

УДК 620.191.33:621.532.3

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ТРУБ И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ЭКСПЕРТИЗЕ ОБЪЕКТОВ ПАО «ГАЗПРОМ»

© В. В. Коннов¹, Вл. Вл. Коннов¹, Д. В. Важенин¹,
Н. С. Пронин¹, В. Г. Савин¹, Д. С. Соловьев¹

Статья поступила 5 декабря 2014 г.

Приведен опыт работ АО НПЦ «Молния» при экспертизе промышленной безопасности газопроводов, построенных с применением труб, изготовленных по ГОСТ 10705–80 путем стыковой сварки токами высокой частоты. Использование для производства труб стальных листов с высоким содержанием неравномерно распределенных неметаллических включений приводит к снижению пластичности металла сварных швов и растрескиванию труб в процессе эксплуатации. Поэтому исследование состояния металла труб комплексом неразрушающих и разрушающих методов контроля необходимо для обоснованного прогнозирования срока безопасной эксплуатации газопровода. Частично использованы материалы отчета о НИР «Экспертиза аварийного газопровода», проведенного совместно с ИЦ ИМАШ УроРАН (г. Екатеринбург), и металлографических исследований, выполненных совместно с ЦЗЛ ОАО «Волгабурмаш» (г. Самара).

Ключевые слова: трубопровод; трещина; основной металл; сварное соединение; неметаллическое включение; химический состав; металлографический контроль; фрактографический анализ; статическое растяжение; предел текучести, ударная вязкость.

У большого числа эксплуатируемых ПАО «Газпром» объектов заканчивается или уже исчерпан установленный проектной документацией гарантийный срок безопасной эксплуатации, поэтому работы по определению технического состояния объекта и проведению экспертизы промышленной безопасности являются важными.

Диагностические работы с помощью методов, средств и технологий неразрушающего контроля и диагностирования позволяют определить техническое состояние объектов. Они должны быть неотъемлемой частью работ по экспертизе промышленной безопасности. При диагностировании определяются состояния защитного изоляционного покрытия на трубах, металла труб и сварных соединений.

При проведении экспертизы в ряде случаев недостаточно выявить опасные дефекты, в том числе трещины, необходимо установить причины возникновения и дать прогноз их развития для разработки обоснованных мероприятий по восстановлению работоспособности газопровода и его безопасной эксплуатации в дальнейшем.

С этой целью в нашей испытательной лаборатории проведены комплексные, неразрушающие и разрушающие исследования основного металла и сварных соединений трубопроводов, при строительстве которых использовали трубы, изготовленные по ГОСТ 10705–80 с использованием стыковой сварки токами высокой частоты.

Исследовали газопроводы-отводы, транспортирующие природный газ, построенные с применением труб диам. 159 – 219 мм. Газопроводы эксплуатировались при рабочем давлении от 2 до 7,4 МПа.

Для разрушающих исследований вырезали фрагменты труб диам. 159 и 219 мм с толщиной стенки 5 и 7 мм, в которых методами неразрушающего контроля (НК) были обнаружены трещины, в том числе сквозные. Исследования проводили в соответствии с государственными стандартами (ГОСТ 18895–97, ГОСТ 1497–84) с помощью современного испытательного оборудования.

Металлографический контроль структуры материала труб проводили на оптическом микроскопе NEOPHOT 21 при увеличениях от 100 до 1000 крат. В соответствии с требованиями стандарта исследовали поверхность шлифов — нетравленую или после травления 4 %-ным спиртовым раствором азотной кислоты.

Химический состав исследуемых образцов определяли мобильным оптико-эмиссионным спектроскопом PMI Master UVR.

Фрактографический анализ поверхности разрушения трубы и образцов после испытаний механических свойств проводили на бинокулярном микроскопе МБС-1 при увеличениях от 2 до 7 крат и растровом электронном микроскопе TESCAN VEGA II XMU (Чехия), оснащенном системой рентгеновского волнодисперсионного микроанализа INCA WAVE 700, энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450 с ADD детектором фирмы OXFORD (Великобритания) и программным обеспечением INCA.

¹ Акционерное общество Научно-производственный центр «Молния» (АО НПЦ «Молния»), Москва, Россия;
e-mail: molkon@bk.ru

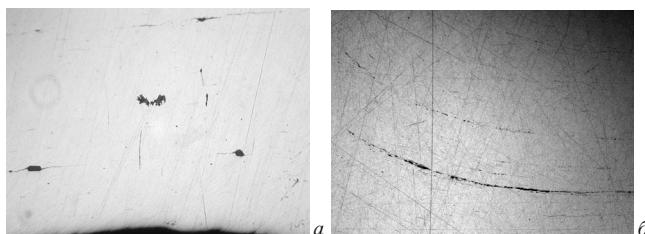


Рис. 1. Неметаллические включения в кольцевых сварных соединениях труб Ø219 × 7 мм (а) и Ø159 × 5 мм (б)

Механические испытания материала на растяжение выполняли на сервогидравлической испытательной установке Instron 8801, испытания на ударный изгиб — на инструментированном маятниковом копре Tinius Olsen IT542V (США) при температурах +20 и -20 °C.

Установлено, что химический состав металла труб соответствует марке сталь 10 по ГОСТ 1050–88, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 10705–80.

Структура основного металла труб и сварных соединений классифицирована как феррито-перлитная с соотношением фаз 80/20. Перлит в структуре металла — пластинчатый, 2 балла по шкале 1 ГОСТ 8233–56. Балл зерна основного металла труб — 9 – 10 (размеры зерна 0,11 – 0,15 мм), а в зоне сварного соединения — 6 – 7 (размеры зерна 0,31 – 0,44 мм) по ГОСТ 5639–82.

При анализе качества металла труб в основном металле были выявлены оксиды, 2 балла по шкале «б» (ГОСТ 1778–70), и сульфиды, 1 балл по шкале «а»; в кольцевом сварном соединении обнаружены неравномерные скопления оксидов, 5 баллов по шкале «б». В основном металле труб диам. 159 мм по методу Ш6 ГОСТ 1778–70 обнаружены точечные и строчные оксидные включения, 1 балл по шкале «а», а в кольцевом сварном соединении — включения сульфидов, 3,5 – 4,5 баллов по шкале «а» (рис. 1).

Неметаллические включения были зафиксированы также в сквозной трещине кольцевого сварного соединения, которая была выявлена методами НК при диагностировании газопровода. Микрорентгенострук-



Рис. 2. Рельеф поверхности сварного соединения после разрушения: а — очаг разрушения; б — усталостные бороздки

турный химический анализ показал в составе этих неметаллических включений повышенное содержание углерода, кислорода и серы (табл. 1).

Результаты испытаний основного металла труб и сварных соединений труб на статическое растяжение

Таблица 1. Химический состав включений в трещине

Элемент	Массовая концентрация, %	Атомная концентрация, %
C	69,12	80,66
O	14,11	12,36
Na	3,42	2,08
Si	1,28	0,64
S	5,64	2,46
Cl	0,30	0,12
K	0,68	0,24
Ca	0,64	0,22
Cr	0,00	0,00
Fe	4,81	1,21

Таблица 2. Результаты измерений твердости, а также испытаний на статическое растяжение и ударный изгиб основного металла труб и сварных соединений

Диаметр трубы (мм) и вид образца	HV10	Предел текучести σ_p , МПа	Временное сопротивление разрыву σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Ударная вязкость, МДж/м ²	
					KCV_{+20}	KCV_{-20}
159-1	—	310	410	39	1,64	—
159-2	—	320	420	40	1,81	—
159-п	—	330	390	19	1,33	—
159-к	—	320	380	17	1,19	—
219-1	120 – 132	285	390	33	1,70	0,51
219-2	123 – 133	290	395	31	1,75	0,52
219-п	128 – 132	301	418	32	0,514	0,053
219-к	147 – 156	—	342	—	0,274	0,042

Примечание. В первой колонке цифрами 1, 2 обозначены образцы основного металла трубы слева и справа от сварного шва, «п» и «к» — образцы металла продольного и кольцевого сварных швов труб.

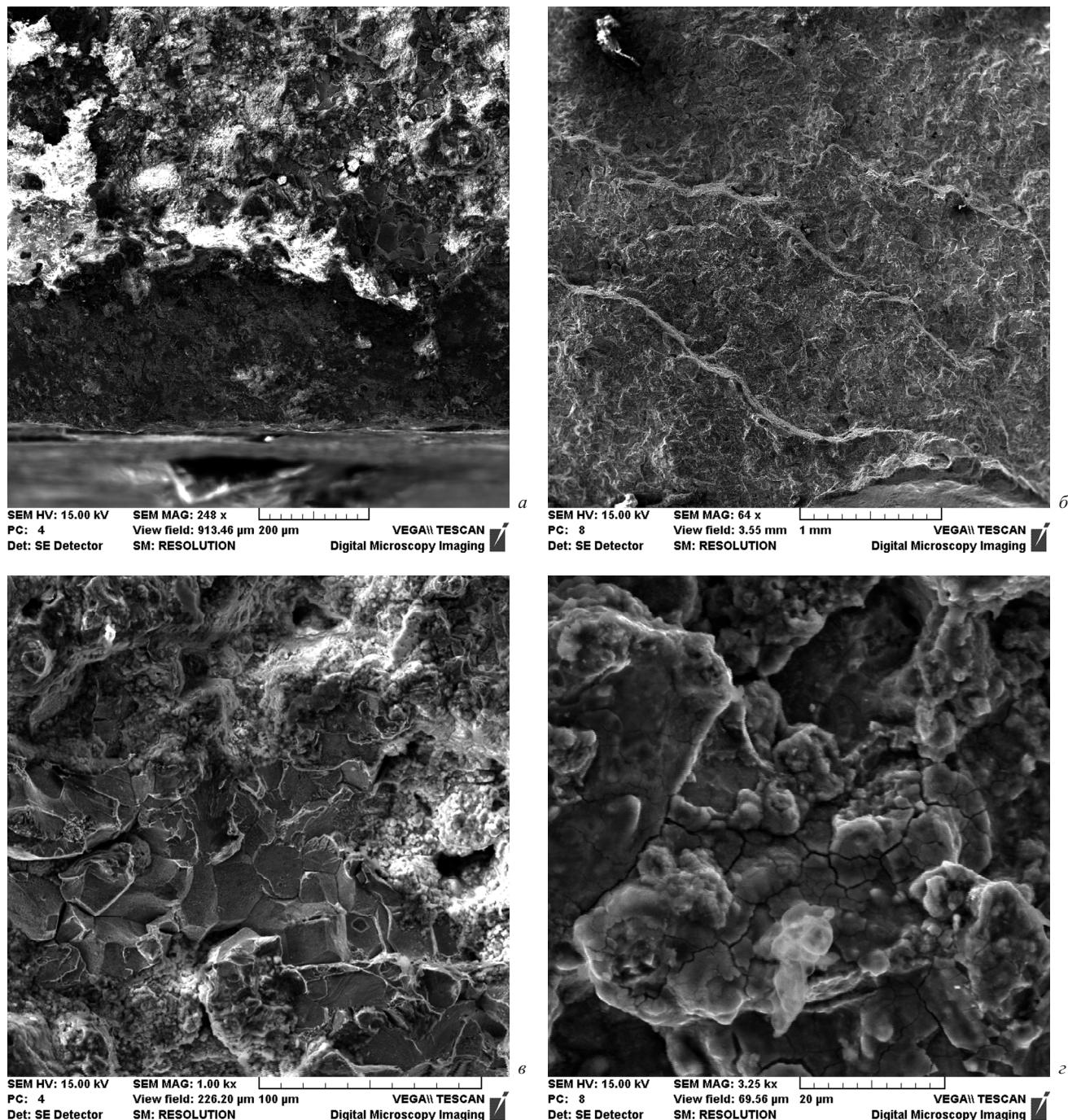


Рис. 3. Рельеф поверхности аварийно разрушенного сварного соединения: *а* — очаг разрушения с окислами железа (светлые участки); *б* — усталостные бороздки; *в* — участок коррозионного растрескивания; *г* — коррозионное растрескивание шлакового включения

и ударный изгиб в соответствии с ГОСТ 10006–80, ГОСТ 6996–66 и ГОСТ 9454–78 приведены в табл. 2.

С целью уточнения причин возникновения трещин в сварных соединениях и характера их распространения исследовали образец сварного соединения после аварийного разрушения (рис. 2) и образец со сквозной трещиной. Поверхность разрушения первого образца была сильно окислена, а ее рельеф соответствовал характеру усталостного разрушения.

Для уточнения причин разрушения сварного соединения трубопровода провели тщательную очистку

поверхности разрушения от продуктов окисления и коррозии для фрактографических исследований и микрорентгеноспектрального анализа. Последний позволил обнаружить на поверхности разрушения окислы железа (рис. 3, *а*, светлые участки поверхности), а также увидеть, что в зоне усталостных бороздок поверхность сильно притерта (рис. 3, *б*), что говорит о длительном медленном развитии трещины при умеренных нагрузках. В очаге разрушения выявлен участок коррозионного растрескивания трубы с характерным рельефом поверхности (рис. 3, *в*). Окис-

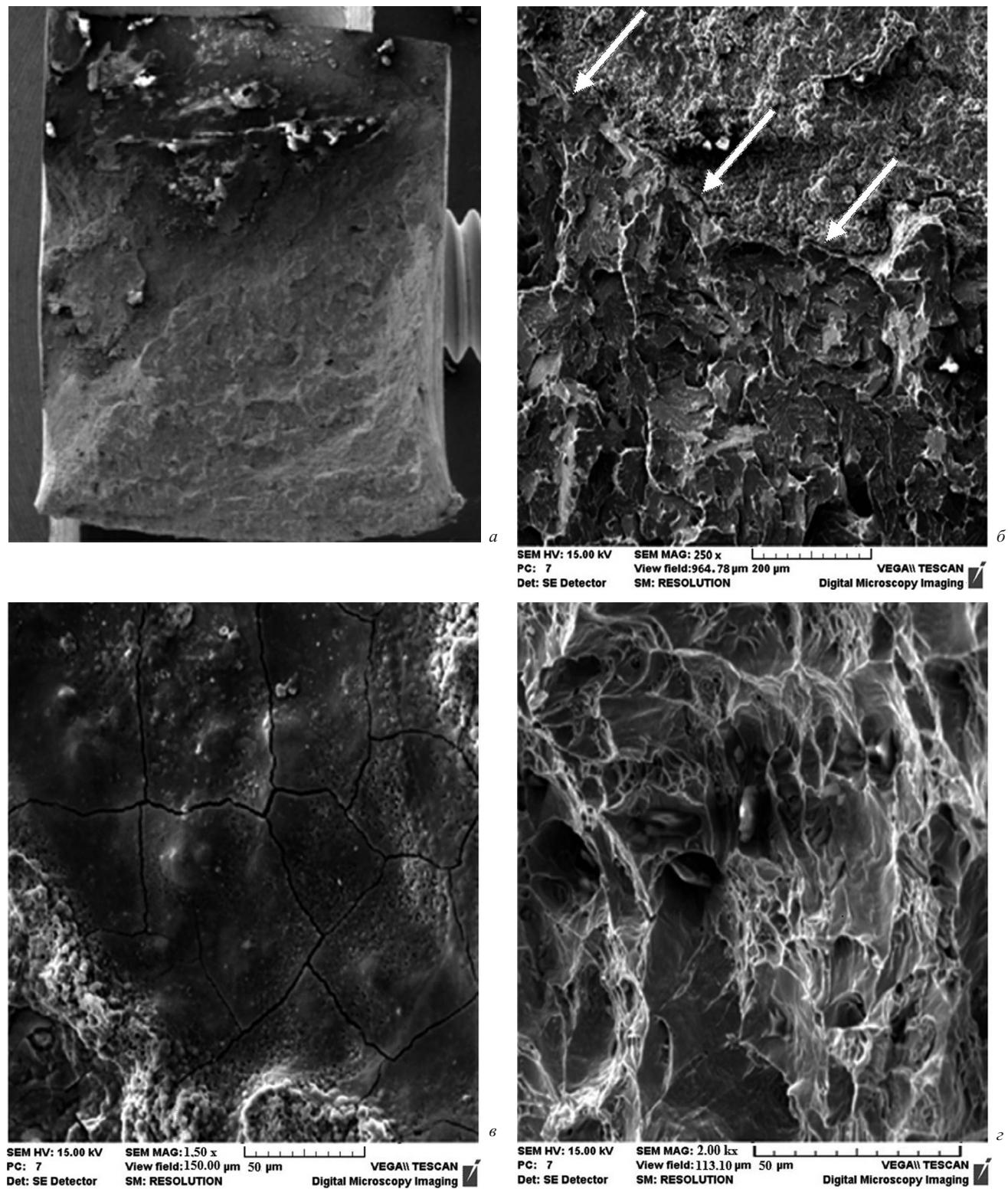


Рис. 4. Рельеф поверхности раскрытой сквозной трещины в кольцевом шве трубы Ø219 × 7 мм: *а* — поверхность трещины при 5-кратном увеличении; *б* — граница окисленного участка устья трещины и хрупкого квазискола; *в* — трещины на поверхности толстого окисного слоя в устье трещины; *г* — участки вязкого разрушения около неметаллических частиц и хрупкого квазискола основного материала

ленные участки поверхности представляют собой рыхлые образования с развитой сетью микротрещин (рис. 3, *г*).

Образец со сквозной трещиной ломали таким образом, чтобы обе поверхности устья трещины можно

было исследовать в растровом электронном микроскопе (рис. 4). Установлено, что поверхность устья трещины сильно окислена (см. рис. 4, *а*), материал шва после разрушения образца имеет поверхность, харак-

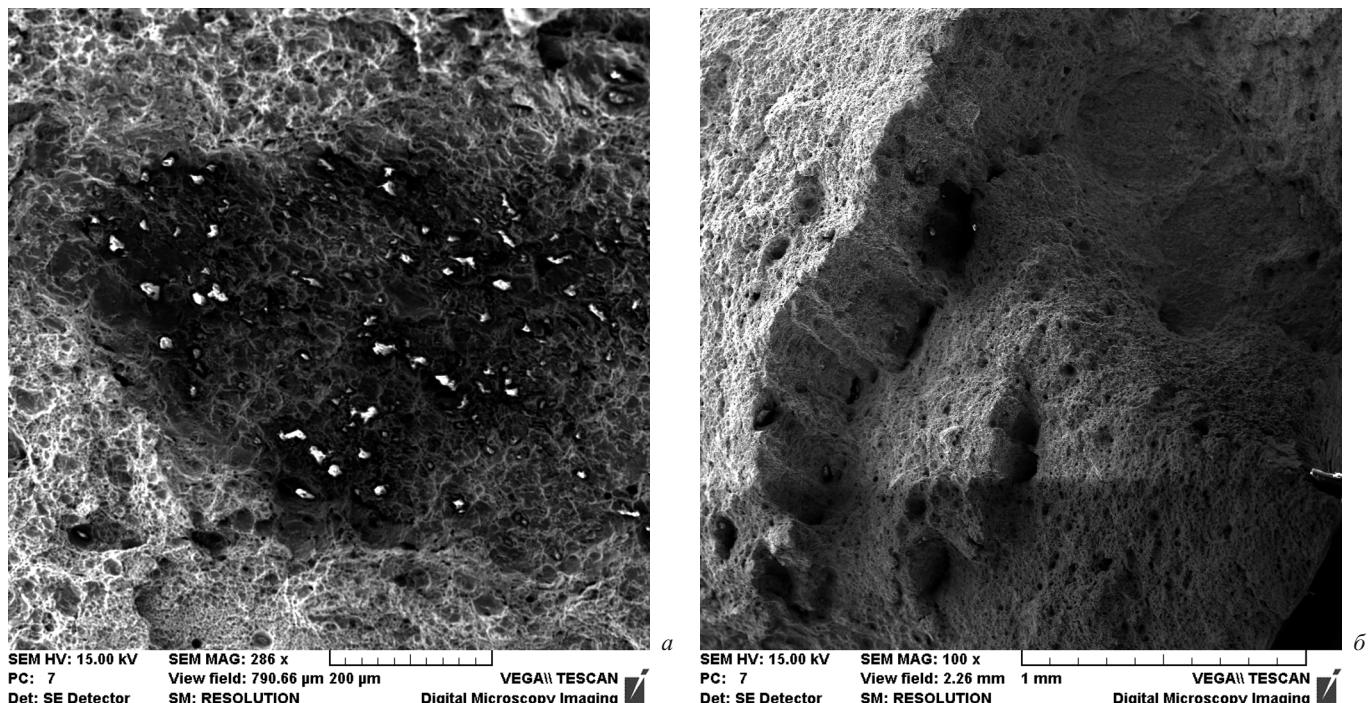


Рис. 5. Рельеф поверхности разрушения образца с кольцевым сварным швом трубы Ø219 × 7 мм после испытаний на растяжение: *a* — скопление шлаковых включений (более 50 частиц на площади снимка); *b* — пустоты, образовавшиеся вокруг крупных частиц в результате растяжения

терную для квазихрупкого скола (рис. 4, б). Слой окислов на поверхности трещины растрескан (рис. 4, в). Вблизи неметаллических включений разрушение носит вязкий (ямочный) характер (рис. 4, г).

Дополнительно фрактографически исследовали поверхности разрушения образцов основного металла и образцов из бездефектной зоны кольцевого сварного шва, испытанных на статическое растяжение (рис. 5), а также рельеф поверхностей разрушения основного металла и кольцевого сварного соединения при испытаниях на ударный изгиб при температуре -20°C (рис. 6).

По результатам металлографических исследований заключили, что трубы изготовлены из холоднодеформированного листа с помощьюстыковой сварки оплавлением. Для оплавления кромок листа и трубных заготовок использовали нагрев токами высокой частоты. Готовые трубы впоследствии подвергали термической обработке, о чем свидетельствует равноосная структура основного металла труб.

Металлографические исследования и испытания на статическое растяжение и ударный изгиб с последующим фрактографическим анализом поверхностей разрушения позволили установить, что неметаллические включения, присутствующие в виде скоплений (балл 1 по шкале «а» согласно ГОСТ 1778–70), не оказывают существенного влияния на временное сопротивление разрыву σ_b и на предел текучести σ_t основного металла трубы, однако резко снижают его ударную вязкость и хладноломкость (см. табл. 2).

Технология стыковой сварки токами высокой частоты, используемая при изготовлении труб по ГОСТ 10705–80, приводит к увеличению в сварном шве скоплений оксидов до балла 5 по шкале «б», а также сульфидов (до балла 4,5 по шкале «а»). В результате твердость металла шва возрастает на 30 единиц по Виккерсу и превышает HV основного металла (см. табл. 2), а также максимально допустимые значения твердости, установленные ГОСТ 1050–88 на сортовой прокат. Запас пластичности металла сварного шва при этом резко уменьшается, а его ударная вязкость при -20°C снижается более чем в 10 раз по сравнению с аналогичной характеристикой основного металла, о чем свидетельствуют результаты механических испытаний (см. табл. 2) и фрактографических исследований (см. рис. 5, 6).

На основании проведенных исследований можно заключить, что неравномерные скопления неметаллических включений в стыковом сварном соединении являются одной из основных причин растрескивания труб как при их производстве², так и при эксплуатации газопроводов. Анализ поверхностей аварийного разрушения сварного соединения трубопровода показал, что зарождение и развитие трещины носит усталостный характер (см. рис. 3, б). Разрушение образцов бездефектных участков сварных соединений при испытаниях и после раскрытия трещины в сварном шве — хрупкое, о чем свидетельствуют наблюдаемые

² Бобров В. Т. Влияние характера дефекта на эффективность контроля при радиочастотной сварке труб / Сварочное производство. 1969. № 6. С. 22 – 24.

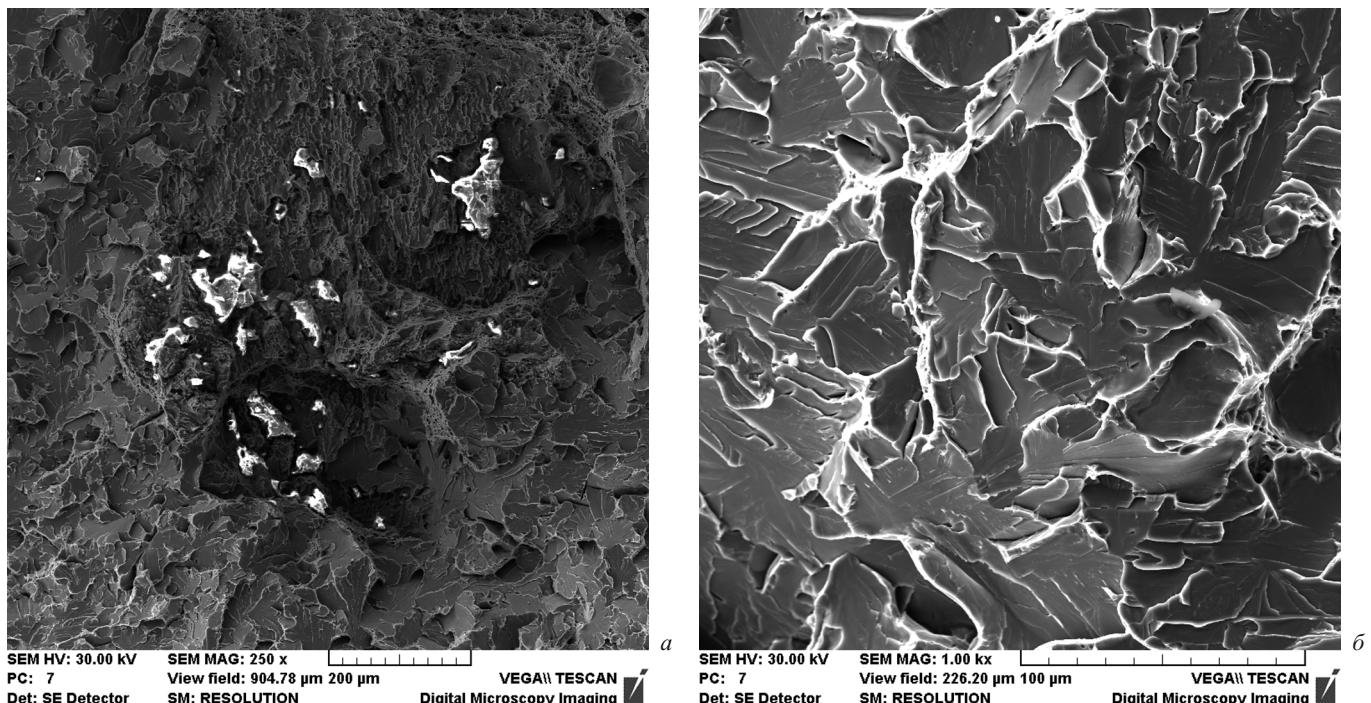


Рис. 6. Рельеф поверхности разрушения кольцевого сварного соединения трубы $\varnothing 219 \times 7$ мм при испытании на ударный изгиб: *а* — шлаковые включения на поверхности излома (рельеф излома); *б* — фасетки квазискола (направление ручьистого узора показано стрелками)

фасетки квазискола (см. рис. 4, *б*). Поверхность берегов трещины покрыта растрескавшейся толстой оксидной пленкой (см. рис. 4, *в*). Поверхность разрушения металла шва в устье трещины характерна для хрупкого скола (см. рис. 4, *б*), а вблизи неметаллических включений — для вязкого ямочного разрушения (см. рис. 4, *г*). Отметим, что неметаллические включения, обнаруженные при фрактографическом анализе поверхностей разрушения образцов, после испытания как на ударный изгиб (см. рис. 6), так и на статическое растяжение (см. рис. 5) являются причиной резкого снижения трещиностойкости сварных соединений из-за падения ударной вязкости до $KCV_{20} = 0,042$ МДж/м² (при ударной вязкости основного металла $KCV_{20} = 0,52$ МДж/м²).

Таким образом, трубы, изготовленные по технологии стыковой сварки токами высокой частоты по

ГОСТ 10705–80 из стали 10, склонны к растрескиванию в процессе эксплуатации газопроводов высокого давления из-за высокой концентрации неметаллических включений в сварном шве, превышающей балл 4.

При проведении экспертизы промышленной безопасности газопроводов высокого давления, построенных с применением труб, изготовленных по ГОСТ 10705–80, необходимо учитывать результаты как НК, так и исследований металла труб и сварных соединений методами разрушающего контроля.

Основанием для проведения исследований образцов труб в испытательной лаборатории разрушающими методами может служить выявленное при НК и ТД превышение твердости металла в зоне сварных соединений максимально допустимых значений, установленных нормативной документацией.