверхности автомобильного листа. — М.: Металлургия, 1969. — 152 с.
8. *Суяров Д. И., Беняковский М. А.* Качество тонких стальных листов. — М.: Металлургия, 1964. — 175 с.
9. *Ксензук Ф. А., Троценков Н. А., Чекмарев А. П., Сафьян М. М.* Прокатка автолистовой стали. — М.: Металлургия, 1969. — 296 с.
10. *Гриднев В. Н., Гаврилюк В. Г., Мешков Ю. Я.* Прочность и пластичность холоднодеформированной стали. Академия наук Украинской ССР. Институт металлофизики. — Киев: Наукова думка, 1974. — 232 с.
11. *Шефтель Н. И.* Технология производства проката. — М.: Металлургия, 1976. — 576 с.
12. *Шефтель Н. И.* Холодная прокатка листовой стали. — М.: Металлургия, 1966. — 324 с.

УДК 621.771.23.019:669.14.256

## НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ И ПРИРОДА ДЕФЕКТОВ ХОЛОДНОКАТАНОГО ЛИСТА

### Часть 3. ТРУДНОРАСПОЗНАВАЕМЫЕ ДЕФЕКТЫ

*А. А. КАЗАКОВ, П. В. КОВАЛЕВ, Е. И. КАЗАКОВА,  
С. Д. ЗИНЧЕНКО, А. Л. МЯСНИКОВ, П. Б. ГОРЕЛИК\**

В данной статье рассмотрены поверхностные дефекты холоднокатаного листа, которые относят к группе, условно названной «труднораспознаваемые дефекты». Часто появление дефектов такого рода связывают с неметаллическими включениями, хотя, как будет показано ниже, они имеют совершенно определенные металлографические признаки, позволяющие сделать однозначное заключение об их сталеплавильной или прокатной природе.

В работе исследовали образцы горяче- и холоднокатаного листа из сталей марок 08Ю, 08ПС, 01ЮТ,

ДС03, ДС05. Металлографический и микрорентгеноспектральный анализ исследованных образцов проводился по методике, подробно описанной в предыдущих статьях.

**Дефект «выкрошка».** Одним из наиболее грубых дефектов холоднокатаного листа является «выкрошка». Как будет показано далее, большая часть дефектов, внешне похожих на «выкрошку», имеют прокатное происхождение и называются «вкаты», «вдавы», «раскаты надрывов». Достаточно редко встречаемый дефект «выкрошка», имеющий сталеплавильную природу. Этот дефект представляет собой местные углубления, раковины и ямки на поверхности листа, размер которых может достигать 5 мм в диаметре (**рис. 1**).

\*А. А. Казаков, П. В. Ковалев, Е. И. Казакова, С. Д. Зинченко, А. Л. Мясников, П. Б. Горелик, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ОАО «Северсталь».