

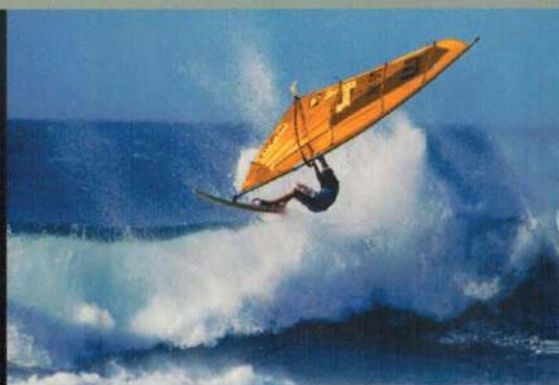
ISSN 0038 - 920X

СТАЛЬ

1931 75 ЛЕТ 2006



Укрощая стихию



Надежность
Качество
Стабильность

Мы открываем мир огнеупоров



Москва • ООО "Интермет Инжиниринг"

УДК 621.771.23.019:669.14.256

Неметаллические включения и природа некоторых дефектов холоднокатаного листа

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

Для повышения качества стали и совершенствования технологии ее производства важно знать природу дефектов, возникающих по ходу передела. При экспертизе дефектов, выявляемых на любом из этапов металлургического передела, обычно полагают однозначным признаком сталеплавильной природы дефекта обнаружение непосредственно около него или в прилегающей зоне неметаллических включений. Это суждение может быть правильным, если речь идет о таком дефекте, как "плена", но совсем не очевидным в случае других дефектов, проявляющихся на этапе прокатного производства [1–7]. В настоящей работе сделана попытка показать, как путем комплексного металлографического исследования с привлечением микрорентгеноспектрального анализа обосновать суждение о природе некоторых выявляемых на этапе прокатного производства дефектов холоднокатаного листа из стали для глубокой вытяжки.

В работе изучали образцы холоднокатаных листов из сталей 08Ю, 08пс, 01ЮТ, ДС03 и ДС05, а также состояние поверхности рабочих прокатных валков и используемые для их зачистки абразивные материалы и получаемые шламы.

С целью выявления морфологии и характера расположения поверхностных дефектов была разработана специальная методика подготовки шлифов с применением оборудования для пробоподготовки фирмы "Buehler". Для бездеформационной резки образца листа вдоль дефекта применяли высокоскоростной прецизионный отрезной станок Isomet 400. Неповрежденные срезы дефекта заформовывали в цилиндрические заготовки горячим прессованием на прессе Simplimet 1000 или холодной заливкой в формы с использованием материалов Varidur 10, Varidur 3000 или EPO-Kwick. Высокое качество поверхности шлифов достигалось путем многоступенчатой шлифовки и полировки на приборе Phoenix 4000 или Metaserv-оригинальными алмазными пастами и коллоидальными полировальными суспензиями фирмы "Buehler".

Для микрорентгеноспектрального анализа состава неметаллических включений применяли микроскоп REM ABT-55 (Akashi), оснащенный микрозондом Link AN 10000/85S (GB), и микроскоп CamScan MV2300D

SEM. Определен состав более 100 различных неметаллических включений, обнаруженных в образцах. Для металлографических исследований применяли анализатор изображения "Thixomet", который позволяет изготавливать сколь угодно большие по площади панорамы изображений с высоким разрешением. Панорамные исследования стали основой для правильной идентификации неметаллических включений, а также для оценки их роли в образовании и развитии дефектов листа.

В результате металлографического и микрорентгеноспектрального анализа созданы базы данных изображений неметаллических включений, послуживших причиной образования дефектов, а также панорамные изображения самих дефектов листа, иллюстрирующие их морфологическое разнообразие. Все исследованные в работе дефекты можно объединить по природе их образования в три группы: "белая полоса без надрыва", "белая полоса с надрывом" и "серая полоса". Названия эти условные, так как, например, дефект "белая полоса без надрыва" не имеет видимых макронадрывов, но его сопровождает множество микронадрывов, выявляемых при изучении поверхности методами электронной микроскопии.

Дефект "белая полоса без надрыва". Этот дефект относится к наиболее распространенным и часто встречающимся дефектам холоднокатаного листа и представляет собой тонкую сплошную полосу шириной от 1 до 2 мм и длиной более 30 см, ориентированную вдоль направления прокатки (рис. 1). В зависимости от характера освещенности и угла зрения цвет полосы меняется от блестящего металлического до матового светло-серого. Дефект часто трудноразличим на фоне основного металла.

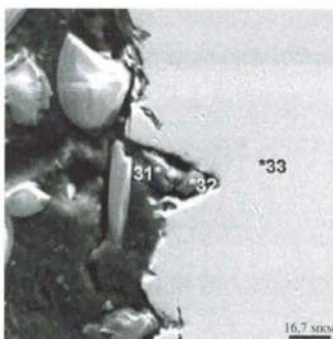
Металлографическое исследование образцов, пораженных дефектом, показало его значительное морфологическое разнообразие: от небольших изъянов до грубых повреждений с расслоениями на поверхности листа. В полостях дефектов обнаружены металлические частицы, выкрошившиеся с поверхности валков, или карбиды кремния. На рис. 2 показан пример дефектной области, где видны лишь незначительные нарушения рельефа поверхности в виде микроскопических отслоений металла и ямок размером от 5 до 10 мкм.



Рис. 1. Внешний вид дефекта "белая полоса без надрыва"



Рис. 2. Незначительные нарушения поверхности дефекта "белая полоса без надрыва" (x500)



б

а

Точка	Si, %	Fe, %	C, %
31	62,58	0,84	Ост.
32	63,11	0,53	»
33	0,02	99,72	0,08

Рис. 3. Дефект "белая полоса без надрыва" с включениями карбида кремния: а — включения карбида кремния на поверхности дефекта (x500); б — результаты микрорентгеноспектрального анализа дефектной зоны

Пример поверхности дефекта с включениями карбида кремния размером до 5 мкм, как расположенными на поверхности металла, так и вдавленными на глубину до 15 мкм, приведен на рис. 3, а пример грубого повреждения поверхности, в котором между основным металлом и поверхностным слоем найдены металлические частицы, содержащие до 0,9 % хрома, — на рис. 4. Повышенные концентрации хрома могут служить признаком инородного металла, частица которого была закатана в полость дефекта, в частности с деградирующей поверхности валков.

Несмотря на такое разнообразие поверхности дефекта "белая полоса без надрыва", практически на всех образцах, пораженных им, удалось обнаружить мельчайшие строчечные скопления оксидных включений, вытянутых вдоль границ зерен и расположенных на глубине до 10–15 мкм вдоль поверхности листа (рис. 5). Эти внутренние окисленные границы настолько тонки, что на оптическом микроскопе выявляются только после травления при использовании специальных приемов формирования изображения с увеличением 1000. Сложность наблюдения состоит в том, что дефект расположен в очень тонкой приповерхностной зоне, где, несмотря на прецизионную шлифподготовку, невозможно получить четкого изображения по всей его глубине. Поэтому с помощью анализатора изображения "Thixomet" провели реконструкцию поверхностного слоя последовательной вертикальной склейкой частично расфокусированных изображений, так что вся кром-

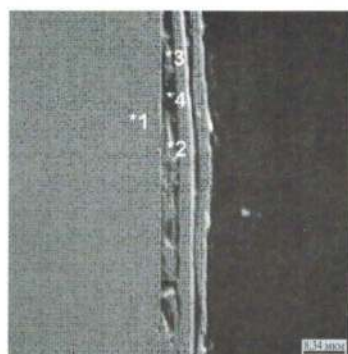


Рис. 4. Результаты микрорентгеноспектрального анализа дефекта "белая полоса без надрыва"

Точка	Si, %	Cr, %	Fe, %	C, %
1	0,09	0,02	99,75	—
2	0,31	0,89	98,52	Ост.
3	0,58	0,65	92,66	»
4	1,22	0,38	85,85	»



Рис. 5. Скопления оксидных включений в дефекте "белая полоса без надрыва" (x500)



Рис. 6. Микроструктура дефекта "белая полоса без надрыва"; образец после травления; панорама создана вертикальной склейкой расфокусированных изображений (x1000)

ка образца с окисленными границами зерен оказалась в фокусе (рис. 6).

Исследования на электронном микроскопе отличаются большей глубиной резкости, чем на оптическом микроскопе, поэтому на поверхности дефекта прекрасно видны сотовая структура, образованная окисленными границами зерен, а также большое количество микронадрывов вдоль окисленных границ зерен (рис. 7). Действительно, окисленные границы плохо деформируются, и при холодной прокатке на поверхности листа образуются локальные микронадрывы.

Образование оксидов вдоль границ зерен по механизму внутреннего окисления могло быть спровоцировано при горячей прокатке механическими повреждениями поверхности листа. Такие микроповреждения могли быть нанесены как собственно поверхностью поврежденных валков, так и выкрошившимися с их поверхности металлическими частицами. Частицы карбида кремния из шлама в оборотной воде, подаваемой под высоким давлением на поверхность металла для удаления окалины, также могли нанести механические повреждения поверхности листа. Как было показано, частицы карбида кремния и металлические



Рис. 7. Фрагмент поверхности дефекта “белая полоса без надрыва”; электронный микроскоп (×200)



Рис. 8. Внешний вид дефекта “серая полоса”



Рис. 9. Панорамное изображение дефекта “серая полоса” (×500)

частицы, близкие по составу к материалу валков, были обнаружены в теле дефекта. Поврежденные области листа, обладая развитой поверхностью, подвержены внутреннему окислению, поэтому в таких приповерхностных слоях металла наблюдаются окисленные границы зерен, вытянутых вдоль линий прокатки [8 – 10]. По числу таких окисленных слоев, закатанных при горячей прокатке, можно судить о количестве проходов металла через валки, наносящие механические повреждения. Как следует из рис. 6, для данного дефекта насчитывается до 12 таких проходов. При последующей холодной прокатке тонкий приповерхностный слой, представляющий собой, по сути, хрупкий слоистый композит, деформируется с образованием множества микронадрывов. Несмотря на рекристаллизационный отжиг холоднокатаного металла, приповерхностные зерна, жестко закрепленные окисленными границами, остаются нерекристаллизованными, тогда как в основном объеме здорового металла процессы рекристаллизации прошли полно с образованием крупных зерен (см. рис. 6).

Дефект “серая полоса”. Внешне этот дефект очень похож на дефект “белая полоса без надрыва”, так как при наблюдении под определенным углом зрения полоса светлеет и становится трудноотличимой 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. 8).

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. 9).

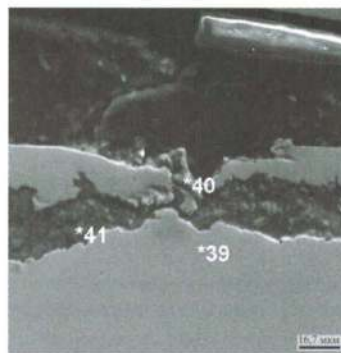


Рис. 10. Результаты микрорентгеноспектрального анализа дефекта “серая полоса”

Точка	Si, %	Fe, %	C, %
39	0,02	99,75	0,06
40	66,50	1,53	Ост.
41	64,36	0,94	»

“Серая полоса” — 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. 10).

В небольшом количестве частицы карбида кремния могут попадать на поверхность листа при горячей прокатке с поверхности рабочих валков. Установлено, что эти частицы имеются в поверхностном слое валка непосредственно после его шлифовки и отсутствуют после его кампании перед следующей шлифовкой. Известно также, что при нештатной работе очистных сооружений сгустки шлама могут попадать в систему водоснабжения [7, 11, 12]. Поэтому основным источником карбида кремния в рассматриваемых дефектах следует признать шлам, поступающий из оборотной воды, которая используется для удаления окалины с поверхности листа и для охлаждения валков. Идентичность состава включений из шлама (63,52 % Si; остальное — углерод) и частиц, обнаруженных в дефекте (64,36 % Si; остальное — углерод), была подтверждена микрорентгеноспектральными исследованиями. Эти частицы на этапе горячей прокатки попадают на поверхность листа и закатываются 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 микростружкой, не отличающейся по составу от основного металла и нарезанной острыми кромками карбида кремния при образовании полостей в ходе деформации (см. рис. 9 и 10).

Дефект “белая полоса с надрывом”. Данный тип дефекта внешне очень похож на дефект “белая полоса без надрыва”, но в отличие от него здесь вдоль светлой сплошной полосы, ориентированной в направлении прокатки, хорошо различимы серпообразные надрывы, пе-



Рис. 11. Внешний вид дефекта "белая полоса с надрывом"



Рис. 12. Панорамное изображение дефекта "белая полоса с надрывом" с незначительными поверхностными надрывами ($\times 500$)



Рис. 13. Панорамное изображение дефекта "белая полоса с надрывом" с глубокими клинообразными надрывами ($\times 500$)

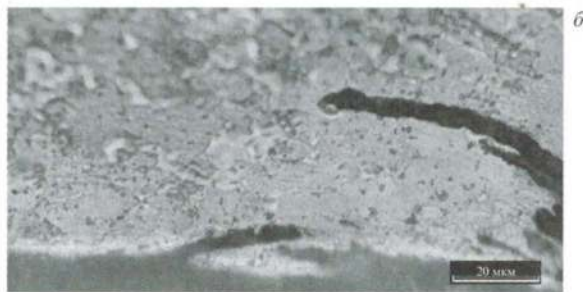


Рис. 14. Микроструктура дефекта "белая полоса с надрывом"; образец после травления (а — $\times 200$; б — $\times 1000$)

риодически расположенные на примерно одинаковом расстоянии один от другого. Надрывы могут достигать 5 мм в ширину и часто распространяются почти на всю длину дефекта (рис. 11).

Морфология "белой полосы с надрывом" весьма разнообразна. Встречаются как незначительные поверхностные (рис. 12), так и глубокие клинообразные надрывы поверхности листа, представляющие собой транскристаллитные трещины и расположенные под углом 45° относительно направления прокатки (рис. 13). Глубина транскристаллитных трещин может достигать 200 мкм и более.

Загрязнения, забившие полости надрывов при исследованиях поверхности таких дефектов на плоскостных шлифах, идентифицируют в ряде отечественных и зарубежных классификаторов как "цепочки неметаллических включений" и на этом основании дефект от-

носят к разряду сталеплавильных. Исследования, проведенные в настоящей работе методами оптической металлографии и микрорентгеноспектрального анализа, показали отсутствие каких-либо неметаллических включений как в самом дефекте, так и в непосредственной близости к нему. Поэтому источник этого дефекта следует искать в особенностях деформации стали в окрестности дефектной области.

Обращают на себя внимание значительная разнотекстурность металла в зоне повреждения и синусоидальный характер его течения в приповерхностных областях с образованием транскристаллитных надрывов под углом 45° в тех местах, где синусоида течения металла выходит на поверхность листа (рис. 14). Линия надрыва отделяет зону основного здорового металла с крупным рекристаллизованным зерном от труднодеформируемой приповерхностной зоны, где процессы рекристаллизации не завершены. В этой зоне видны лишь зародыши новых зерен (рис. 14, б). Для детализации природы дефекта необходимы дополнительные исследования, но столь упорядоченное синусоидальное течение металла в тонком поверхностном слое позволяет совершенно определенно отнести его к дефектам прокатного производства. Причиной такой неравномерной деформации может быть вибрация стана горячей прокатки или его валков, а также рассогласование скорости валков при холодной прокатке.

Таким образом, на основании проведенных исследований уточнен классификатор дефектов холоднокатаного листа, что позволяет более объективно оценивать природу дефектов и соответственно на каждом переделе планировать и принимать меры, направленные на устранение причин дефектов.

Библиографический список

1. **Беняковский М. А.** Дефекты поверхности автомобильного листа (альбом): 2-е изд. — М.: Металлургия, 1974. — 72 с.
2. **Новокшенова С. М.** // Дефекты стали: Справочник. — М.: Металлургия, 1984. — 199 с.
3. Catalog of surface defects on hot deep metal coated steel sheets. 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 on surface defects on cold rolled uncoated sheets, StahlEisen. Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Hauptabteilung Umformtechnik, 1998. — 47 p.
6. Атлас дефектов стали; пер. с нем. Е. Я. Капуткина; под ред. М. Л. Бернштейна. — М.: Металлургия, 1979. — 188 с.
7. **Беняковский М. А.** Качество поверхности автомобильного листа. — М.: Металлургия, 1969. — 152 с.
8. **Гриднев В. Н., Гаврилюк В. Г., Мешков Ю. Я.** Прочность и пластичность холоднодеформированной стали / Институт металлофизики АН УССР. — Киев: Наукова думка, 1974. — 232 с.
9. **Шефтель Н. И.** // Технология производства проката. — М.: Металлургия, 1976. — 576 с.
10. **Шефтель Н. И.** // Холодная прокатка листовой стали. — М.: Металлургия, 1966. — 324 с.
11. **Робертс В. Л.** // Холодная прокатка стали. Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1982. — 544 с.
12. **Васильев Я. Д.** // Производство полосовой и листовой стали. — Киев: Вища школа, 1975. — 192 с.