

К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ОСТАНОВКИ ВЯЗКОГО ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА НА КОРОТКОМ УЧАСТКЕ ТРУБОПРОВОДА

TO FORECASTING OF A STOP OF VISCOUS FORMATION OF CRACKS OF PIPES OF BIG DIAMETER ON A SHORT SITE OF THE PIPELINE

В.Н. Лозовой, кандидат технических наук
ОАО "Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности")
454139, Челябинск, ул. Новороссийская, 30
rosniti@rosniti.ru

Для оценки работоспособности трубопроводов были разработаны методики выявления потери пластичности и перехода в хрупкое состояние металлов с определением доли вязкой составляющей в плоскости осевого разрыва образцов на копре падающим грузом, а также выявлением критической температуры перехода металла в хрупкое состояние на основании ударной вязкости металла при испытании металла на изгиб. Вводя испытания надрезанного образца при ударе на изгиб, Лешателье и Шарпи (1900 г.) [1] имели целью упростить образец и устройство нагружения, поскольку маятниковый копер проще разрывной машины.

Однако, как показано в работах [2, 3], схема нагружения и скорости деформации при изгибе образцов по Шарпи не соответствуют наблюдающимся при формировании магистральной трещины в трубопроводе. Получаемые критические температуры являются только сравнительными величинами и не дают представления о температурах, при которых будет иметь место хрупкое разрушение при реальном нагружении трубы в условиях эксплуатации. Однако благодаря простоте замера ударной вязкости и до настоящего времени практически все теоретические и практические работы по оценке стойкости трубопровода базируются на оценке величины ударной вязкости металла труб.

В 50-60-х годах прошлого века [4] была проблема хрупкого разрушения трубопровода. Трещина хрупкого разрушения не имеет прямолинейного вида, а распространяется вдоль оси трубы по ломанной кривой с образованием так называемого «шеvronного» узора. «Шевронный» узор имеет определённую ширину, а каждое изменение кривой происходит по прямым хрупкого разрушения по углам примерно 45 градусов относительно оси трубы с наличием участков распространения трещины по оси трубы.

В работе [5] дано пояснение формированию такого «шеvronного» узора хрупкой магистральной трещины. Показано, что на первой стадии впереди формирующейся трещины под действием раскрывающихся стенок трубы возникают малые пластические деформации растяжения металла, которые приводят к образованию перед вершиной трещины мелкой сетки трещин, которые далее углубляются в зону хрупкого разрушения стенки. Формирование такого «шеvronного» узора, как это показано выше, связано с направлениями усилий растяжения стенок трубы перед вершиной трещины, которые при хрупком трещинообразовании

практически совпадают по направлению с кольцевым усилием $Q_{\text{кольц}}$.

Направление микротрещин в поверхностном слое стенки трубы при хрупком разрушении трубопровода задается максимальными касательными напряжениями $\tau_{\text{макс}}$, направленными в плоскости стенки трубы под углом 45° от усилий растяжения металла перед вершиной трещины ($Q_{\text{кольц}}$) [6,7].

Скорость такого хрупкого трещинообразования достигает 1800 м/сек и магистральное хрупкое трещинообразование может распространяться практически на всю длину трубопровода, поскольку его скорость значительно превышает скорость разгерметизации газа (скорость разгерметизации равна скорости звука в газе, т.е., примерно, 320-340 м/сек).

Так, в 1960 г. во время испытания газом трубопровода диаметром 762 мм хрупкое разрушение распространилось на 13 км. Остановка хрупкого разрушения произошла, когда хрупкая трещина вошла в трубу, имеющую температуру перехода в хрупкое разрушение ниже, чем температура разрушения. При этом характер разрушения сменился на вязкий и трещина остановилась.

Прогресс развития металлургических и трубных технологий позволил решить проблему достижения комплекса необходимых служебных свойств стали посредством новых принципов упрочнения, заключающихся в переходе от малоперлитных сталей к материалам с меньшим содержанием углерода и со значительной долей более низкотемпературных продуктов превращения в структуре с получением структуры, представляющей матрицу полигонального феррита с совершенной субзеренной структурой. Получение такой структуры связано с деформацией в нижней части ($\gamma + \alpha$) области. Это позволило обеспечить повышение группы прочности стали вместе с её прочностными характеристиками и со снижением порога хладноломкости до температур ниже минус 60°C .

В связи малым опытом строительства магистральных газопроводов из высокопрочных труб со структурой металла труб, сформированной на основании новых принципов упрочнения стали, для проведения испытаний таких труб ОАО «Газпром трансгаз Екатеринбург» оборудовало полигон на базе ООО «КЗИТ» (Копейский завод изоляции труб). В полномасштабных полигонных испытаниях оценивается способность труб противостоять развитию протяженного разрушения труб магистральной трещиной.

После обеспечения требуемого давления в трубах и охлаждения металла труб трещинообразование инициируется с помощью кумулятивного заряда, который устанавливается на т.н. разгонной трубе до начала испытаний. Согласно методики испытаний за длину трещинообразования, которая считается допустимой с точки зрения оптимальной стойкости трубопровода, была принята длина трещины не более длины трёх труб, т.е. длина трещины порядка 33 м.

Начиная с марта 2008г. была проведена серия пневматических испытаний труб диаметром 1420 мм группы прочности X80 с толщиной стенки от 23,0 мм до 33,4 мм таких производителей листового проката и труб как NipponSteelCorporation, DillingerHuette, ОАО «Северсталь», SumitomoMetalIndustries, Posco, SalzgitterMannesmann, JFSteelCorporation, ОАО «Волжский трубный завод», ОАО «Выксунский металлургический завод», ОАО «ЧТПЗ», ОАО «ММК», ЗАО «Ижорский трубный завод», EuropipeGmbH.

Во всех испытываемых трубах наблюдалось вязкое трещинообразование с гладким прямолинейным направлением распространения магистральной трещины. Стенка трубы в прикромочной области получает утяжку в результате деформации удлинением как в продольном, так и в поперечном направлении. Из приведенного рис. 1, иллюстрирующего полигонные испытания, видно, что в результате удлинения стенки в продольном направлении в прикромочной области образуется значительная волнистость стенки с амплитудой, пропорциональной удлинению стенки трубы.



Рис. 1. Вязкое трещинообразование трубопровода

При испытаниях наблюдались случаи как остановки трещинообразования в пределах трех труб, так и остановки на длине, превышающей длину трех труб. Однако вязкое трещинообразование во всех прошедших испытаниях трубах после прохождения трещиной определённого участка по длине трубы получило остановку отклонением трещины от прямолинейного трещинообразования с закольцовыванием трещины (рис. 2).



Рис. 2. Остановка вязкого трещинообразования закольцовыванием

Полученные результаты были оценены с прогнозированием результатов по известным методикам. Так, наиболее распространенный метод прогнозирования трещинообразования – это предложенный институтом Баттели метод «двух кривых» (BattelleTwoCurves-BTC). Согласно метода оценивается уровень ударной вязкости, необходимой для предотвращения протяженного разрушения. Для определения требуемой для остановки трещины ударной вязкости необходимо сопоставить зависимости «давление-скорость» для двух процессов – декомпрессия и распространение трещины, построенных по эмпирическим зависимостям. При пересечении кривых декомпрессия не может идти быстрее скорости распространения трещины и разрушение будет продолжаться бесконечно. Если же кривые не пересекаются, то скорость декомпрессии в вершине трещины будет выше, чем скорость распространения трещины. В этом случае со снижением давления обеспечивается остановка трещины [8, 9].

Анализ результатов полигонных испытаний показал, что существующие методики не обеспечивают достоверное прогнозирование вязкого трещинообразования труб повышенной прочности. Расчеты значений ударной вязкости, требуемой для остановки вязкого разрушения, выполненные по одним методикам, показали, что для остановки вязкого разрушения необходима ударная вязкость выше 400 джоуль/см^2 . Однако при натуральных испытаниях наблюдалась остановка вязкой трещины в пределах трех испытываемых трубах при вязкости не выше $250\text{-}350 \text{ джоуль/см}^2$.

Расчеты необходимой ударной вязкости, выполненные по другим методикам, в частности по методике Баттели, дали необходимую ударную вязкость порядка 200 джоуль/см^2 , но как показали натурные испытания, в трубах и со значительно более высокой ударной вязкостью длина вязкого роста трещин превысила длину трёх труб (остановка трещины произошла в буферной трубе).

Установлено, что способность основного металла труб тормозить разрушение связана со способностью металла к пластической деформации металла перед вершиной распространяющейся трещины. Трубы группы прочности X80(K65), в которых при распространении трещины ширина зона пластических деформаций составляла 400-500 мм и утяжка стенки трубы была примерно 20-25%,

успешно выдержали испытание. Вязкая трещина в них остановилась в пределах трех труб. В трубах, в которых трещины прошла все три испытываемые трубы, ширина зона пластических деформаций составляла 250-300 мм, а утяжка по толщине стенки была ниже 15%. Таким образом, показано, что помимо высоких значений ударной вязкости металла еще одним параметром, отражающим способность труб останавливать вязкое трещинообразование, является пластическая деформация стенок трубы перед вершиной образующейся трещины при температурах и скоростях деформации, имеющих место при эксплуатации трубопровода.

В работах [10, 11] обоснованы причины остановки вязкого трещинообразования закольцовыванием. Показано, что остановка закольцовыванием вязкого трещинообразования связана с тем, что при вязком трещинообразовании результирующие вектора растяжения стенки перед трещиной $Q_{рез}$ отклонены от векторов кольцевых усилий $Q_{кольц}$. Это приводит к отклонению плоскости деформации сдвига от прямолинейного направления, который задают вектора $Q_{кольц}$. При таком изменении направления плоскостей деформации сдвига сменяется и направление вязкого трещинообразования. Происходит отклонение трещинообразования от оси трубы, а вместе с плавным поворотом гладкой линии вязкого трещинообразования происходит закольцовывание трещины с остановкой трещины после прохождения примерно половины периметра трубы (рис.2).

На рис. 3 и 4 показаны причины отклонения направления вязкого трещинообразования от прямолинейного направления с закольцовыванием.

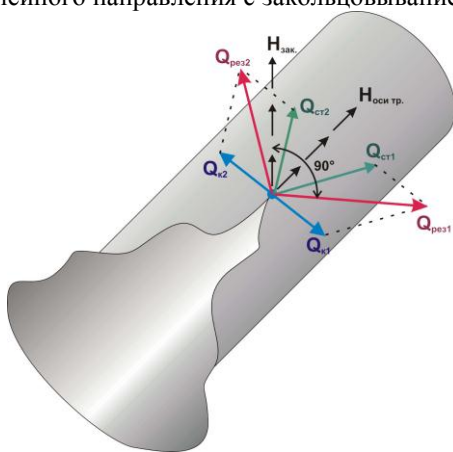


Рис. 3. Причина отклонения направления трещинообразования от прямолинейного направления с дальнейшим закольцовыванием в одну сторону или одновременно в две стороны с раздваиванием трещины

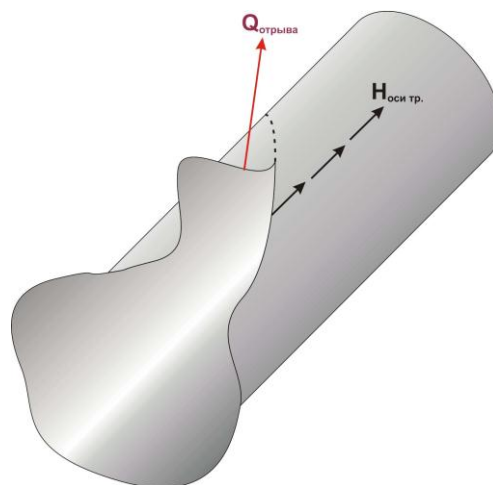


Рис.4. Остановка вязкой трещины с закольцовыванием её в одну сторону ($Q_{отр}$ - усилие отрыва)

Однако, как показано выше, при сохранении вязкого характера трещинообразования высокие значения ударной вязкости испытаний на изгиб не гарантируют закольцовывание на длине магистральной трещины в пределах трех испытываемых труб. На основании этого можно сделать вывод, что величина ударной вязкости металла является необходимой характеристикой для оценки порога хладноломкости металла, но не достаточной для прогнозирования остановки магистральной трещины на коротком участке трубы

Это может быть связано с тем, что в металле, полученном контролируемой прокаткой, повышается текстурированность металла. В результате этого могут иметь место «расщепления» при испытании на изгиб по Шарпи [20]. Вследствии расщеплений повышается площадь поверхности разрушения значительно увеличена получаемая величина ударной вязкости по Шарпи.

Зависимость трещинообразования от кристаллографической ориентировки зерен металла перед вершиной трещинообразования отмечена в работе [12], где показано, что склонность металла к хрупкому разрушению повышается при наличии в плоскости листа высокой относительной плотности кристаллографических ориентировок зерен $\{100\}$. Установлено также, что различная объемная доля таких ориентировок зерен металла как $\{112\}\langle 110\rangle$, $\{113\}\langle 110\rangle$, $\{001\}\langle 110\rangle$, $\{111\}\langle 110\rangle$, $\{111\}\langle 112\rangle$, $\{554\}\langle 225\rangle$ и $\{332\}\langle 113\rangle$ приводит к трещинообразованию как с образованием, так и без образования хрупких расслоений металла стенки трубы.

В работе [13] показано, что при горячей прокатке в аустените формируется текстура в которой присутствуют компоненты $\{112\}\langle 111\rangle$, $\{110\}\langle 112\rangle$, $\{100\}\langle 001\rangle$. При $\gamma \rightarrow \alpha$ превращении с образованием бейнитной структуры происходит переход текстурных компонент аустенита в текстурные компоненты α -фазы бейнита согласно соотношениям Курдюмова-Закса с образованием следующих ориентировок:

$$\begin{aligned} \{112\}\langle 111\rangle &\text{ переходит в } \{112\}\langle 110\rangle; \\ \{112\}\langle 111\rangle &\text{ переходит в } \{113\}\langle 110\rangle; \end{aligned}$$

$\{110\}\langle 112\rangle$ переходит в $\{001\}\langle 110\rangle$;
 $\{110\}\langle 112\rangle$ переходит в $\{332\}\langle 113\rangle$;
 $\{100\}\langle 001\rangle$ переходит в $\{110\}\langle 001\rangle$.

Показано, что неоднозначное влияние величины ударной вязкости на результаты полигонных испытаний, когда при высоких значениях ударной вязкости длина магистральной трещины превосходит длину трёх труб, обусловлено может быть обусловлено различной долей кубической ориентировки в текстуре металла труб, представленных разными фирмами-изготовителями..

Неоднозначное влияние текстурных составляющих на величину ударной вязкости на изгиб по Шарпи и результаты полигонных испытаний связано с тем, что повышение доли кубической компоненты $\{001\}\langle 110\rangle$ при испытании на ударную вязкость на изгиб приводит в результате «расщеплений» к увеличению поверхности разрушения и энергии, расходуемой на разрушение, соответственно, к повышению значений ударной вязкости по Шарпи. Однако в металле тех же труб, имеющих высокие значения ударной вязкости на изгиб по Шарпи, изменение векторов внешнего воздействия при растяжении стенки трубы может привести при наличии значительной доли кубической ориентировки (100) к ослаблению связи между кристаллографическими плоскостями, параллельными плоскости прокатки листа, и образованию расслоений на плоскостях сдвига. При полигонных испытаниях это приводит к остановке вязкой трещины за пределами трёх труб.

В работах [14, 15] предложена методика, позволяющая рассчитывать переориентацию кристаллографических ориентировок листового проката и прогнозировать формирующиеся ориентировки зёрен металла труб перед вершиной трещины с учётом особенностей и степени деформации стенки трубы.

Расчёт ориентировок текстуры деформации перед вершиной вязкого трещинообразования выполняется в следующей последовательности:

1. По напряженному состоянию металла, получающего пластическое растяжение перед вершиной трещины, находим действующие системы скольжения в исходных ориентировках. Действующими системами будут те, в которых максимальны сдвиговые напряжения τ_c .
2. Для рассматриваемых ориентировок находим матрицу градиента деформации.
3. Степень деформации стенки трубы (утяжку) записываем через компоненты градиента деформации.
4. По величине деформации находим сдвиг в действующих системах скольжения.
5. По величине сдвига находим векторы кристалла перед вершиной трещинообразования, ориентированные нормально к плоскости стенки и в направлении оси трубы.

Расчетом показано, что наличие в текстуре ориентировок $\{001\}\langle 110\rangle$ может быть связано с двойниками деформации. Первоначально [16]

двойники имеют ориентировку, близкую к $\{114\}\langle 110\rangle$. При деформации стенки трубы перед вершиной трещины порядка 20% эта ориентировка, как показывает расчёт, переходит в стабильную ориентировку $\{001\}\langle 110\rangle$.

В связи с этим становится очевидной необходимость оценки пластичности металла с моделированием высоких скоростей растяжения при низких температурах не только в полномасштабных полигонных, но и в лабораторных условиях. Кроме того, желательна оценка пластичности, а также энергии на разрушение (ударной вязкости на осевое разрушение образцов) при моделировании в лабораторных и заводских условиях внешнего воздействия растяжения, аналогичного тому который наблюдается при формировании магистральной трещины.

Возможность такой лабораторной оценки пластичности металла показана в работе [17]. Пластичность металла при высоких скоростях деформации металла, наблюдаемой в реальных условиях разрушения труб магистральной трещиной, можно оценить при моделировании трещинообразования на плоских образцах, а также при осевом растяжении образцов [18] со скоростями деформации до 1500 1/с на оборудовании, аналогичном предлагаемому в работе [19].

Критериями достаточной пластичности металла при высоких скоростях деформации растяжения, наблюдаемых перед вершиной магистральной трещины, могут быть:

- величина деформации до разрушения металла;
- величина равномерной деформации;
- способность металла к достаточной высокой деформации без образования и раскрытия трещин. Последнее можно оценить по способности металла к упрочнению при увеличении величины деформации.

ВЫВОДЫ:

На основании выполненного исследования следует, что

1. В отличие от хрупкого трещинообразования остановка вязкого трещинообразования происходит закольцовыванием с укорочением длины вязкой трещины при повышении доли вязкой составляющей на поверхности кромок разрыва и увеличении пластической деформации перед вершиной вязкой трещины.
2. Закольцовывание реализуется плавным отклонением направления трещинообразования от прямой с образованием кромок разрыва, отклонённых от плоскости поверхности стенки трубы на 45° .
3. Кривизна отклонения кривой закольцовывания повышается при более высоких пластических деформациях стенки трубы в прикромочной области.
4. Установлено, что закольцовывание вязкого трещинообразования происходит вследствие отклонения векторов результирующих растягивающих усилий перед вершиной трещины от векторов кольцевых усилий. Такие растягивающие уси-

лия и их отклонение от векторов кольцевых усилий повышаются при увеличении величины пластических деформаций. Следовательно, необходимо оценивать способность металла труб к пластической деформации при низких температурах эксплуатации трубопроводов и высоких скоростях деформации, которые реализуются при формировании магистральной трещины.

5. Повышение доли хрупкой составляющей в изломе образцов при испытании падающим грузом, формирование на кромках разрыва расслоений, связанных, в частности, с присутствием в зернах металла перед вершиной трещины кубической компоненты $\{001\}$, не только уменьшает величину пластической деформации растяжения стенки трубы перед вершиной трещины, но и повышает скорость вязкого трещинообразования по длине трубопровода. Это снижает вероятность остановки вязкой трещины в пределах трёх труб.

6. Оценка пластичности металла листового проката, используемого для изготовления труб и непосредственно металла труб большого диаметра, предназначенных для трубопроводов высокого давления, при низких температурах эксплуатации труб и при высоких скоростях деформации, повышает точность прогнозирования остановки магистральной трещины. При оценке пластичности металла в заводских условиях изготовителей листового проката и труб это улучшит контроль труб и обеспечит повышение работоспособности трубопроводов со снижением риска их разрушения протяженной магистральной трещиной.

Список литературы

1. Штремель М.А. Информативность изменений ударной вязкости. «Металловедение и термическая обработка металлов», 1908, №11 (641), с.37-51.
2. Fettelweis, F: Die Kerbschlagpuobe und Kritik. Arch. Eisenhüttenw. 2 (1928/29) S. 625/74 (Werkstoffaussch, 143); vgl. Stahl u. Eisen 49 (1929) SW. 768/69.
3. Kuntze, W.: Kritische Kerbzahigkeitswerte. Metallwirtsch. 8 (1929) S. 992/98 u. 1011/17.
4. Иванцов О.М. Надёжность строительных конструкций магистральных трубопроводов. М.:Недра, 1985.-231 с.
5. Технология электрической сварки плавлением. Под ред.Б.Е. Патона. Москва-Киев: ГНТИМЛ, 1962.-663 с.
6. Томленов Ф.Д. Теория пластических деформаций металлов. Машгиз, 1951.
7. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.,Изд. «Наука», 1959, 420 с.
8. D.Rudland, G.Wilkowski, B.Rotwell. The Effect of SoifProtorties on the Fracture Speed of Propagation Axial Gracks in Line Pipes Steels. International Pipeline Conference. 2006. IPC – 2006 – 10086.
9. Ройтер С., Рольф С. Влияние показателя деформационного упрочнения и концентрации напряжений на характер разрыва сосудов давления. Тр. Американского общества инженеров-механиков, №4, 1974 -М., «Мир». – 54 с.
10. И.Ю. Пышминцев, В.Н. Лозовой. Особенности остановки закольцовыванием вязких магистральных трещин большого диаметра повышенных групп прочности. Труды XVI Международной научно-технической конференции «Трубы-2008». Сборник докладов. Челябинск. ОАО «РосНИТИ», - 313-319 с.
11. Лозовой В.Н., Пышминцев И.Ю. Характер трещинообразования и особенности остановки магистральной трещины в зависимости от свойств основного металла труб большого диаметра. Бюллетень научно-технической информации «Черная металлургия. М, ОАО «Черметинформация», вып.12 (1332), 2011, -54-57 с.
12. Пышминцев И.Ю. и др. Особенности структуры и свойств опытных партий труб категории прочности K65 (X80), изготовленных для комплексных испытаний. НТЖ «Наука и техника в газовой промышленности». М., ЗАО «Локус Станди», №1 (37), 2009, -56-61 с.
13. В.М. Счастливец и др.. Эффект повышения ударной вязкости при формировании слоистой структуры в трубных сталях. Труды научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР», Т.2. Екатеринбург: УрО-РАН, 2011, - 331-337 с.
14. В.Н. Лозовой, И.Ю. Пышминцев. К прогнозированию, оптимизации текстуры основного металла труб большого диаметра. Труды XVII Международной научно-технической конференции «Трубы-2008». Сборник докладов. Челябинск. ОАО «РосНИТИ», - 81-84 с.
15. В.Н. Лозовой, И.Ю. Пышминцев. Оптимизация структуры основного металла труб большого диаметра (ТБД). Труды восьмого конгресса прокатчиков (Том I). Магнитогорск, 11-15 октября 2010, -267-275 с.
16. Классен-Неклюдова.В. М. Механическое двойникованиекристаллов..М., Академиздат, 1963,- 261 с.
17. И.Ю. Пышминцев, В.Н. Лозовой. О критериях надёжности труб, предотвращающих в них протяженные магистральные трещины. Труды XVI Международной научно-технической конференции «Трубы-2008». Сборник докладов. Челябинск. ОАО «РосНИТИ», -320-326 с.
18. И.Ю. Пышминцев. Упрочнение листовых сталей для холодного формоизменения.- Екатеринбург, Издательство АМБ, 2004.-160 с.
19. Н.А. Шапошников. Механические испытания металлов. 1954. - Ленинград. МАШГИЗ, -434 с.
20. В.И. Погоржельский и др. Контролируемая прокатка. М., Металлургия