

© И.Ю. Пышминцев, 2012 г.
Российский научно-исследовательский институт
трубной промышленности
г. Челябинск
© В.А. Хотинов, В.М. Фарбер, 2012 г.
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
г. Екатеринбург

ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ КЛАССА ПРОЧНОСТИ X80 (K65)

Надежность эксплуатации магистральных трубопроводов для транспортировки энергоносителей определяется комплексом свойств основного металла труб и сварных соединений. Разработка новых сталей, использование современных технологий позволили получать высокопрочный лист и, соответственно, сварные трубы с исключительно высоким уровнем вязко-пластических характеристик [1; 2]. Это определило повышенное внимание к обеспечению и прогнозированию эксплуатационной надежности и трещиностойкости – способности металла сопротивляться распространению трещин – по результатам лабораторных и полномасштабных полигонных (натурных) испытаний, требующих существенных затрат [3; 4; 5].

Главное достоинство полигонных испытаний заключается в учете масштабного фактора: исследуются свойства самой трубы в условиях, приближенных к условиям эксплуатации. Основной недостаток – низкая статистическая значимость, так как невозможно исследовать на разрушение каждую трубу. К тому же при полигонных испытаниях крайне сложно поддерживать стабильными многие значимые параметры: температуру трубы, качество ее засыпки грунтом, характеристики газа-наполнителя и т.д.

Лабораторные испытания существенно дополняют полигонные, поскольку позволяют проводить относительно простые испытания большого числа образцов при строго определенных условиях. Однако напряженно-деформированное состояние в образцах отличается от того, которое имеется в трубе, а химический состав, структура и механические свойства металла трубы (листа) могут варьироваться в определенных пределах.

Целью настоящей работы явилось изучение механизмов разрушения основного металла газопроводных сварных труб класса прочности X80 (K65) при натурных и лабораторных испытаниях и выявление на этой основе основных параметров, характеризующих их трещиностойкость.

Материалы и методы исследования

Исследованы образцы, вырезанные из труб диаметром 1420 мм с толщиной стенки 27,7 мм после полигонных испытаний. Химический состав исследованных сталей приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемых сталей, масс. %

N	C	Mn	Si	S	P	V	Nb	Ti	Cu	Mo
1	0,05	1,81	0,20	0,008	0,014	0,02	0,05	0,02	0,24	0,22
2	0,05	1,81	0,21	0,002	0,009	0,03	0,07	0,02	0,03	0,02
3	0,05	1,84	0,20	0,009	0,013	0,03	0,07	0,02	0,06	0,22
4	0,07	1,67	0,27	0,002	0,007	0,02	0,05	0,01	0,18	0,20

Испытания на ударную вязкость проводились по ГОСТ 9454-78 на образцах Шарпи сечением $10 \times 10 \text{ мм}^2$ в диапазоне температур от $+20$ до -90 °С.

Фрактографический анализ изломов включал в себя выделение на поверхности разрушения зон: L_C – сдвиговой (стабильного роста магистральной трещины) и L_B – волокнистой, где, как и в зоне L_C , происходит преимущественно вязкое разрушение (рис. 1). Замер их величины проводился в направлении распространения магистральной трещины на фрактограммах, полученных при десятикратном увеличении.

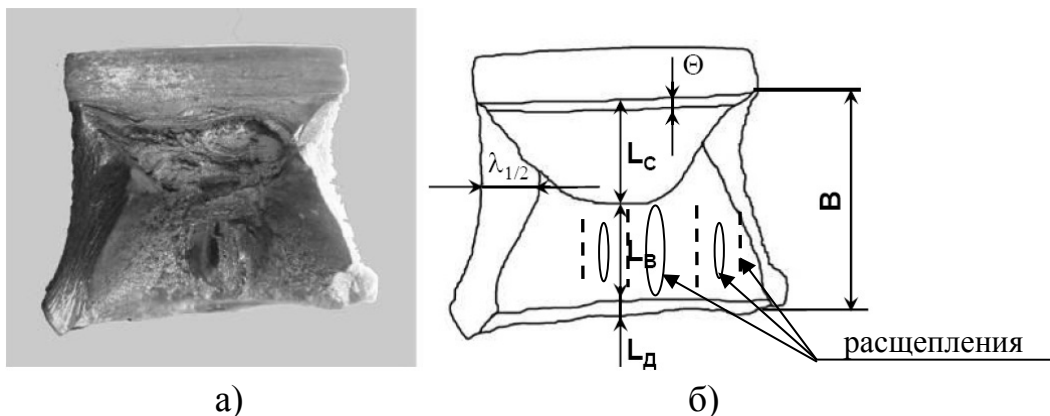


Рис. 1. Поверхность разрушения ударного образца, $\times 5$ (а) и схема расположения зон и расщеплений в изломе (б)

Рассчитывалось отношение линейных размеров зон к высоте образца в месте надреза (B), которое не зависит от его размера, т.е. обладают свойством подобия. На поверхности изломов имеются очаговые трещины – расщепления (РЩ), располагающиеся преимущественно в волокнистой зоне L_B (рис. 1).

Оценивались следующие параметры расщеплений:

1) площадь, занимаемая ими на поверхности излома $S_{рщ}$, принимая, что форма РЩ близка к эллипсовидной:

$$S_{рщ} = \frac{\pi \cdot l_{рщ} \cdot b_{рщ}}{4} \cdot n, \quad (1)$$

где $l_{рщ}$ и $b_{рщ}$ – длина и ширина отдельных расщеплений, соответственно, n – их число;

2) относительное количество $n_{отн}$ (исходя из представлений, что рост РЩ происходит путем объединения мелких):

$$n_{отн} = \frac{\sum l_{рщ}}{l_{рщ}^{min}}, \quad (2)$$

где $\sum l_{рщ}$ – суммарная длина всех расщеплений, $l_{рщ}^{min}$ – длина минимального расщепления на поверхности излома данного образца;

3) плотность расщеплений $\rho_{рщ}$:

$$\rho_{рщ} = \frac{n_{отн}}{S_{L_B}}, \quad (3)$$

где S_{L_B} – площадь волокнистой зоны L_B .

Вследствие того, что определить с высокой точностью $S_{рщ}$ сложно, то при оценке интенсивности этого процесса параметр $\rho_{рщ}$ представляется более объективным, чем $S_{рщ}$.

Испытания на статическую трещиностойкость проводились по стандарту BS 7448-1 на полнотолщинных компактных образцах размером $B \times 2B$, где B – толщина образца, при температуре -20 °С. Механический надрез на образцах и, соответственно, усталостная трещина располагались вдоль направления прокатки листа, перпендикулярно наружной поверхности трубы. Для установки экстензометра по линии нагружения образца на образцы наносили ступенчатый механический надрез.

Результаты и их обсуждение

Расщеплениями называются особый тип очаговых трещин, которые могут быть на поверхности изломов после испытаний на растяжение, ударный изгиб, статическую трещиностойкость, падающим грузом, а также при вязком распространении трещины в современных трубах большого диаметра [4–8].

Возникновение РЩ в современных сталях не связано с неметаллическими включениями в стали, а обусловлено особенностями формирования микроструктуры при прокатке листа [5–8], что определяет их строго определенную ориентацию (рис. 2а).

В изломе труб, образцов Шарпи и компактных образцов, применяемых для исследования статической трещиностойкости, РЩ, как правило, находятся целиком в волокнистой зоне L_B и весьма редко «заходят» в сдвиговую зону или зону усталостной трещины (рис. 2).

Установлено, что в рельефе боковых поверхностей РЩ имеется значительная доля хрупкой составляющей (рис. 3). В то же время в окрестностях РЩ и между ними наблюдается чисто вязкий чашечный излом, подобный тому, который формируется в сдвиговой зоне.

Испытания на ударный изгиб показали сходные зависимости KCV от температуры испытаний в интервале $+20 \dots -90$ °С для сталей 1 и 2. Высокие значения KCV ($350\text{--}360$ Дж/см²) при $T_{\text{исп}} = -20 \dots +20$ °С соответствуют практически постоянной величине L_B/V на уровне 55-60 %, а снижение KCV сопровождается ростом L_B/V вплоть до $T_{\text{исп}} = -60$ °С (рис. 4а). При $T_{\text{исп}} = -90$ °С зона L_B , и на поверхности излома появляется область хрупкого скола. Первые РЩ в изломах образцов обеих сталей появляются в зоне L_B при $T_{\text{исп}} = -20$ °С, и при понижении $T_{\text{исп}}$ вплоть до -60 °С включительно их плотность и площадь интенсивно возрастают (рис. 4а).

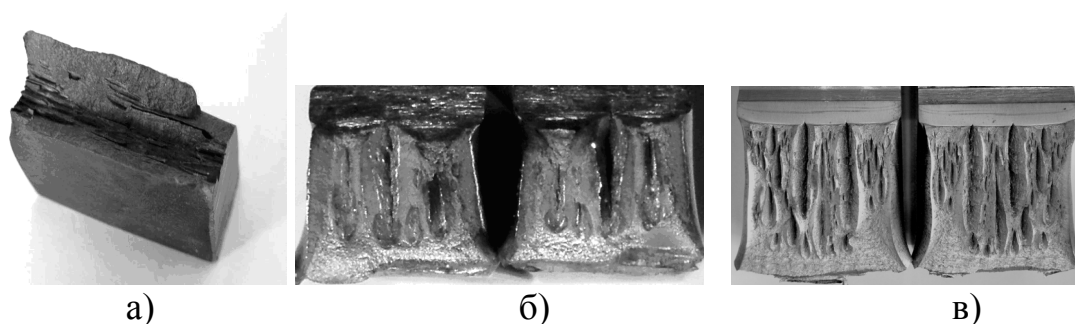


Рис. 2. Расщепления на поверхности разрушения: а) трубы после полигонных испытаний; б) образца Шарпи после испытаний на ударный изгиб; в) компактного образца после испытаний на трехточечный изгиб

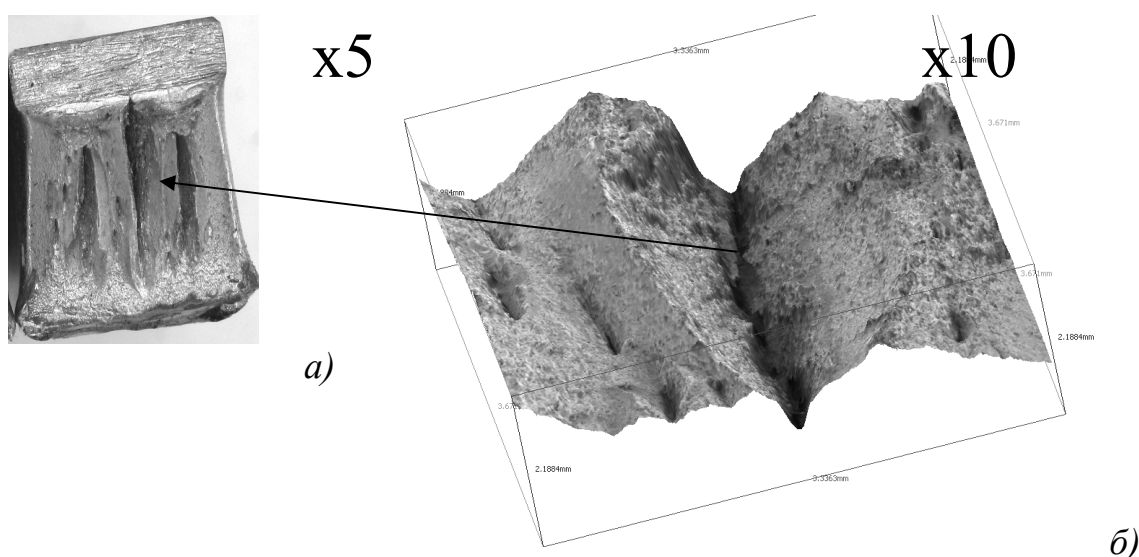
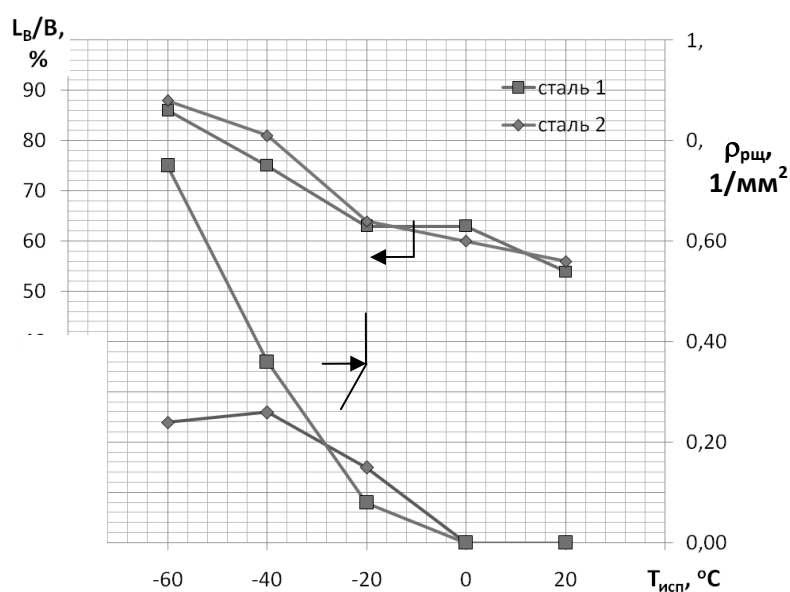


Рис. 3. Поверхность разрушения (а), 3D-модель поверхности излома (б) образца Шарпи ($T_{\text{исп}} = -60$ °С), вырезанного из стали 2

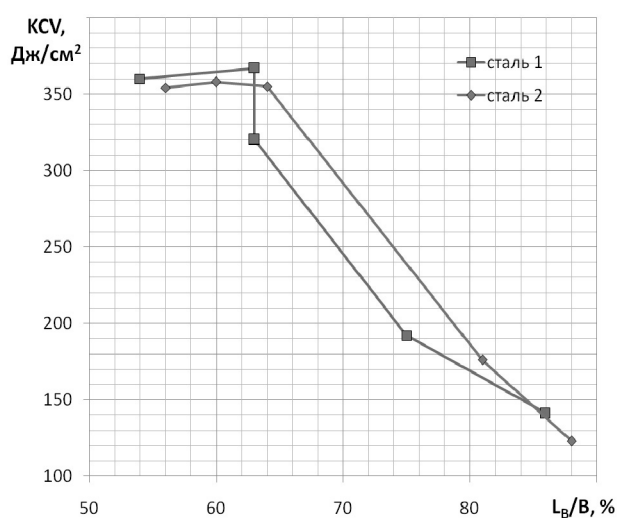
Морфология РЩ (форма и расположение на поверхности) одинакова во всех изученных сталях, что позволяет по морфологическим признакам условно разбить их на 3 группы. Мелкие РЩ длиной $l_{рщ} \leq \frac{1}{4} L_B$. Ширина таких узких РЩ $b_{рщ} \approx 1$ мм, они располагаются строчками вдоль длинной оси зоны L_B и составляют относительное большинство в любом изломе (рис. 2). К ним же можно отнести сверхмелкие РЩ $l_{рщ} \leq 0,5$ мм.

Средние РЩ $l_{рщ} \leq \frac{1}{2} L_B$, шириной $b_{рщ} = 0,6-1,7$ мм, для которых не очень четко появляется тенденция увеличения $b_{рщ}$ с ростом длины.

Крупные РЩ $l_{рщ} \approx L_B$ вытянуты через всю зону L_B и крайне редко проникают в зону L_C . В изломе образцов Шарпи обычно имеется от 1 до 3 крупных РЩ, которые расположены всегда в центре излома или симметрично вблизи него (рис. 2).



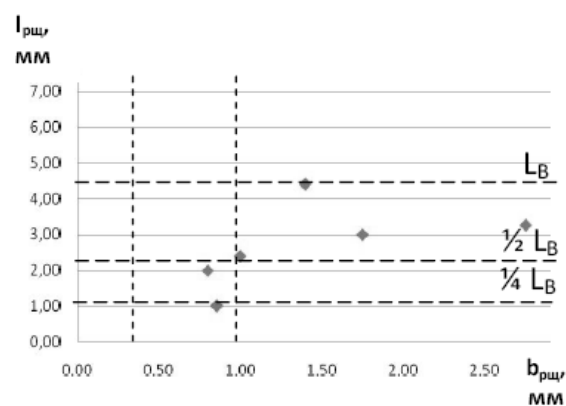
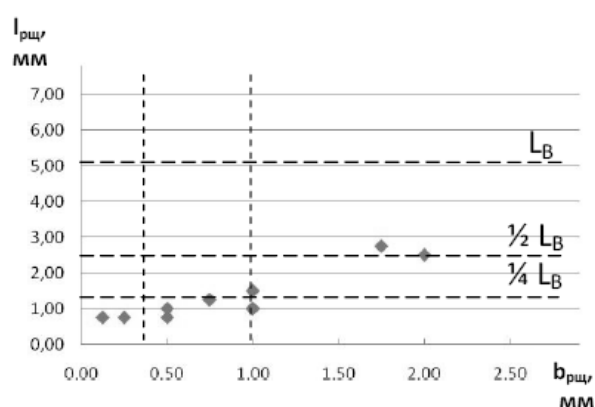
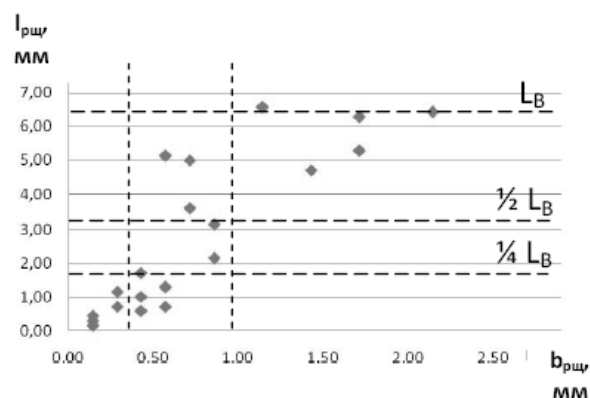
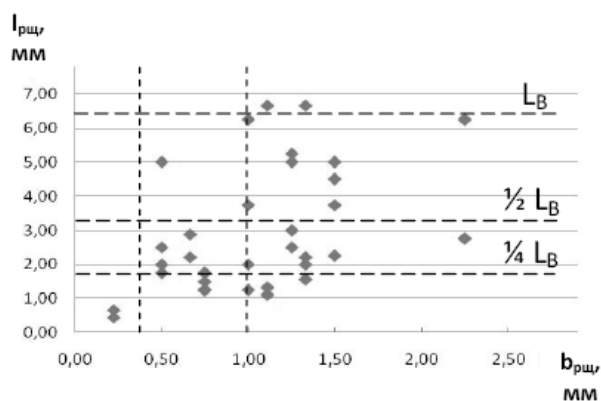
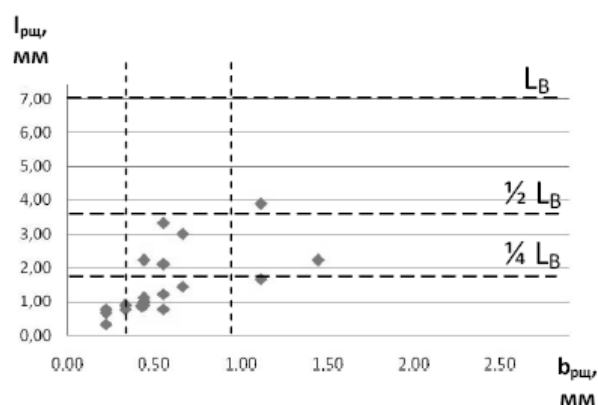
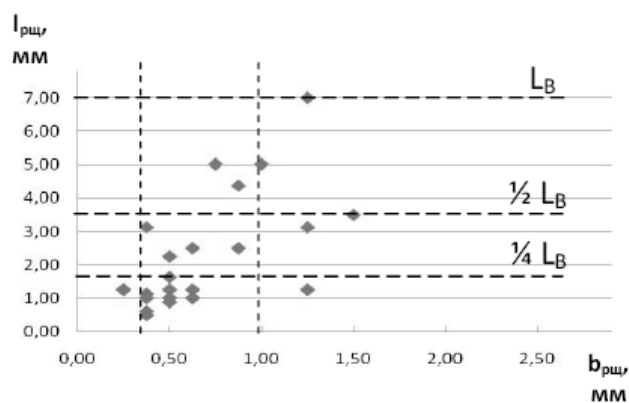
а)



б)

Рис. 4. Влияние температуры испытаний на относительную длину зоны L_B/V (а) и соотношение $KCV-L_B/V$ (б) для сталей 1 и 2

Между крупными (средними) РЦ имеются цепочки мелких, также типичные для периферии зоны L_V со стороны губ среза. Эволюция размеров и количества РЦ при понижении $T_{исп}$ видна на рис. 5.

$$T_{исп} = -20^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{исп}} = -40^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{исп}} = -60^{\circ}\text{C}$$


a)

6)

Рис. 5. Длина $l_{pц}$ и ширина $b_{pц}$ расщеплений в изломах образцов Шарпи, вырезанных из труб состава 1 (а) и состава 2 (б)

Расположение мелких РЩ в виде строчек, параллельных направлению распространения МТ, как и вытянутость всех РЩ вдоль этого направления, позволяет предполагать, что их рост происходит путем слияния отдельных РЩ в строчках при разрушении перемычек между ними и одновременным утолщением (расширением) при смещении их берегов на расстояния примерно пропорциональные удлинению. Так, средние РЩ ($l_{рщ} = 2-3$ мм) образуются путем слияния ~2 мелких ($l_{рщ} = 0,8-1,2$ мм), расположенных рядом в строчке, крупных ($l_{рщ} = 4-6,5$ мм) при объединении ~2 средних.

Как видно на поверхности излома (рис. 2), укрупнение РЩ происходит в окрестностях центра образца, где располагаются РЩ длиной $l_{рщ} \approx L_B$ и действуют максимальные растягивающие напряжения σ_z , перпендикулярные к оси РЩ (направлению прокатки листа).

Близость характеристик разрушения (величины и температурного хода KCV, L_B , $S_{рщ}$ и $\rho_{рщ}$) сталей 1 и 2 позволяет считать, что некоторые различия между параметрами РЩ ($l_{рщ}$ и $b_{рщ}$) при одинаковых $T_{исп}$ (рис. 5) находятся в пределах статистического разброса, что дает возможность рассматривать их совместно и находить общие тенденции их изменения при снижении $T_{исп}$.

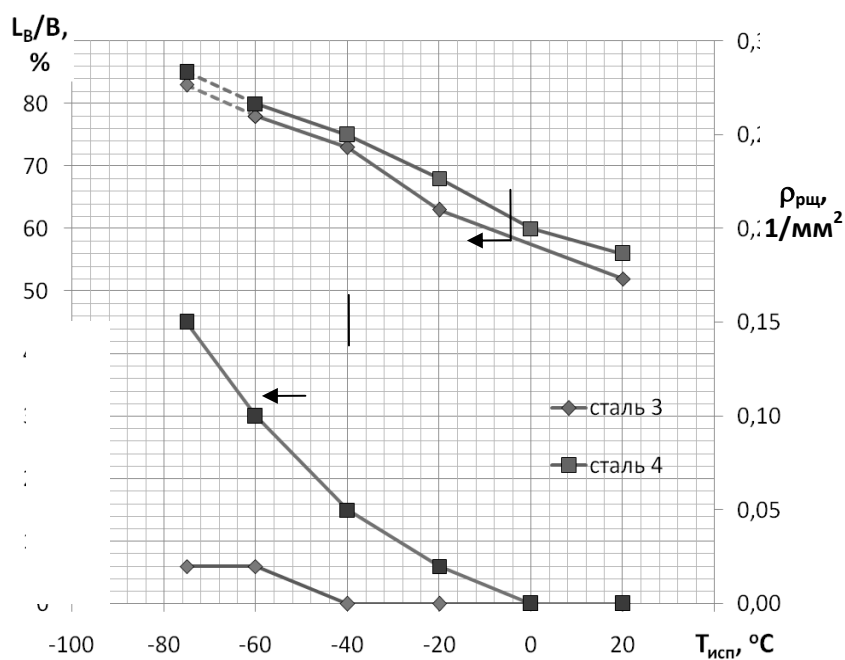
При появлении первых РЩ ($T_{исп} = -20$ °С) наряду с мелкими РЩ успевают сформироваться несколько крупных (средних) РЩ максимальной большей ширины ($b_{рщ} \geq 2,5$ мм) (рис. 5). Важно, что KCV остается на прежнем высоком уровне (как и при $T_{исп} > -20$ °С) при постоянной величине L_B/V .

При $T_{исп} = -40$ °С в образцах обеих сталей создаются оптимальные условия для возникновения и роста РЩ, что проявляется в наибольших значениях количества и ширины крупных и, особенно, средних РЩ (рис. 5).

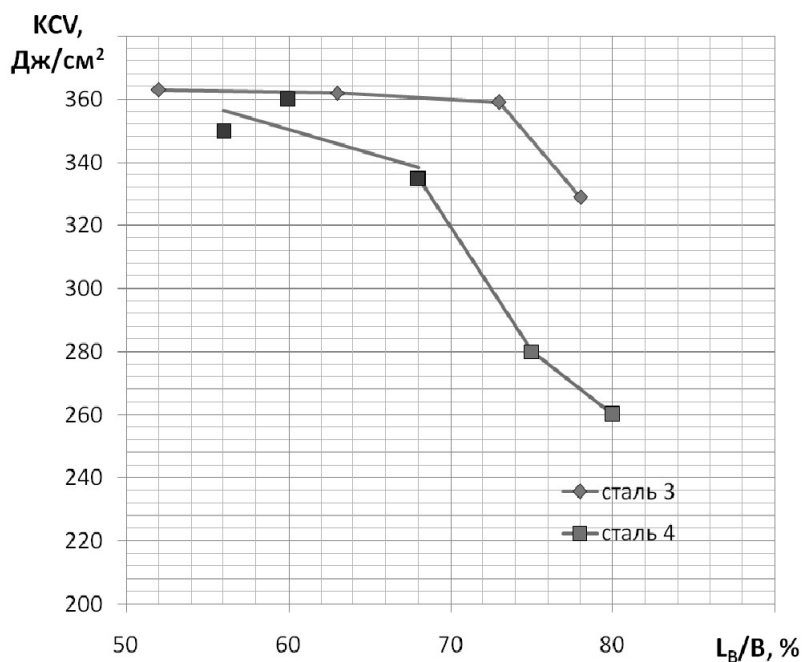
Дальнейшее снижение температуры до $T_{исп} = -60$ °С сопровождается падением энергоемкости разрушения (KCV) при наибольшей величине L_B/V и $\rho_{рщ}$, хотя $S_{рщ}$ продолжает увеличиваться или оставаться на том же уровне, что и при $T_{исп} = -40$ °С. При этом уменьшается число средних РЩ, иногда полностью исчезают крупные РЩ и, что особенно типично, понижается их ширина (рис. 5). Низкая $T_{исп}$ не способствует раскрытию РЩ и их росту.

Трубы из сталей 3 и 4 обладают значительно большим запасом вязкости, чем трубы из сталей 1 и 2 (рис. 6). Высокий уровень ударной вязкости ($KCV \geq 325$ Дж/см²) в трубе из листа состава 4 сохраняется вплоть до $T_{исп} = -60$ °С, в трубе из листа состава 3 составляет $KCV^{40} = 275$ Дж/см², а при снижении температуры до $T_{исп} = -60$ °С уменьшается только на 15 Дж/см².

Абсолютные значения параметра L_B/V и его температурный ход для образцов всех сталей близки (рис. 4 и 6). Кривые KCV- L_B/V также состоят из двух участков. Примечательно, что начало второго участка, когда для всех изученных сталей KCV становится чувствительной к L_B/V , совпадает с появлением в изломе образцов Шарпи первых РЩ. Однако в стали 4 при $T_{исп} = -60$ °С на поверхности излома только одного из трех испытанных образцов обнаруживаются небольшие почти равноосные, глубокие РЩ. При $T_{исп} = -75$ °С ситуация по РЩ в образцах стали 4 остается примерно такой же, как при $T_{исп} = -60$ °С, хотя точно определить величину зоны L_B весьма затруднительно из-за появления в изломе областей хрупкого скола.



a)



б)

Рис. 6. Влияние температуры испытаний на относительную длину зоны L_B/V (a) и соотношение $KCV-L_B/V$ (б) для сталей 3 и 4

Первые крупные РЩ в образцах, вырезанных из трубы состава 3, появляются при $T_{исп} = -20 ^\circ C$, и при дальнейшем снижении температуры испытаний $\rho_{РЩ}$ возрастает вплоть до $-75 ^\circ C$ (рис. 6a).

Использование полнотолщинных образцов позволяет в значительной степени приблизить условия трещинообразования в образцах к тем, которые формируются в стенке трубы. Характерным для изломов образцов, испытанных на статическую трещиностойкость, являются крайне небольшой размер сдвиговой зоны L_C и несимметричность

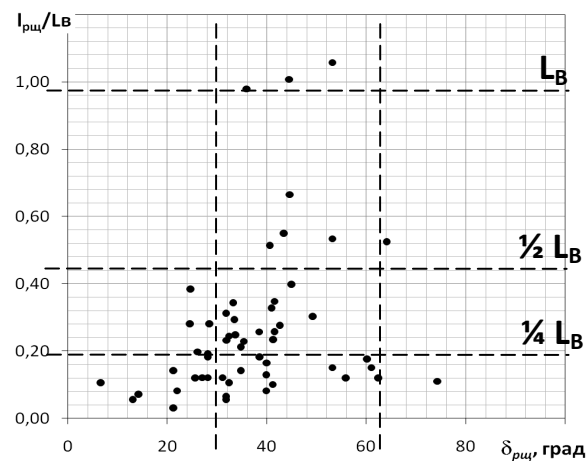
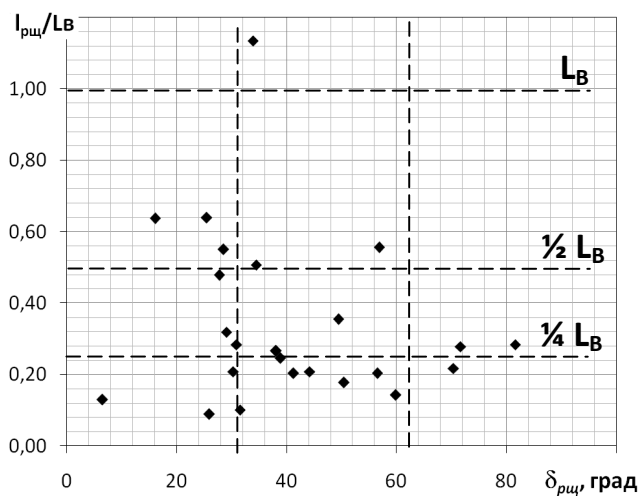
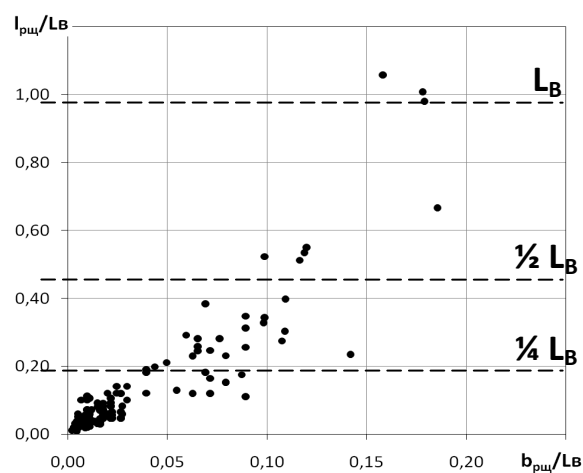
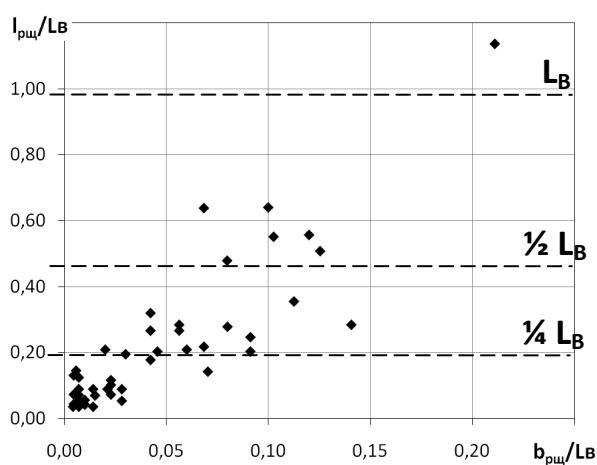
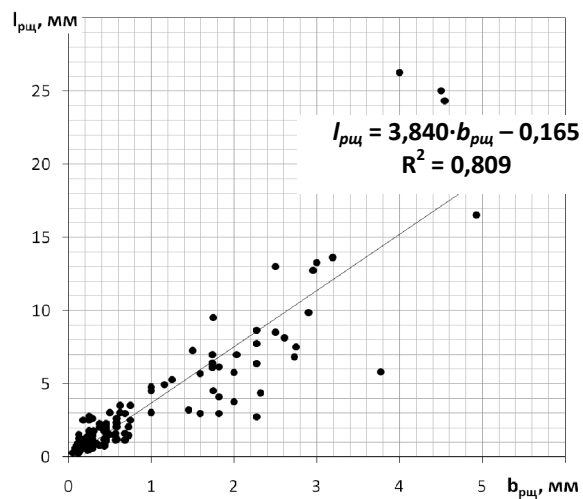
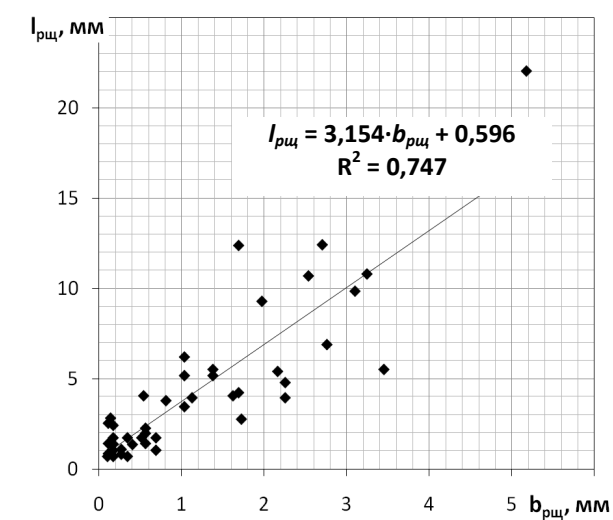
расположения зон (и, соответственно, расщеплений) относительно центра излома. Вероятно, эти особенности связаны с параметрами усталостной трещины, которая является инициатором развития магистральной трещины.

На поверхности излома имеются одно или несколько крупных РЩ вблизи центра, длина которых может достигать величины зоны L_B и иногда выходить за ее пределы. При приближении к периферии зоны L_B в сторону губ среза длина и ширина РЩ снижаются, а количество их может возрастать. При этом наблюдается тенденция к расположению средних и мелких РЩ в виде строчек, что позволяет предполагать, что укрупнение РЩ также, как в образцах Шарпи, происходит за счет объединения мелких очаговых трещин в строчке при разрушении перемычек между ними. При $T_{исп} = -20$ °С большая часть РЩ в образцах сталей 3 и 4 сохраняет малую длину ($l_{рщ} < 3$ мм) и ширину ($b_{рщ} < 0,8$ мм) (рис. 7). С увеличением длины расщеплений ($l_{рщ} > \frac{1}{4} L_B$) увеличиваются и их ширина, как и угол раскрытия $\delta_{рщ}$, а количество их снижается.

Эволюцию геометрических размеров расщеплений можно оценить по углу их раскрытия $\delta_{рщ}$, который является косвенным показателем способности материала релаксировать напряжения. Видно (рис. 7), что в стали состава 4 расщепления преимущественно растут в глубину и ширину, что обуславливает повышение $\delta_{рщ}$, тогда как в металле состава 3 большинство расщеплений имеет относительно малый угол раскрытия ($\leq 40^\circ$). Об этом же свидетельствуют уравнения регрессии, описывающие соотношения между $l_{рщ}$ и $b_{рщ}$ (рис. 7) и темпы роста РЩ. Следовательно, сталь 4 способна более глубоко релаксировать напряжения (замедлять возникновение и рост РЩ), чем сталь 3.

Фрактографические параметры компактных образцов (L_B , $l_{рщ}$, $b_{рщ}$, $\delta_{рщ}$), как и характеристики трещиностойкости (δ – критическое раскрытие в вершине трещины и J-интеграл) [6], показывают, что трубы из листа состава 4 обладают более высокой трещиностойкостью, чем трубы из листа состава 3. Об этом свидетельствуют уравнения регрессии, описывающие соотношения между $l_{рщ}$ и $b_{рщ}$ (рис. 7), т.е. интенсивность «роста» РЩ.

Важно, что результаты испытаний на статическую трещиностойкость совпадают с энергетическими и фрактографическими данными исследований ударной вязкости на образцах Шарпи. Тожественность в морфологии, характере распределения, эволюции РЩ в образцах, разрушенных по различным видам и скоростям нагружения, отображает физическую общность механизмов образования и роста РЩ, что позволяет найденные на образцах закономерности этого явления с определенной осторожностью переносить на поведение аналогичных очаговых трещин в стенке сварных труб, разрушенных при натурных (полигонных) испытаниях.



a)

б)

Рис. 7. Фрактографические параметры расщеплений ($l_{pц}/L_B$ – относительная длина, $b_{pц}/L_B$ – относительная ширина, $\delta_{pц}$ – угол раскрытия) в изломах полнотолщинных компактных образцов труб из листа состава 3 и 4

Закключение

По своей природе все четыре изученные стали являются высоковязкими, обладающими в диапазоне температур испытания $+20...-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $KCV \approx 350\text{ Дж/см}^2$. Столь крайне высокий уровень KCV во многом связан с формированием при разрушении в районе комнатных температур большой сдвиговой зоны ($L_C/B \approx 40\%$). Однако данные характеристики не гарантируют трещиностойкость, необходимую для остановки протяженного вязкого разрушения в трубопроводе. Проведенные исследования позволяют выделить наиболее значимые параметры, ответственные за трещиностойкость изученных сварных труб (табл. 2). К ним, в первую очередь, нужно отнести уровень KCV при $T_{исп} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$, который по техническим требованиям Газпрома должен быть не менее 250 Дж/см^2 [2], чему соответствует относительная величина волокнистой зоны $L_B/B \leq 78\%$ [4].

По своей природе разрушение в волокнистой зоне является вязким и типичным для большинства конструкционных сталей. Относительно высокая величина L_B/B не свидетельствует о пониженной трещиностойкости сталей без анализа характеристик особенностей излома в этой зоне.

Таблица 2

Энергетические и фрактографические параметры трещиностойкости труб различных производителей

Сталь	$T_{исп}, ^{\circ}\text{C}$, (L_B/B , %) появления РЩ	$T_{исп}, ^{\circ}\text{C}$, при $\rho_{рщ}^{\max}$	Трещино-стойкость
1	-20 (63)	-40	низкая
2	-20 (57)	-40	низкая
3	-20 (68)	-75	удовлетв.
4	-60 (73)	-65...-75	высокая

Особенностью данных сталей является то, что первоначальное снижение KCV с понижением $T_{исп}$ происходит не благодаря появлению хрупкой зоны $L_{хр}$, а при возникновении и увеличении количества РЩ и занимаемой ими площади. У первых трех сталей РЩ появляются при $T_{исп} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и только у стали 4 при $T_{исп} = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (табл. 2). Это подтверждается и максимальной величиной $L_B/B = 73\%$ при появлении первых РЩ. У сталей с высокой трещиностойкостью темп увеличения плотности РЩ и площади, занимаемой ими, замедленный, а низкая $T_{исп}$, когда плотность РЩ ($\rho_{рщ}$) достигает максимума.

Список использованных источников

1. Морозов Ю.Д., Матросов М.Ю., Настич С.Ю., Арабей А.Б. Высокопрочные трубные стали нового поколения с феррито-бейнитной структурой // *Металлург*. 2008. № 8. С. 39–42.
2. Арабей А.Б. Развитие технических требований к металлу труб магистральных трубопроводов // *Известия вузов «Черная металлургия»*. 2010. № 7. С. 3–10.
3. Русакова В.В., Лобанова Т.П., Арабей А.Б., Пышминцев И.Ю. [и др.] Организация комплексных исследований отечественных труб для новых магистральных газопроводов нового поколения // *Наука и техника в газовой промышленности*. 2009. № 1. С. 17–21.
4. Фарбер В.М., Хотинков В.А., Арабей А.Б., Пышминцев И.Ю. [и др.] Фрактографическая диагностика трещиностойкости труб группы прочности X80 (K65) по результатам испытаний ударной вязкости : труды XVIII Межд. науч.-техн. конф. «Трубы-2010» // сб. докл. Челябинск: РосНИТИ, 2010. С. 108–116.
5. Пышминцев И.Ю., Мальцева А.М., Гервасьев А.М., Смирнов М.А., Корзников А.В. Структура и свойства низкоуглеродистых сталей, подвергнутых пневматическим испытаниям // *Сталь*. 2011. №2. С. 75–81.
6. Насыбулина Е.Р., Струин А.О., Широков В.В. К вопросу определения трещиностойкости современных трубных сталей класса прочности K65 : труды XVIII Межд. науч.-техн. конф. «Трубы-2010» // сб. докл. Челябинск: РосНИТИ, 2010. С. 122–126.
7. Орлов В.В., Ильин А.В., Хлусова Е.И. [и др.] Влияние структурной неоднородности на механические свойства и характеристики работоспособности высокопрочных трубных сталей класса прочности X70-X100 // Труды XVIII Межд. науч.-техн. конф. «Трубы-2010» // сб. докл. Челябинск: РосНИТИ, 2010. С. 67–77.
8. Mannucci G., Demofonti G. Control of ductile fracture propagation in X80 gas pipeline // *Int. Pipeline Technology Conf.: thesis proceedings*. Beijing, 2010. P. 86–115.