

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».

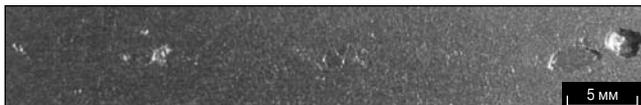
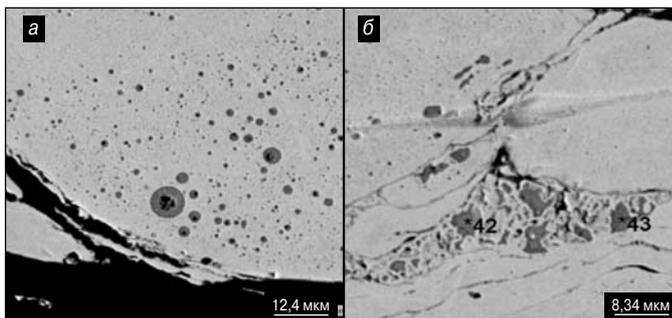


Рис. 1. Внешний вид дефекта «выкрошка»

На рис. 2 представлены результаты микрорентгеноспектрального анализа дефекта «выкрошка». Размер сателлитных (четвертичных) включений, выросших в твердом металле на эндогенных включениях — продуктах раскисления в условиях высокотемпературного контакта металла с переокисленным шлаком или окалиной, по мере удаления от поверхности контакта с источником кислорода закономерно уменьшается (см. рис. 2, а). Наряду с диффузионным способом доставки кислорода к сателлитным включениям по телу первичного зерна, кислород доставлялся в глубь дефекта и по поврежденным границам зерен. На рис. 2, б показаны продукты распада вюстита вдоль поврежденных границ зерен. Эти продукты образовались на месте «кислородных коридоров», по которым за счет капиллярных сил вюстит проникнул в глубь дефекта.



№ точки	Элемент, %			
	Al	Fe	Mn	O, C
42	—	79,0	4,6	Ост.
43	0,3	75,5	4,0	Ост.

Рис. 2. Результаты микрорентгеноспектрального анализа дефекта «выкрошка»

Сателлитные включения были обнаружены и при исследовании дефектных образцов горячекатаного подката. Исследовали также дефект, наследованный от горячих трещин сляба. Веерообразный характер распределения сателлитных включений полностью соответствовал неравномерному течению металла при горячей деформации с учетом формы горячей трещины, заполненной окалиной (рис. 3). При последующей холодной деформации такого листа, локальные приповерхностные участки, содержащие недеформируемые сателлитные включения, будут отделены от основного металла, образуя дефект «выкрошка».

Далее будут рассмотрены дефекты, относящиеся к «поперечным надрывам», а также «вкаты» и механические повреждения поверхности листа.



Рис. 3. Сателлитные включения в дефектных образцах горячекатаного подката (×500)

Дефект «светлая полоса с надрывами». Данный дефект представляет собой раскат поперечных надрывов на поверхности металла (рис. 4). Как правило, дефект не отделен от основного металла сплошной границей по всему периметру, а его глубина может достигать 0,07–0,6 мм (см. рис. 4, а). Развитие этого дефекта может привести к образованию раковин и впадин на поверхности листа (см. рис. 4, б). Такие дефекты располагаются одиночно или группами. Микроструктура в районе дефекта отличается значительной неоднородностью: наряду с крупными вытянутыми вдоль линии надрыва зернами основного металла имеются равноосные мелкие зерна в теле самого дефекта (см. рис. 4, в).

Данный тип дефекта возникает при механическом повреждении поверхности горячекатаного подката при его последующей деформации [1, 3, 7–9]. Например, причиной образования дефекта может стать царапина, которая уменьшает абсолютное обжатие полосы на величину, равную ее глубине, тогда как по обе стороны от нее сохраняется обжатие, соответствующее номинальной толщине полосы. В процессе деформации полосы сообразно с общей вытяжкой, происходит надрыв металла под царапиной. Обычно надрывы имеют весьма характерный вид, указывающий на периодичность явления: после очередного надрыва неравномерность вытяжки устраняется, а затем развивается вновь.

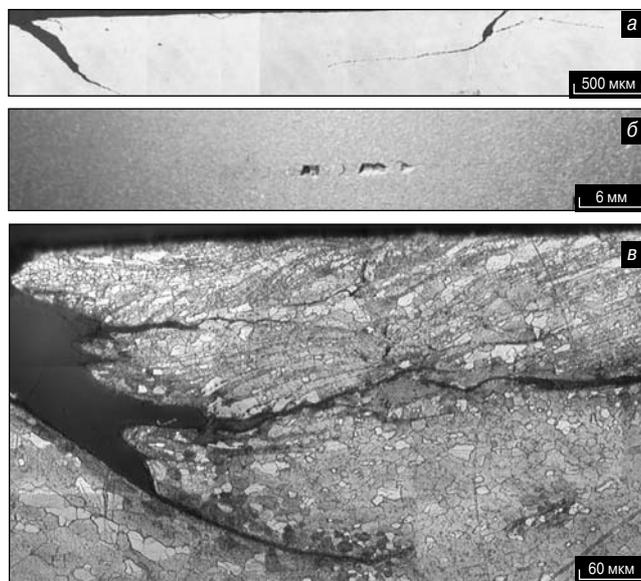


Рис. 4. Панорамное изображение (а), внешний вид (б) и микроструктура (в) дефекта «светлая полоса с надрывами»

Как только накопившаяся пластическая деформация превысит предел прочности стали, наступает очередной надрыв [2, 4–7]. В процессе образования надрывов возможно отслаивание и отрыв частиц металла, которые тут же вкатываются в поверхность полосы, образуя дефект «вкат».

Надрывы по границам зерен, декорированных карбидной сеткой, возникают в результате появления отдельных выделений структурно-свободного цемента и цементитной сетки по границам ферритных зерен. Внешний вид и панорамное изображение микроструктуры такого дефекта показаны на рис. 5. Некоторые карбиды могут образоваться гетерогенно на подложках из мелкодисперсных оксидов системы $FeO-Al_2O_3-SiO_2-MnO$, однако число таких карбидов невелико. Основная масса карбидов образуется по гомогенному механизму вдоль границ зерен. Причем размер таких отдельных выделений структурно-свободного цемента достигает 4–5 баллов ряда А по ГОСТ 5640–68. Результаты микрорентгеноспектрального анализа структуры холоднокатаного листа (см. рис. 5, в) приведены в таблице.

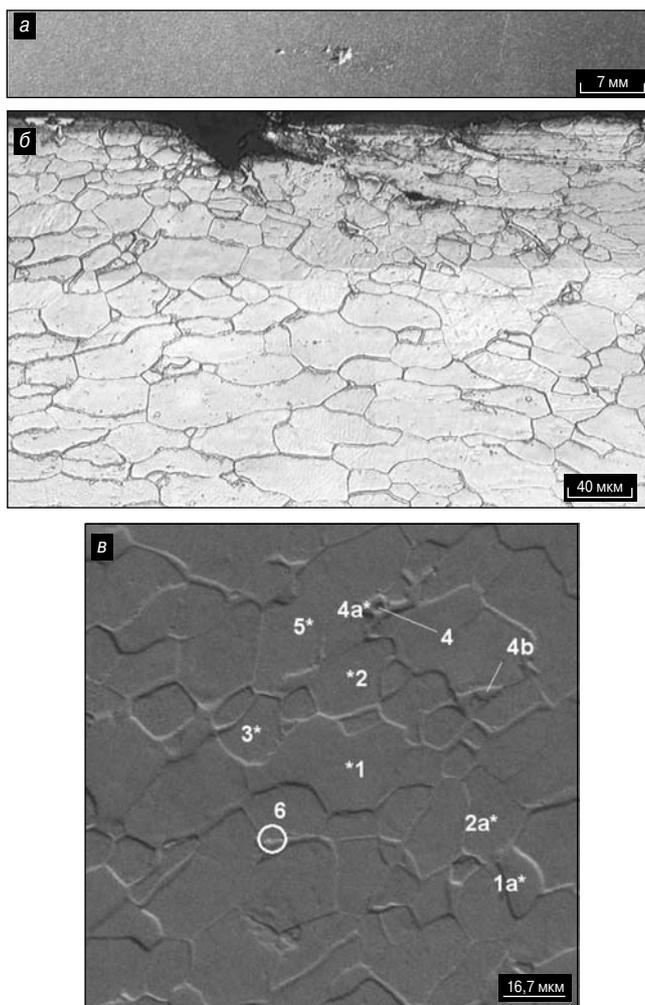


Рис. 5. Внешний вид (а), панорамное изображение (б) надрывов, образовавшихся из-за карбидных выделений по границам зерен, и структура холоднокатаного листа (в)

Содержание элементов в структуре холоднокатаного листа

№ точки	Элементы, %					
	Al	Fe	Mn	Si	Cr	O, C
1	0	99,68	0	0	0	Ост.
1a	0	99,39	0	0,19	0	Ост.
2	0	99,55	0	0,21	0,12	Ост.
2a	0	99,84	0	0,12	0	Ост.
3	0	99,77	0	0,24	0	Ост.
4	0,24	90,61	0,15	2,95	0	Ост.
4a	0	90,22	0,25	0,85	0	Ост.
4b	0	92,65	0,15	0,17	0	Ост.

Образование карбидной сетки по границам ферритных зерен и выделение крупных включений структурно-свободного цемента связано с температурно-деформационными условиями конечных стадий горячей прокатки. При интенсивном охлаждении горячекатаной полосы температура превращения A_{g1} достигает $675^{\circ}C$. При такой температуре происходит эвтектоидное превращение аустенита в перлит. При медленном охлаждении полосы с температуры конца прокатки или смотки в рулон при температуре, близкой к точке A_{g1} , по границам ферритных зерен за счет диффузионного распада перлита образуются крупные включения структурно-свободного цемента. В этом случае при больших степенях обжатия при последующей холодной прокатке будет происходить дробление крупных выделений цемента на мелкие включения с образованием строчечной структуры, вытянутой в направлении прокатки. Однако после холодной прокатки с небольшой степенью деформации цементит сохраняет грубую морфологию и располагается после рекристаллизационного отжига преимущественно по границам зерен феррита [7–11]. Именно такая структура наблюдается в исследованных образцах. Наличие разноразмерной структуры холоднокатаной полосы, а также структуры с цементитом в виде крупных выделений по границам зерен феррита будет вызывать увеличение хрупкости стали и ухудшение пластических свойств, что, в свою очередь, приведет к снижению технологической деформируемости полосы [12–14].

Механическое повреждение поверхности листа (риски, отпечатки) представляет собой конусообразные углубления на поверхности листа, имеющие закругленное или плоское дно. Данный тип дефекта не сопровождается изменениями микроструктуры металла в районе дефекта. Размер таких углублений достигает 100 мкм, а их расположение на поверхности полосы — произвольное. Причиной такого дефекта могут быть повреждения поверхности полосы при ее транспортировке, смотке, а также обработке на правильных машинах и других отделочных агрегатах [2, 3, 7, 8].

Дефект «черные штрихи». Название дефекта «черные штрихи» весьма условно, так как в заводской практике один и тот же дефект в зависимости от его

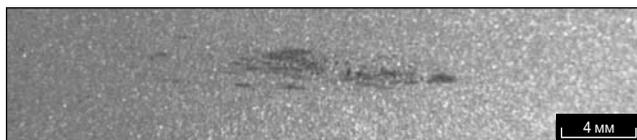


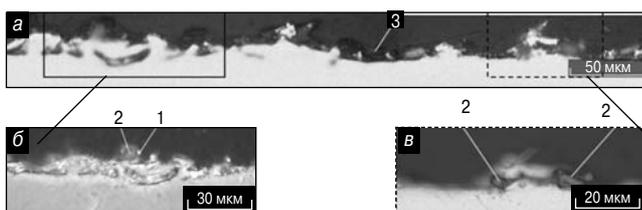
Рис. 6. Внешний вид дефекта «черные штрихи»

размеров может называться и «черные мазки», и «черные пятна». Внешний вид дефекта представляет собой черную полосу или пятнышко длиной не более 10 мм (рис. 6).

Чаще всего — это пятна сажи, эмульсии и масла, загрязненные окислами железа, продуктами износа валков и др. [7–10]. Иными словами, данный дефект, как правило, имеет прокатное происхождение. Однако иногда встречаются дефект «черные штрихи», корни которого находятся в сталеплавильном производстве.

Результаты металлографических исследований показали, что этот дефект имеет сложное многослойное строение, а результаты микрорентгеноспектральных исследований выявили содержание на поверхности дефекта остатков выгоревшей эмульсии, а также включений оксидов железа, карбидов и оксидов кремния. Последние два типа включений имелись не только на поверхности листа, но и в приповерхностных слоях, непосредственно примыкающих к дефекту (рис. 7).

Для адекватной оценки морфологии и состава поверхностного слоя в области дефекта использовали специальную методику приготовления шлифа не только с двухстадийной заливкой, но и шлифовкой без использования расходных материалов на основе карбида кремния. Предварительная заливка поверхности позволила зафиксировать состояние поверхности дефекта и исключить ее разрушение или искажение при последующей резке на высокоскоростной прецизионной пиле. Использование методики совмещенной шлифовки-полировки с помощью кругов BUEHLER-HERCULES и алмазных паст исключило возможность



Включение карбида кремния в оболочке SiO₂ (поляризованный свет)

№ точки	Элементы, %		
	Si	O	C
1	35,00	Ост.	–
2	60,34	–	Ост.
3	–	–	100

Рис. 7. Панорамное изображение (а) и результаты микрорентгеноспектрального анализа дефекта «черные штрихи» (× 500) (б)

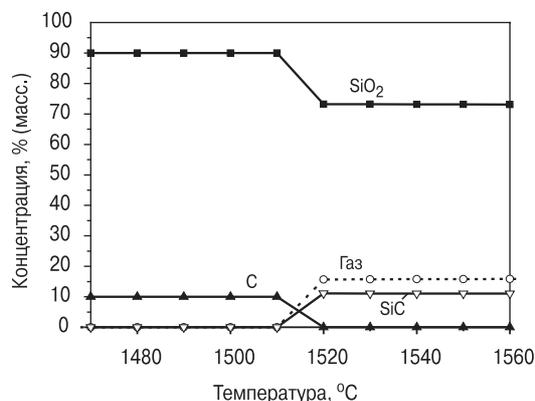


Рис. 8. Результаты термодинамического расчета равновесия в системе C—SiO₂

попадания в дефектную область карбидов кремния из расходных материалов шлифподготовки. Такой способ препарирования позволил исследовать приповерхностный слой, не нарушая его целостности, а также правильно определить состав включений, которые послужили причиной образования дефекта.

При исследовании образцов в поляризованном свете в углублениях и на поверхности были обнаружены включения карбида кремния в оболочке SiO₂ (см. рис. 7, б). В несплошностях рельефа видны темные участки, обогащенные углеродом, которые представляют собой остатки плохо удаленной выгоревшей эмульсии, используемой в процессе холодной прокатки (см. рис. 7, а).

Для выявления причин образования этого дефекта были исследованы технологические параметры соответствующих плавок. Анализ полученных данных показал, что в пяти из восьми исследованных плавок, пораженных этим дефектом, использовался погружной стакан из кварца, а в остальных плавках, как и в некоторых плавках первой группы, отмечено введение в сталеразливочный ковш карбида кремния в количестве от 77 до 202 кг. Таким образом, в семи из восьми исследованных плавок жидкая сталь существовала с кремнеземом или карбидом кремния, что могло быть одним из источников присутствия SiC или SiO₂ в дефекте «черные штрихи». Присутствие карбида кремния в дефекте «черные штрихи» может быть связано с реакцией взаимодействия углерода коксика, входящего в состав шлакообразующих смесей, с кварцем погружного стакана.

Термодинамическое моделирование процессов взаимодействия в этой системе было проведено с использованием оригинального программного обеспечения ChemX и баз термодинамических данных SGTE [15]. Изучали влияние температуры выдержки на равновесие в системе, состоящей из 10 % C и 90 % SiO₂. Результаты моделирования показали, что, начиная с 1510 °C и выше, кварц взаимодействует с углеродом с образованием карбида кремния (рис. 8).

Принимая во внимание температуру разливки стали, равную 1550–1580 °С, можно заключить, что шлак может иметь температуру, при которой идет взаимодействие кремнезема с углеродом. Таким образом, в реальных условиях разливки взаимодействие углерода шлакообразующей смеси с кварцем погружного стакана является достаточно вероятным. Более того, далее карбид кремния, обладая высокой адгезией к жидкой стали может переходить из шлака на границу с металлом. Химически неустойчивый в стали карбид кремния вновь будет взаимодействовать с кислородом, растворенным в стали, с образованием оксида кремния и монооксида углерода. Неметаллическое включение, обнаруженное на поверхности дефекта (см. рис. 7, б) имело сердцевину из SiC, окруженную оболочкой из SiO₂. Эрозия кварцевого стакана была настолько значительной, что ее увидели невооруженным глазом по утонению стенок трубы после разливки плавки. В связи с этим вместо кварцевых следует использовать корундо-графитовые стаканы, что позволит минимизировать взаимодействие поверхности стакана со стальным расплавом.

Таким образом, анализ исследованных образцов позволил создать базу данных изображений неметаллических включений, послуживших причиной образования дефектов, а также панорамные изображения самих дефектов холоднокатаной полосы. На основании проведенных исследований уточнен классификатор дефектов холоднокатаного листа, что позволило производить более объективную оценку природы дефектов и, соответственно, на каждом переделе планировать и внедрять мероприятия, направленные на устранение причин дефектов. Знания причин образования дефектов может послужить основой для совершенствования технологии получения холоднокатаной полосы на всех этапах производства, а также разработки системы управления качеством металлопродукции.

Библиографический список

1. Дефекты стали. Справ. изд. / Под ред. Новошченовой С. М., Виноград М. И. — М.: Металлургия, 1984. — 199 с.
2. Дедек Вл. Полосовая сталь для глубокой вытяжки. Пер. с чешск. — М.: Металлургия, 1970. — 208 с.
3. Беньковский М. А. Качество поверхности автомобильного листа. — М.: Металлургия, 1969. — 152 с.
4. Гаврилин Е. Ф. Контроль дефектов проката. — М.: Металлургия, 1991. — 112 с.
5. Рыбарж А. А. Материалы для глубокой штамповки. — М.: Машгиз, 1959. — 192 с.
6. Баранов А. А., Минаев А. А., Геллер А. Л. Проблемы совмещения горячей деформации и термической обработки стали. — М.: Металлургия, 1985. — 128 с.
7. Мазур В. Л., Добронравов А. И., Чернов П. П. Предупреждение дефектов листового проката. — Киев: Техника, 1986. — 141 с.
8. Мазур В. Л. Повышение качества листового проката. — Киев: Техника, 1979. — 156 с.
9. Мазур В. Л. Производство листа с высококачественной поверхностью. — Киев: Техника, 1982. — 143 с.
10. Мазур В. Л., Сафьян А. М., Приходько И. Ю. Управление качеством тонколистового проката. — Киев: Техника, 1997. — 384 с.
11. Робертс В. Л. Холодная прокатка стали. Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1982. — 544 с.
12. Васильев Я. Д., Сафьян М. М. Производство полосовой и листовой стали. — Киев: Издательское объединение «Вища школа», 1975. — 192 с.
13. Шефтель Н. И. Технология производства проката. — М.: Металлургия, 1976. — 576 с.
14. Рокотян С. Е. Теория прокатки и качество металла. — М.: Металлургия, 1981. — 224 с.
15. Ericsson G. and Hack K. Met. Trans. B. 1990. V. 21B. — P. 1013–1023.

