

Исследование структуры и свойств

Физические методы исследования и контроля

УДК 669.14.018.41:621.77.04

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ НА НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

© В. В. Науменко, О. А. Багмет, К. С. Сметанин¹

Статья поступила 9 августа 2016 г.

Приведены результаты металлографического исследования дефектов наружной поверхности труб магистрального назначения, включающего оптическую и сканирующую электронную микроскопии, рентгеноструктурный и химический анализы. Установлено, что в проблемной зоне присутствуют два типа поверхностных дефектов: сталеплавивные плены и трещины напряжений. Выяснение истинной причины образования того или иного дефекта на поверхности металлопродукции — сложная задача, особенно если по характерным признакам дефекты не связаны между собой и не имеют явно выраженной природы. В результате определения фазового и химического состава проблемной области установлена причина их образования — локальное науглероживание поверхностных слоев сляба в процессе производства. Формирование локальных участков повышенной твердости на поверхности металла привело к появлению плен и трещин напряжений на этапах проката и трубного передела. Таким образом, образование дефектов связано с нарушением технологии на сталеплавивном этапе производства металла.

Ключевые слова: поверхностные дефекты; микроструктура; сталеплавивная плена; трещина напряжения; диффузионные оксидные включения; трубы большого диаметра.

При производстве труб различного назначения нередки случаи образования поверхностных дефектов в результате нарушения технологического процесса. Как известно, их формирование может произойти на любом этапе металлургического передела (сталеплавивном, прокатном или трубном) [1 – 3].

Для повышения качества готовой продукции необходимо не только контролировать состояние поверхности, но и правильно идентифицировать дефекты, что нередко достаточно проблематично ввиду их многообразия и слишком общего описания в технической литературе [4]. Кроме того, поверхностные дефекты (например, плена или трещина) могут иметь как прокатную, так и сталеплавивную природу образования [1]. Правильная идентификация поможет установить истинную причину образования дефекта и выявить этап, на котором была нарушена технология производства.

На поверхности изделия может присутствовать не один вид дефекта, а сразу несколько, имеющих по отдельности разную природу образования [3, 5], что час-

то наблюдается при контроле качества труб большого диаметра.

Цель работы — металлографические исследования дефектов, располагающихся на наружной поверхности труб большого диаметра, и выявление природы их образования.

Исследовали трубы магистрального назначения из низкоуглеродистого низколегированного проката.

На первом этапе после обнаружения поверхностных дефектов (плены и трещины), сосредоточенных в одной или нескольких локальных областях на различном расстоянии от сварного шва и распространяющихся вдоль направления прокатки листов (рис. 1), трубу с помощью ленточной пилы разрезали. Металлографические шлифы изготавливали по стандартной методике в поперечном и продольном сечениях относительно распространения дефектов.

Металлографическое исследование с использованием оптического микроскопа Axio Observer.D1m показало, что по характеру распространения вглубь металла и радиусу раскрытия наблюдаемые дефекты можно разделить на два типа. (Необходимо отметить, что случаи обнаружения сразу двух различных по-

¹ АО «Выксунский металлургический завод», г. Выкса, Россия;
e-mail: naumenko_VV@vsw.ru

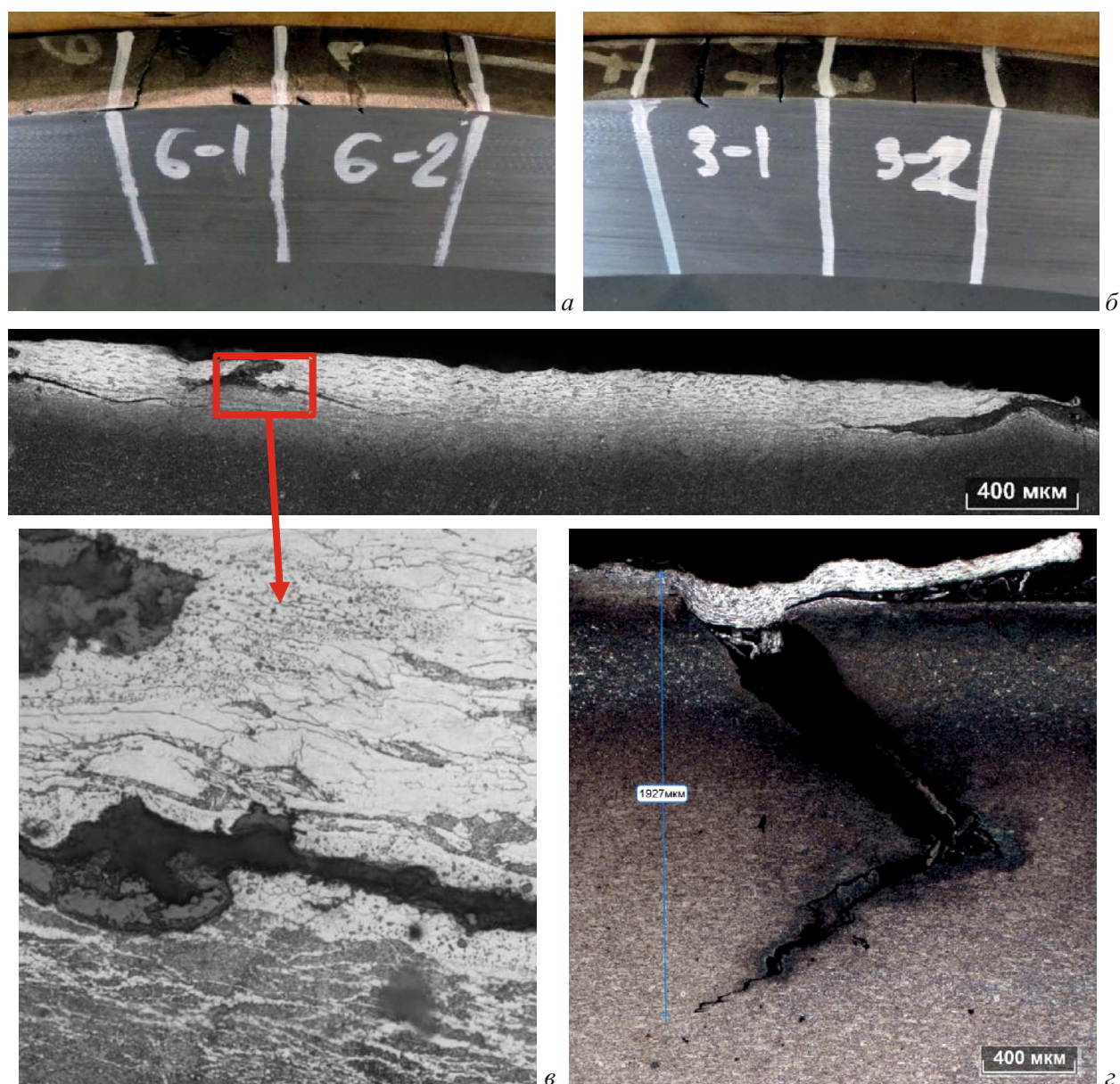


Рис. 1. Внешний вид (а, б) и микроструктура (в, г) сталеплавильной плены и трещины на наружной поверхности трубы

верхностных дефектов в одной локальной области достаточно редки.)

К первому относились отслоения языкообразной формы, частично соединенные с металлом и распространяющиеся от поверхности вглубь под острым углом (см. рис. 1, в, г). В области данных дефектов наблюдались обезуглероживание и скопление диффузионных оксидных включений, химический состав которых (рис. 2, точки 1 – 3) определяли в результате микрорентгеноспектрального анализа с помощью спектрометра энергетической дисперсии INCA Energy 450X-xMAX растрового электронного микроскопа Ultra-55 (табл. 1). По всей вероятности, формирование оксидных включений происходило в твердом металле на продуктах раскисления стали в условиях высокотемпературного контакта металла с переокисленным шлаком или окалиной. Микрорентгеноспектральный

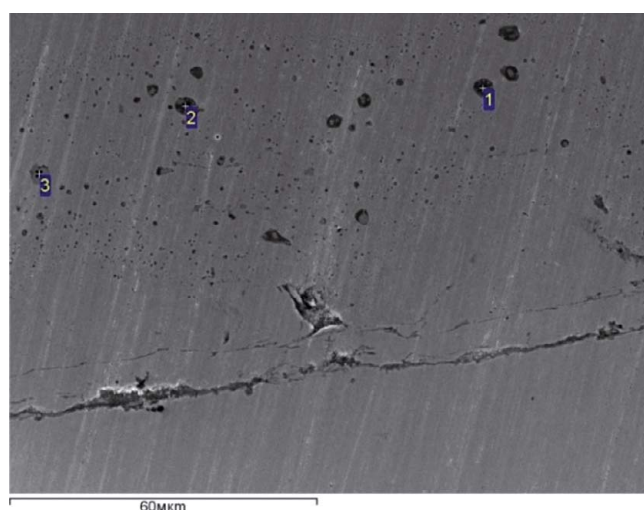


Рис. 2. Неметаллические включения, декорирующие полость сталеплавильной плены



Рис. 3. Полость плены

анализ в полостях дефектов (рис. 3, точки 4 – 6) показал повышенное количество меди и никеля (табл. 2).

Полученные данные свидетельствуют о высокотемпературной природе образования поверхностных дефектов первого типа и могут быть классифицированы как сталеплавильные плены. Вероятно, причина их образования заключается в наличии трещин на поверхности непрерывно-литых слэбов перед контролируемой прокаткой, что обусловлено технологическими нарушениями на сталеплавильном переделе.

Второй тип дефектов составляли трещины, которые, находясь под пленами или рядом с ними, распространялись от поверхности на глубину закаленной зоны (до 2 мм) (см. рис. 1, *з*). В отличие от плен они имеют значительно больший радиус раскрытия и образуют тупой угол с наружной поверхностью трубы. При этом в полости дефектов отсутствуют окалина и неметаллические включения.

Для выявления микроструктуры исследуемые образцы травили в 4 %-ном спиртовом растворе азотной кислоты. По месту дефектов возле наружной поверхности на всех образцах фиксировали «темную полосу» — участок повышенной травимости, представ-

ляющий собой полностью мартенситную структуру (рис. 4, *а*). В бездефектной зоне (см. рис. 4, *б*) возле наружной поверхности и в глубь металла наблюдали типичную для низкоуглеродистых микролегированных сталей ферритно-бейнитную структуру, характерную для термомеханической контролируемой прокатки с завершением деформации в аустенитной области и последующим ускоренным охлаждением раскатов.

Твердости дефектной и бездефектной зон измеряли по методу Виккерса при нагрузке 10 кг с использованием автоматического микротвердомера «КВ 30». Результаты показали повышенную (410 – 430 единиц) твердость возле наружной поверхности в зоне дефектов по сравнению с бездефектной областью (210 – 220 единиц).

Характер распространения трещин, структура металла в зоне дефектов и повышенная твердость указывают на то, что второй тип дефектов представляет собой трещины напряжения. Причина их образования — наличие хрупкой прочной структурной составляющей мартенсита на наружной поверхности трубы. Хотя не ясно, каким образом в низкоуглеродистой стали могла образоваться мартенситная структура с твердостью более 400 единиц $HV(10)$, можно утверждать, что дефектные участки на наружной поверхности находятся вне зоны термического влияния сварного шва, поэтому причина образования трещин напряжений не связана с технологией сварки.

На втором этапе исследовали зону дефекта после механической зачистки.

Металлографический анализ показал, что в продольном и поперечном сечениях дефекты представляют собой частично соединенные с металлом отслоения (до 200 мкм), под которыми (в поперечном сечении) располагаются трещины глубиной до 1000 мкм.

После травления исследуемых шлифов установили, что вблизи наружной поверхности в зоне дефектов присутствует неоднородная структура («темная полоса»), состоящая полностью из мартенсита. На поверхности в зоне дефектов твердость (300 – 400 HV) выше, чем в бездефектной области (210 – 220 HV).

Таблица 1. Химический состав (% масс.) неметаллических включений

Область определения (см. рис. 2)	O	F	Al	Si	P	S	Ti	Mn	Fe	Nb
1	32,41	2,30	0,24	9,50	0,76	3,23	—	34,85	16,71	—
2	33,31	—	0,28	8,55	0,68	2,64	—	38,45	16,09	—
3	14,09	—	1,24	—	0,92	—	0,13	8,73	66,59	8,30

Таблица 2. Результат микрорентгеноспектрального анализа (% масс.) в полости плены

Область определения (см. рис. 3)	O	Al	Si	S	Ca	Ti	Mn	Fe	Ni	Cu
4	33,20	—	0,37	0,48	0,60	0,38	0,74	59,33	3,40	1,50
5	11,13	—	—	—	0,53	—	0,99	84,91	2,40	0,05
6	31,10	0,27	0,69	0,32	0,52	0,29	0,85	64,74	1,21	—

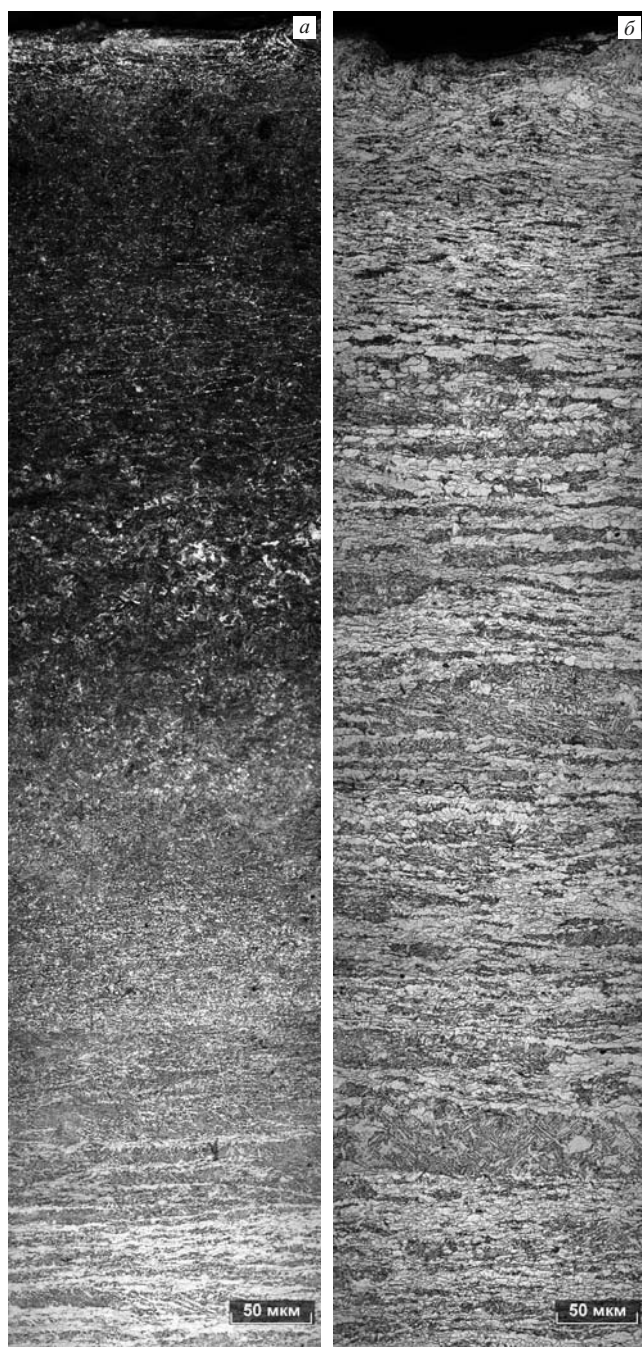


Рис. 4. Микроструктура дефектной (а) и бездефектной (б) зон



Рис. 5. Наружная и внутренняя поверхности трубы с участками измерения твердости

Микрорентгеноспектральные исследования полости дефекта при помощи растрового электронного микроскопа Ultra 55 выявили наличие окалины. Иных включений не обнаружено.

Вероятно, зачистка дефектной области — причина образования закалочной структуры («темной полосы»). Во всех случаях глубина распространения в глубь металла рассматриваемых дефектов не превышала закаленной зоны (1000 мкм).

Таким образом, два разных дефекта (плена и трещина напряжения) имеют одну природу образования, связанную, по нашему мнению, с грубой механической зачисткой поверхностных дефектов и охлаждением локальных участков жидкостью, что привело к формированию мартенситной структуры и последующему развитию дефекта по не полностью удаленным следам плен (концентраторам напряжений).

На третьем этапе измеряли твердость на наружной и внутренней поверхностях трубы (рис. 5). Результаты представлены на рис. 6.

Видно, что закаленный слой с повышенной твердостью присутствует на обеих поверхностях. С увеличением расстояния от поверхности количество мартенсита уменьшается и одновременно растет объемная доля ферритной составляющей, что приводит к снижению твердости металла.

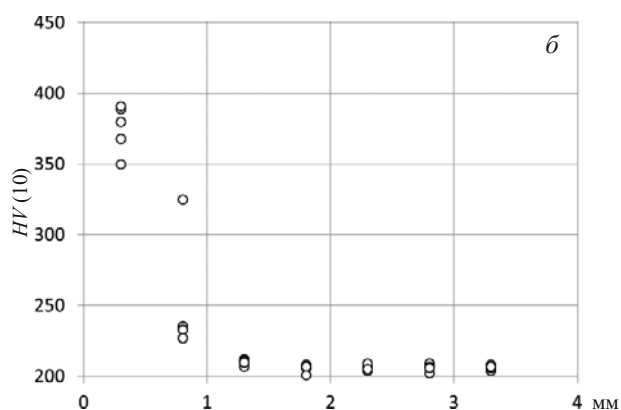
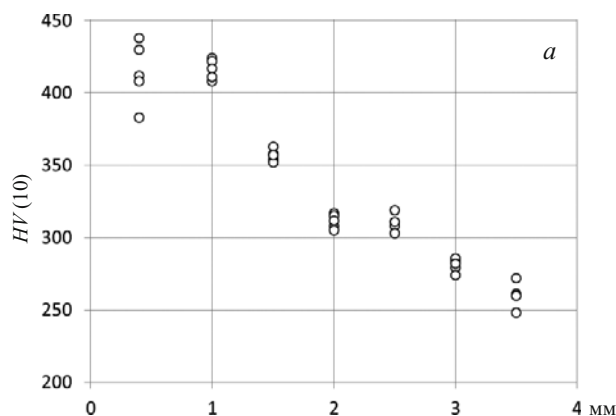


Рис. 6. Зависимость твердости $HV(10)$ от расстояния от наружной (а) и внутренней (б) поверхностей трубы

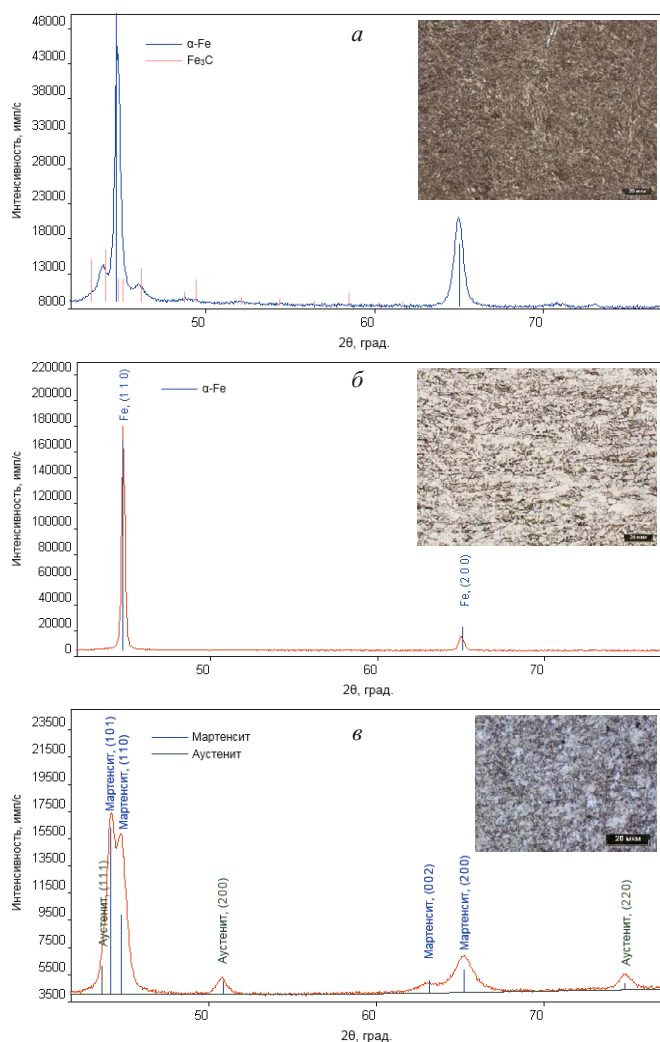


Рис. 7. Дифрактограммы и микроструктуры участков образцов вблизи дефекта в исходном состоянии и после дополнительной закалки (*а, в*) и непосредственно под дефектом в исходном состоянии (*б*)

Фазовый состав и содержание углерода по месту выявленных дефектов определяли с применением рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima IV, оснащенного рентгеновской трубкой с медным анодом и высокоскоростным полупроводниковым детектором D-teX Ultra. Анализируемая поверхность металлографических шлифов для рентгеноструктурного исследования была параллельна плоскости прокатки и

находилась на расстоянии 0,10–0,15 мм от наружной поверхности трубы. Обработку дифрактограмм для количественной оценки содержания остаточного аустенита и определения параметров кристаллической решетки мартенсита проводили по методу Ритвельда в программе PDXL.

Содержание углерода в мартенсите оценивали по степени тетрагональности его кристаллической решетки c/a с использованием формул Г. В. Курдюмова [6]:

$$c = a_0 + 0,118p; \quad a = a_0 - 0,015p,$$

где p — массовое содержание углерода в мартенсите; a_0 — параметр решетки феррита (2,866 Å).

Для исследования структурного состояния металла вблизи поверхностных дефектов использовали металлографические шлифы, изготовленные в поперечном сечении относительно направления прокатки и оси трубы (в исходном состоянии и после дополнительной закалки от температуры 880 °С после выдержки 15 мин в воду образца размером 33 × 13 × 9 мм). Термическая обработка необходима для перевода углерода в твердый раствор и определения его содержания в мартенсите рентгеноструктурным методом.

На рентгенограмме, снятой с наружной поверхности трубы в исходном состоянии вблизи дефекта, присутствуют отражения α -Fe и довольно интенсивные пики цементита Fe_3C . Рефлексы остаточного аустенита не выявлены (рис. 7, *а*). На рис. 7, *б* приведена дифрактограмма бездефектного участка с феррито-бейнитной структурой, расположенного на расстоянии около 2 мм от дефектной поверхности (дифракционные линии цементита отсутствуют либо имеют чрезвычайно низкую интенсивность). Исходя из приведенных данных, можно предположить, что структура слоя повышенной травимости представляет собой высокоуглеродистый мартенсит отпуска.

На дифрактограмме образца после дополнительной закалки (наружная поверхность) присутствуют тетрагональные дублеты, характерные для мартенсита с содержанием не менее 0,6 % масс. углерода, а также линии остаточного аустенита (рис. 7, *в*). Количество остаточного аустенита составило около 12 %. Параметры решетки мартенсита: $a = b = 2,8667 \text{ Å}$, $c =$

Таблица 3. Химический состав наружной и внутренней поверхностей трубы (% масс.)

Область определения	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Ti	Al	Nb
Наружная поверхность трубы (с дефектом)													
1	0,51	0,18	0,003	0,009	1,36	0,29	0,04	0,028	0,005	0,28	0,006	0,020	0,022
2	0,32	0,18	0,004	0,011	1,48	0,28	0,05	0,032	0,005	0,28	0,008	0,022	0,030
3	0,26	0,18	0,003	0,012	1,61	0,28	0,05	0,035	0,006	0,28	0,011	0,025	0,039
4	0,21	0,18	0,003	0,012	1,61	0,28	0,05	0,034	0,006	0,28	0,011	0,025	0,038
Внутренняя поверхность трубы (без дефекта)													
	0,06	0,18	0,002	0,011	1,67	0,28	0,05	0,035	0,006	0,28	0,012	0,028	0,039

$= 2,9482 \text{ \AA}$. Согласно расчетам в мартенсите науглероженного поверхностного слоя содержится около 0,61 % углерода.

Для более точного определения содержания углерода провели химический анализ состава (рис. 8, области 1–4) атомно-эмиссионным методом. Результаты показали, что в дефектной зоне (наружная поверхность) содержание углерода составляет 0,21 – 0,51, а в бездефектной (внутренняя поверхность) — 0,06 % масс. (табл. 3).

Появление мартенситной структуры вблизи наружной поверхности обусловлено химической неоднородностью и, в частности, локальным обогащением поверхности листов углеродом (наследие сляба). Наиболее вероятная причина аномально высокого содержания углерода в поверхностном слое — захват металлом в подкорковую зону непроплавленных частиц шлакообразующей смеси (ШОС), содержащих большое количество элемента. При разливке металла и, возможно, при нагреве слябов под прокатку под воздействием высоких температур происходило науглероживание металла вследствие контакта с частицами ШОС и диффузии углерода. Во время ускоренного охлаждения раскатов после завершения контролируемой прокатки в науглероженных областях поверхностных слоев листов имело место полиморфное $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение с образованием средне- и высокоуглеродистого мартенсита, который впоследствии отпускался, за счет теплоты внутренней зоны. Далее в процессе трубного передела в результате наличия прочной хрупкой мартенситной структурной составляющей возле наружной поверхности происходило формирование трещин напряжения.

Таким образом, в результате проведенного комплексного металлографического исследования образцов труб магистрального назначения с поверхностными дефектами, включающего оптическую и сканирующую электронную микроскопии, рентгеноструктурный и химический анализы, установили, что дефекты представляют собой сталеплавильные плены и трещины напряжения. Определение фазового и химического состава дефектной области показало, что причина их образования — локальное науглероживание поверхностных слоев сляба в процессе производства. Появление локальных участков повышенной твердости на поверхности металла привело к формированию плен на стадии проката и трещин напряжений на



Рис. 8. Схема расположения областей определения химического состава относительно дефекта

стадии трубного передела, т.е. образование дефектов было связано с нарушением технологии на сталеплавильном этапе производства металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казаков А. А., Ковалев П. В., Зинченко С. Д. и др. Природа дефектов горячекатаного листа из трубных марок стали. Ч. 1. Дефекты, имеющие сталеплавильную природу / Черные металлы. 2007. № 11. С. 8 – 15.
2. Новокшченнова С. М. Дефекты стали. Справочник. — М.: Металлургия, 1984. — 199 с.
3. Атлас дефектов стали / Пер. с нем. — М.: Металлургия, 1979. — 188 с.
4. Казаков А. А., Ковалев П. В., Андреева С. Д. и др. Природа дефектов горячекатаного листа из трубных марок стали. Ч. 2. Дефекты, образовавшиеся на этапе прокатного производства / Черные металлы. 2008. № 12. С. 10 – 14.
5. ГОСТ 21014–88. Термины и определения дефектов поверхности. Прокат черных металлов. — М.: Издательство стандартов, 1989.
6. Миркин Л. И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов. Справочник. — М.: Машиностроение, 1979. — 134 с.

REFERENCES

1. Kazakov A. A., Kovalev P. V., Zinchenko S. D., et al. The nature of the hot-rolled sheet defects of pipe steel grades. Part 1. Defects having steelmaking nature / Cher. Met. 2007. N 11. P. 8 – 15 [in Russian].
2. Novokshchenova S. M. Defects of steel. Directory. — Moscow: Metallurgiya, 1984. — 199 p. [in Russian].
3. Atlas defects of steel. — Moscow: Metallurgiya, 1979. — 188 p. [Russian translation].
4. Kazakov A. A., Kovalev P. V., Andreeva S. D., et al. The nature of the hot-rolled sheet defects of pipe steel grades. Part 2. The defects formed at the stage of rolling mills / Cher. Met. 2008. N 12. P. 10 – 14 [in Russian].
5. RF State Standard GOST 21014–88. Terms and definitions of surface defects. The ferrous metals. — Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1989 [in Russian].
6. Mirkin L. I. X-ray control of engineering materials. Directory. — Moscow: Mashinostroenie, 1979. — 134 p. [in Russian].