

## ПРИРОДА ДЕФЕКТОВ ГОРЯЧЕКАТАНОГО ЛИСТА ИЗ ТРУБНЫХ МАРОК СТАЛИ

### Часть 1. ДЕФЕКТЫ, ИМЕЮЩИЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНУЮ ПРИРОДУ

А. А. КАЗАКОВ, П. В. КОВАЛЕВ, С. Д. ЗИНЧЕНКО, А. В. НЕМТИНОВ,  
А. Б. ЛЯТИН, А. А. ДРОБИНИН\*

*В статье приведены результаты исследований термодинамики и кинетики взаимодействия азота с расплавами железа, испарения расплавов железа в вакууме, диффузии азота и кислорода в жидком железе, механизма поведения азота при окислительной плавке, испарения цинкового покрытия с оцинкованного стального лома, фильтрования стали от неметаллических включений и разработки в области высокоазотистых сталей. Ряд результатов, например константа скорости поверхностной реакции адсорбции — диссоциации азота, избыточный химический потенциал азота в газовой фазе при плавке в окислительной газовой среде, получены впервые. По результатам исследований разработаны технологии производства чистой стали.*

Непрерывно возрастающие требования, предъявляемые к сталям для производства труб, используемых в нефтегазовой промышленности, являются постоянным стимулом повышения их качества. Одним из важных показателей качества этих сталей, наряду с механическими свойствами, является качество поверхности. Как известно, формирование поверхности металла происходит на всех стадиях металлургического передела. В связи с этим качество поверхности готовой продукции закладывается на всех этапах производства горячекатаного листа: при выплавке и внепечной обработке стали, непрерывной разливке и последующем нагреве слябов под прокатку, а также при горячей прокатке [1–5].

Анализ литературы и опыта ведущих металлургических предприятий показал, что ряд дефектов поверхности (например, «плена» или «рванина») могут иметь как сталеплавильную, так и прокатную природу образования [4, 6, 7]. Кроме того, по внешнему виду практически невозможно отличить «раскатанную трещину» от «заката» или «рванину» деформационную от слиточной. Для однозначного определения природы того или иного дефекта необходимо установить критерии, по которым можно было бы провести их идентификацию. Такими критериями могут быть наряду с внешним видом дефекта его микроструктурные признаки, выявленные с использованием современных инструментов исследований. В связи с этим была разработана методика металлур-

гической экспертизы дефектов горячекатаного листа, которая позволила не только произвести объективное разделение брака между сталеплавильным и прокатным производствами, но и послужила основой для совершенствования соответствующих технологий.

Оригинальность этой методики состоит в комплексном подходе, основанном на панорамных металлографических исследованиях дефектных областей металла с использованием анализатора изображения Thixomet на микрорентгеноспектральном анализе состава неметаллических включений, обнаруженных в окрестности дефекта, и их интерпретации на основе термодинамического моделирования процессов фазообразования, протекающих в жидкой и затвердевающей стали, а также на анализе сквозной технологии производства [8].

Для исследования дефектов была разработана методика подготовки шлифов с использованием современного оборудования для пробоподготовки фирмы Bühler. Образцы вырезались из дефектных образцов горячекатаного листа с применением высокоскоростного прецизионного отрезного станка ISOMET 4000, а затем заформовывались в акриловые полупрозрачные смолы методом холодной заливки. Высокое качество поверхности шлифов достигалось за счет многоступенчатой шлифовальной и полировальной обработки на приборе PHOENIX 4000 с использованием оригинальных алмазных паст и коллоидальных полировальных суспензий фирмы Bühler.

Металлографические и микрорентгеноспектральные исследования выполняли на продольных и поперечных шлифах, приготовленных из дефектных

\* А. А. Казаков, П. В. Ковалев, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет; С. Д. Зинченко, А. В. Немтинов, А. Б. Лятин, А. А. Дробинин, ОАО «Северсталь», Россия.

образцов горячекатаного листа стали марки X70. Для выявления микроструктуры исследованных образцов травление проводили 3%-ным раствором  $HNO_3$  в спирте. Для металлографических исследований методами оптической металлографии использовали микроскопы Nikon Epihot, а также МЕТАМ ЛВ-32, оснащенные анализатором изображения Thixomet. Этот анализатор позволяет изготавливать новые большие панорамные изображения размером в несколько сотен полей зрения, склеенные «на лету» при перемещении предметного столика. При панорамных исследованиях можно изучать всю площадь макродефекта, но с разрешающей способностью, достаточной для анализа микроструктуры стали, включая неметаллические включения, декорирующие дефект.

С помощью микрорентгеноспектрального анализа на микроскопе REM ABT-55 (AKASHI), оснащенном микрозондом Link AN 10000/85S(GB), был определен состав более 100 различных неметаллических включений, ответственных за образование дефектов.

В работе исследовали образцы горячекатаного листа, пораженные следующими поверхностными и внутренними дефектами: «раскатанная трещина», «слиточная рванина», «плена», «закат» и «внутренние расслоения» [9]. До проведения данных исследований идентификация большинства дефектов проводилась только по внешнему виду, поэтому часто суждение о природе их образования было неверным, а значит, и разделение дефектов между сталеплавленным и прокатным переделами производилось необоснованно (таблица).

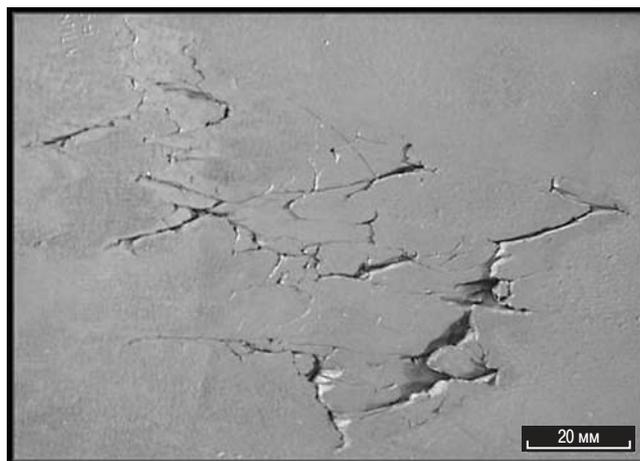


Рис. 1. Внешний вид дефекта «раскатанная трещина»

Ниже рассмотрены дефекты, причиной образования которых являются нарушения технологии, допущенные на этапе сталеплавленного передела.

**Дефект «раскатанная трещина».** До проведения работы данный дефект по внешним признакам был идентифицирован как «рванина» и отнесен к дефектам прокатного происхождения, однако детальные комплексные исследования, проведенные в данной работе, позволили доказать его сталеплавленную природу образования. Внешний вид дефекта представляет собой несплошность на поверхности листа в виде Y-образных надрывов, ориентированных вдоль направления прокатки (рис. 1). Дефект располагается, как правило, на расстоянии 20–40 мм от продольных кромок и может достигать 100 мм в длину и 80 мм в ширину.

Распределение дефектов по сталеплавленному и прокатному переделам			
Название дефекта		Природа дефекта	
До исследования	После исследования	До исследования	После исследования
«Волосовина»	«Закат» из-за неравномерного характера течения металла в прикромочных зонах листа	Сталеплавленная	Прокатная
«Рванина»	«Раскатанная трещина»	Прокатная	Сталеплавленная
	«Слиточная рванина»		Сталеплавленная
«Прикромочная трещина»	«Закат» из-за неравномерного характера течения металла в прикромочных зонах листа	Сталеплавленная	Прокатная
«Раскатанная трещина»	«Закат» из-за глубоких следов зачистки	Сталеплавленная	Прокатная
«Плена»	«Прокатная плена»	Сталеплавленная	Прокатная
	«Плена» по неметаллическим включениям		Сталеплавленная
Дефект УЗК	«Расслоение» из-за скоплений неметаллических включений	Сталеплавленная	Сталеплавленная
	«Расслоение» из-за водорода или усадочных пустот по несплошностям		Сталеплавленная

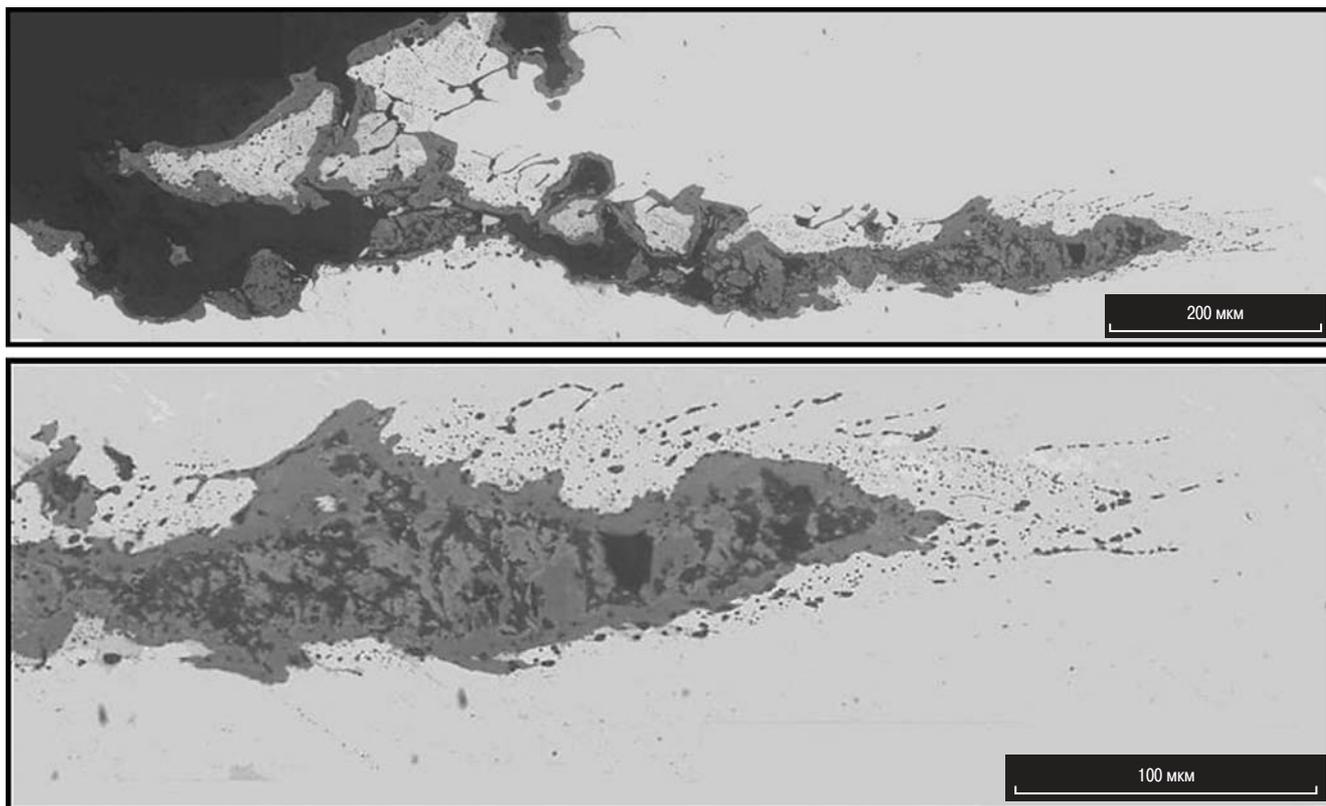


Рис. 2. Окалина в полости горячей трещины и спутанные включения вдоль окалины

Металлографические исследования поперечного сечения образцов горячекатаного листа, пораженных данным дефектом, показали, что трещины ориентированы под острым углом к поверхности вдоль направления прокатки, внутренняя полость трещины заполнена достаточно толстым слоем окалины (до 100 мкм), а вдоль нее расположена обезуглероженная зона и спутанные включения, образовавшиеся в результате высокотемпературного контакта металла с окалиной. При этом веерообразный характер распределения спутанных включений практически полностью повторяет неравномерный характер течения металла при пластической деформации с учетом формы горячей трещины, заполненной окалиной (рис. 2).

Кроме того, на поверхности шлифа обнаружено огромное число дисперсных неметаллических включений, достаточно равномерно распределенных по сечению листа. Как показали результаты микрорентгеноспектрального анализа, включения представляют собой сульфиды системы (FeS–MnS) и биалюминаты кальция ( $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Термодинамический расчет поверхностей растворимости компонентов в металле позволил установить, что указанные включения имеют эндогенную природу происхождения. Алюминаты кальция образовались в результате раскисления стали алюминием на выпуске из кислородного конвертера и окончательного раскисления на установке доводки металла перед разливкой силико-кальцием.

Таким образом, наличие в зоне дефекта таких микроструктурных признаков, как окалина, спутанные включения и обезуглероженный слой, однозначно указывают на его сталеплавильную природу образования, которая связана с раскатом горячих трещин, образовавшихся на поверхности непрерывнолитой заготовки в кристаллизаторе под действием термических напряжений, обусловленных перепадом температур по толщине и периметру оболочки слитка, а также напряжений, вызванных затрудненной усадкой из-за повышенных сил трения между поверхностью оболочки сляба и стенкой кристаллизатора. Кроме того, образование дефекта может быть связано с раскатом сетчатых или поперечных трещин, образовавшихся в зоне вторичного охлаждения вследствие повышенного расхода воды, а также значительных усилий вытягивания и разгибания слитка. В дальнейшем в методических печах в процессе продолжительного нагрева слябов под прокатку будет происходить высокотемпературное окисление поверхностных трещин с образованием окалины и спутанных включений. Для предотвращения образования дефекта «раскатанная трещина» необходимо не допускать нарушений температурно-скоростных параметров разливки, следить за качеством поверхности кристаллизатора, а также контролировать качество используемых шлакообразующих смесей. В том случае, если трещина на поверхности сляба все-таки образовалась, следует осуществлять глубокую зачистку поверхности перед посадом металла в мето-



Рис. 3. Внешний вид дефекта «пленна»

дическую печь для предотвращения дальнейшего развития дефекта.

Известно, что такой распространенный дефект, как «пленна», может иметь как сталеплавильное, так и прокатное происхождение [2, 4, 9]. Можно рассмотреть дефект поверхности горячекатаного листа, который представляет собой грубые одиночные отслоения толщиной до 2 мм, частично соединенные с основным металлом листа и вытянутые в направлении прокатки (рис. 3). Металлографические и микрорентгеноспектральные исследования данного дефекта показали, что он имеет сталеплавильную природу образования, связанную со скоплениями неметаллических включений. Неметаллические включения, декорирующие исследуемый дефект, в процессе пластической деформации выстраиваются в строчки и, располагаясь в приповерхностных зонах листа, приводят к отслоению поверхностного слоя металла. На рис. 4 представлен фрагмент панорамного изображения дефекта «пленна» с многослойным распределением неметаллических включений, расположенных вдоль дефекта.

Микрорентгеноспектральный анализ неметаллических включений, ответственных за образование дефектов, позволил идентифицировать включения двух типов: фаялит ( $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ ) и сателлитные включения на основе FeO (рис. 5). Включения фаялита имеют округлую форму и достигают в диаметре 15–20 мкм.

Природа образования включений фаялита — экзогенная, эти включения попали в сталь в результате

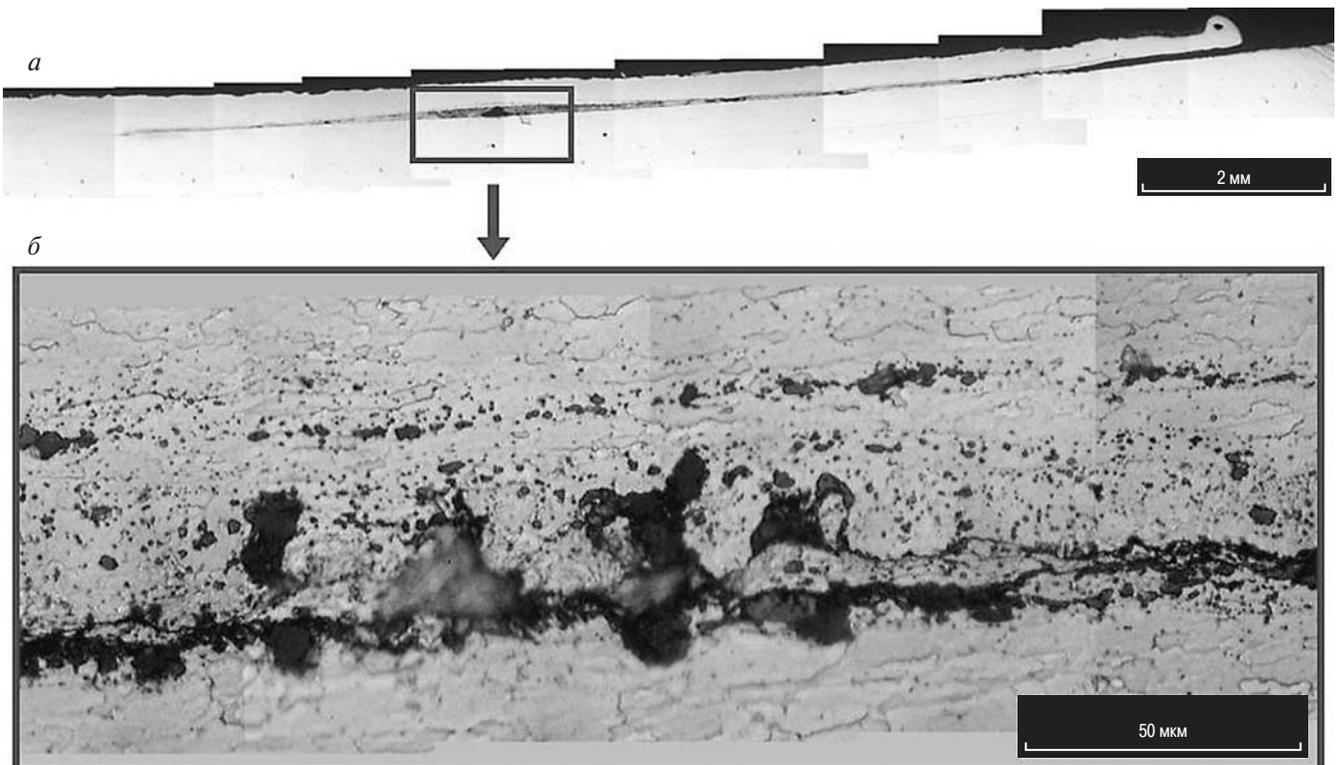
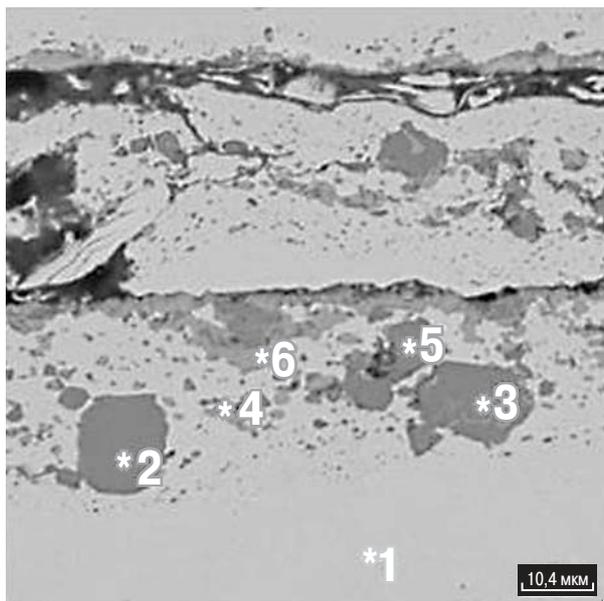


Рис. 4. Панорамное изображение дефекта «пленна» на нетравленном шлифе (а) и строчки неметаллических включений в районе дефекта (б)



№	Fe	Mn	Si	Al	O, C
1	97,36	1,63	0,39	—	—
2	51,89	2,34	16,58	—	Ост.
3	51,66	2,41	16,66	—	Ост.
4	66,80	3,66	1,07	—	Ост.
5	50,49	2,53	15,86	—	Ост.
6	70,61	1,54	0,25	0,29	Ост.

Рис. 5. Включения фаялита (точки 2, 3 и 5) и спутанные включения (точки 4 и 6) в районе дефекта «плена»



Рис. 6. Внешний вид дефекта «слиточная рванина»

взаимодействия металла с кремнийсодержащими шлакообразующими смесями типа BIOSIL (до 95 % SiO<sub>2</sub>), которые используются в промежуточном ковше для защиты поверхности металла от вторичного окисления. Шлак был затянут из-за низкого уровня

металла в промежуточном ковше или захвачен струей металла при нестабильной разливке. Признаком, указывающим на экзогенную природу образования включений, является содержание в их составе более 50 % FeO. Действительно, термодинамические расчеты показали, что при раскислении стали кремнием ([Si]=0,25±0,35 %), концентрация FeO в составе продуктов раскисления не превышает 10–12 %.

Присутствующие в зоне дефекта спутанные включения образовались в результате высокотемпературного контакта фаялита с основным металлом. Именно включения фаялита были источником кислорода, который по механизму внутреннего окисления вступил в реакцию с остаточными концентрациями раскислителей, а затем и железом с образованием спутанных включений. Как видно на фрагменте панорамы, спутанные включения располагаются вокруг крупных включений фаялита и также являются ответственными за образование дефекта «плена». Таким образом, для предотвращения образования данного дефекта необходимо исключить возможность загрязнения непрерывнолитого металла включениями системы FeO–SiO<sub>2</sub>. Для этого следует поддерживать высокий уровень металла в промежуточном ковше, контролировать гранулометрический состав и влажность используемых шлакообразующих смесей, следить за состоянием огнеупоров, защищать металл при разливке от вторичного окисления, а также соблюдать технологию раскисления и внепечной обработки стали.

**Дефект «слиточная рванина».** Этот дефект имеет вид раскрытого разрыва, расположенного вдоль или под углом к направлению прокатки (рис. 6)

При исследовании поперечного сечения листа было обнаружено, что дефект распространяется на глубину более 5 мм и состоит из множества грубых расслоений и надрывов металла, заполненных окалиной (рис. 7). Окалина в виде тонких прерывистых полос и цепочек распространяется на всю глубину дефекта. В зонах, непосредственно прилегающих к дефекту, отсутствуют неметаллические включения эндогенного или экзогенного происхождения, а также спутанные включения, образованные по механизму внутреннего окисления. Здесь нет также обезуглероженного слоя. Исходя из указанных металлографических признаков можно сделать вывод, что причины образования данного дефекта не связаны ни с расслоением по неметаллическим включениям, ни с раскатом трещин, имеющих на поверхности непрерывнолитого металла.

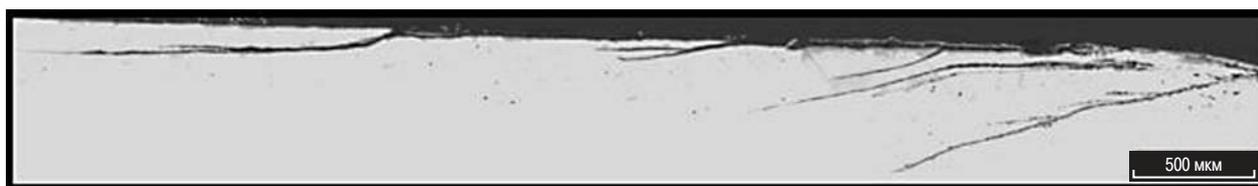


Рис. 7. Панорамное изображение дефекта «слиточная рванина» на поперечном нетравленном шлифе

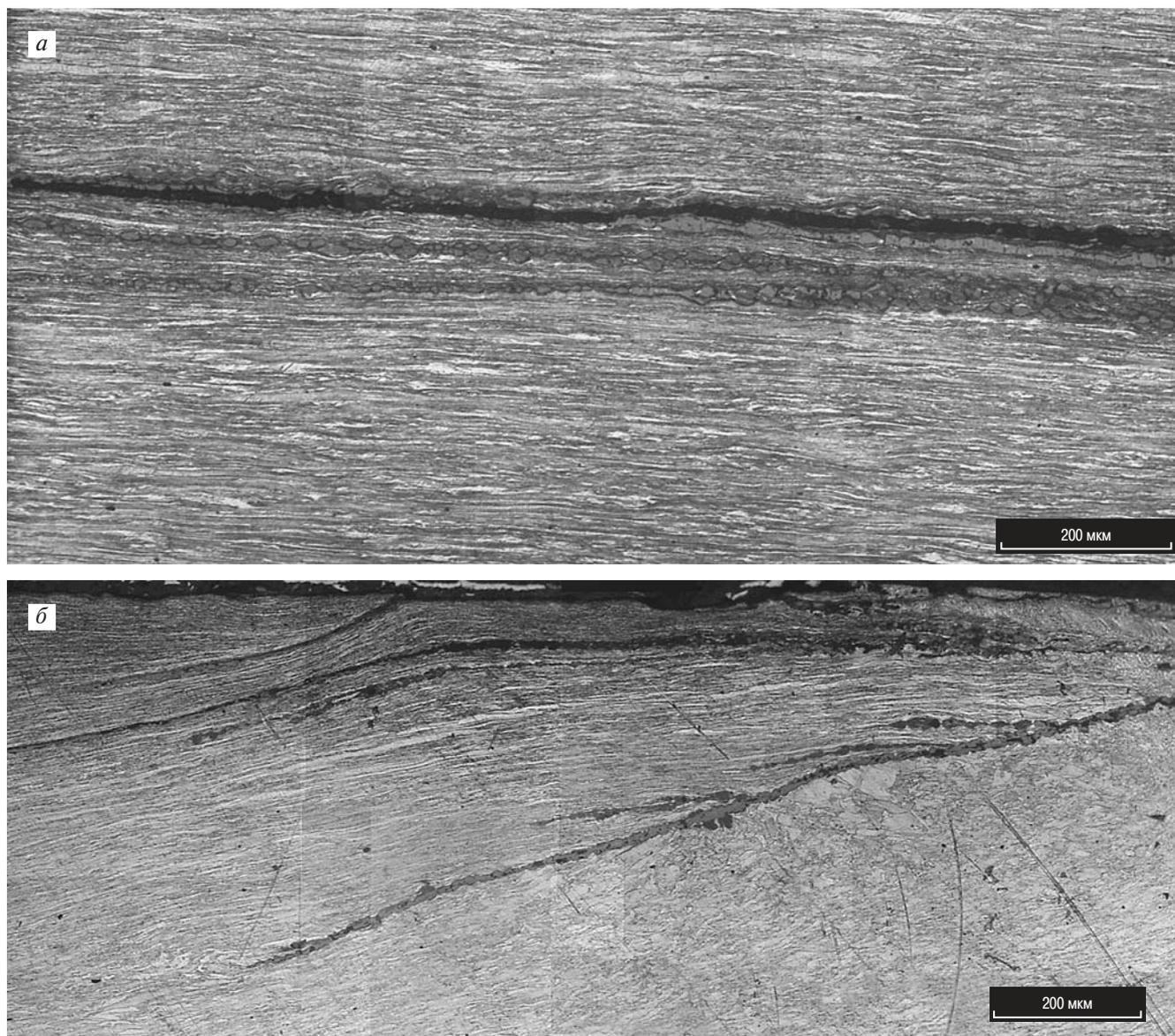


Рис. 8. Равномерный плоскопараллельный характер течения металла вдоль трещины (продольный шлиф) (а) и неравномерный характер течения металла поперек трещины (поперечный шлиф) (б)

Структура металла в окрестности дефекта на продольном шлифе имеет крайне деформированный характер, одинаковый по обе стороны от трещины (рис. 8, а), тогда как на поперечном шлифе трещина делит металл на две зоны с различной степенью деформации: приповерхностная зона деформируется значительно сильнее, чем зона основного металла под трещиной (рис. 8, б). Исходя из этих микроструктурных признаков, предложен механизм возникновения «слиточной рванины» из-за напряжений или микротрещин, образовавшихся на поверхности торцов слябов при огневой резке. В процессе пластической деформации наличие таких концентраторов напряжений приводит к развитию трещин как при продольной, так и при поперечной прокатке. Кроме того, причиной дефекта могут быть термические трещины, образовавшиеся по повреждениям на торце сляба при нарушениях режимов нагрева сляба под

прокатку. Образование дефекта начинается при высоких температурах (более 900 °С) в области интенсивного окалинообразования, что приводит к заполнению внутренней полости дефекта окалиной.

Исходя из установленной природы дефекта, для предотвращения его возникновения можно рекомендовать контроль поверхности огневого реза на наличие повреждений перед пластической обработкой и равномерный нагрев сляба под прокатку.

Среди дефектов горячекатаного листа особое место занимают внутренние дефекты, выявляемые только с помощью ультразвукового контроля, при этом причина их образования может иметь как сталеплавильную природу (скопления неметаллических включений, усадочные пустоты, водород), так и прокатную.

**Дефект «внутренние расслоения».** Этот дефект обнаружен в центральной части листа на глубине

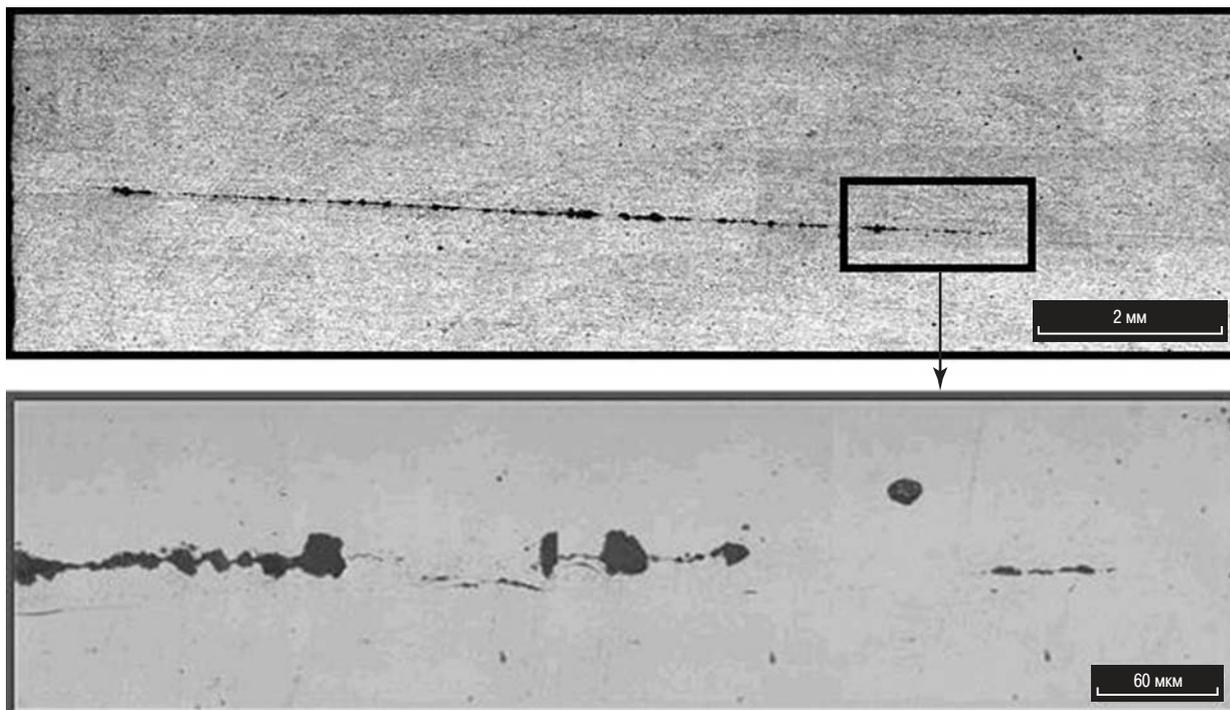
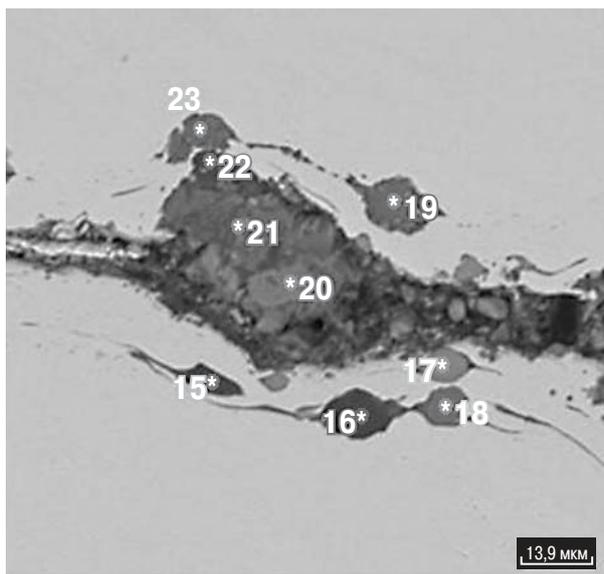


Рис. 9. Скопления неметаллических включений, вызывающие внутренние расслоения



№ точки	Fe	Mn	Si	Al	Ca	K	Na	O, C
15	3,86	0,18	—	47,05	—	—	—	Ост.
16	3,35	—	—	46,21	—	—	—	Ост.
17	6,19	51,02	16,02	—	—	—	—	Ост.
18	4,31	29,64	—	33,42	—	—	—	Ост.
19	2,81	19,35	16,90	5,41	15,93	1,02	5,63	Ост.
20	5,85	24,34	15,93	—	22,16	0,23	—	Ост.
21	1,62	3,40	17,06	6,20	28,91	1,56	7,59	Ост.
22	7,32	0,84	18,59	5,18	3,71	3,60	7,72	Ост.
23	3,69	16,30	16,49	5,48	17,29	1,33	6,08	Ост.

Рис. 10. Неметаллические включения, образовавшиеся в результате взаимодействия продуктов раскисления и шлакообразующей смеси

5–8 мм, природа его образования связана с неметаллическими включениями. Дефект представляет собой несплошность с шириной раскрытия 0,007–0,050 мм и протяженностью более 10 мм. В районе дефекта обнаружены скопления неметаллических включений, выстроившихся в строчки в направлении пластической деформации и послужившие причиной образования несплошности (рис. 9).

Учитывая состав этих неметаллических включений (рис. 10), можно заключить, что они представляют собой продукты взаимодействия эндогенных включений — продуктов раскисления стали с экзогенными частицами шлакообразующей смеси, в состав которой входит калий и натрий.

Для предотвращения эмульгирования шлакообразующих смесей (ШОС) в сталь необходимо контролировать их качество, в том числе содержание влаги и срок хранения. Также следует выполнять чистку стенок кристаллизатора при замене погружных стаканов, контролировать правильность работы системы автоматического регулирования уровня металла в кристаллизаторе, а также проводить глубокое рафинирование стали от эндогенных включений — продуктов раскисления в процессе внепечной обработки.

Другой причиной образования внутренних расслоений могут стать усадочные пустоты и водород, в том числе наследуемые из дефекта сляба «осевая рыхлость», и представляющие собой крупные и мелкие поры, расположенные вдоль теплового центра непрерывнолитого слитка, в зоне встречи фронтов затвердевания. Дефект «осевая рыхлость» может проявляться как в виде рассеянной пористости, со-

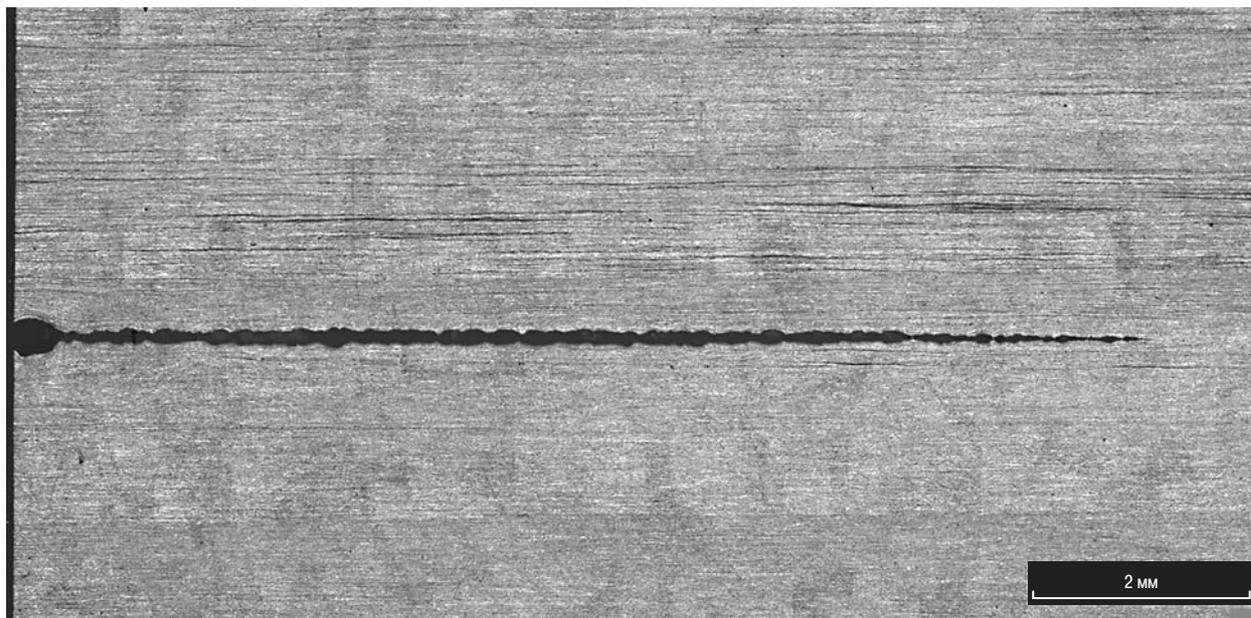


Рис. 11. Панорамное изображение дефекта «внутренние расслоения» на поперечном травленном шлифе

стоящей из отдельных усадочных пустот, так и в виде скоплений пор, которые располагаются в междендритных пространствах. После горячей деформации эти дефекты превращаются в крупные расслоения в центральной части шириной до 50 мкм и с большим числом мелких нитевидных несплошностей, расположенных на разных уровнях по всей толщине листа. Неметаллических включений в зоне дефекта не обнаружено (рис. 11).

Для предупреждения дефекта «внутренние расслоения» необходимо проводить вакуумирование с целью снижения содержания водорода в стали или противоблуженный отжиг слябов. Для предотвращения дефекта сляба «осевая рыхлость», трансформирующегося при горячей деформации в дефект «внутренние расслоения», следует уменьшать скорость и температуру разливки, снижать колебания скорости вытягивания непрерывнолитого металла, уменьшать число остановок МНЛЗ, а также обеспечивать мягкий режим охлаждения в зоне вторичного охлаждения.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить причины образования дефектов сталеплавильной природы, а также предложить рекомендации по их минимизации или полному устранению. Кроме того, установлены характерные внешние и микроструктурные особенности дефектов сталеплавильного происхождения, к которым следует отнести одиночное расположение дефекта на поверхности листа, наличие неметаллических включений эндогенного и/или экзогенного происхождения в окрестности дефекта, наличие высокотемператур-

ных сателлитных включений, декорирующих дефект, а также значительное количество окалины и наличие широкой обезуглероженной области в районе дефекта. ЧМ

#### Библиографический список

1. Новокиценова С. М. Дефекты стали. Справочник. — М.: Металлургия, 1984. — 199 с.
2. Атлас дефектов стали. Пер. с нем. М.: Металлургия, 1979. — 188 с.
3. Ежов А. А., Герасимова Л. П. Дефекты в металлах. Справочник-атлас. — М.: Русский университет, 2002. — 360 с.
4. Трофимчук В. Д. Дефекты прокатной стали. — М.: Металлургия, 1954. — 631 с.
5. Хлопонин В. Н., Полухин В. И., Погоржельский В. И. Горячая прокатка широких полос. М.: Металлургия, 1991. — 198 с.
6. Мазур В. Л., Добронравов А. И., Чернов П. П. Предупреждение дефектов листового проката. — Киев: Техника, 1986. — 141 с.
7. Гаврилин Е. Ф. Контроль дефектов проката. — М.: Металлургия, 1991. — 112 с.
8. Казаков А. А., Ковалев П. В., Мясников А. Л. и др. Неметаллические включения и природа дефектов холоднокатаного листа. Часть 1. Дефект «плена» // Черные металлы — 2006. — № 2. — С. 32–37.
9. Термины и определения дефектов поверхности. Прокат черных металлов. ГОСТ 21014–88. — Издательство стандартов, 1989.