

О РАСПРОСТРАНЕНИИ МАКРОСКОПИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНЫ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ON DISTRIBUTION MACROSCOPIC CRACKS IN THE FLAT-STRAIN STATE

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

Для обеспечения надёжности трубопроводов из высокопрочных сталей, способных работать в сложных климатических условиях при низких температурах и расположенных, как правило, вдали от потребителей необходимо повысить их стойкостью от разрушения протяженной магистральной трещиной. Поэтому вопросам формирования магистральных трещин посвящено значительное число работ как отечественных, так и зарубежных исследователей, в которых установлено, что образование трещины в кристаллической решетке без деформации металла невозможно [1,2].

Развитие дислокационных представлений о возникновении и развитии микротрещин нашло развитие во многих работах [3-7]. Образование трещин связывают со скоплением дислокаций и образованием барьеров для их перемещения. Барьером для возникновения скоплений дислокаций может быть неметаллическое включение [8]. Вокруг включения и в нём самом возникают значительные напряжения. В этих условиях хрупкое неметаллическое включение, атакованное серией незавершенных сдвигов или двойников, способно разрушиться с формированием трещины.

Теоретические модели трещинообразования вытекают из анализа практики формирования трещин. На основании этого отмечают также такие три механизма трещинообразования как:

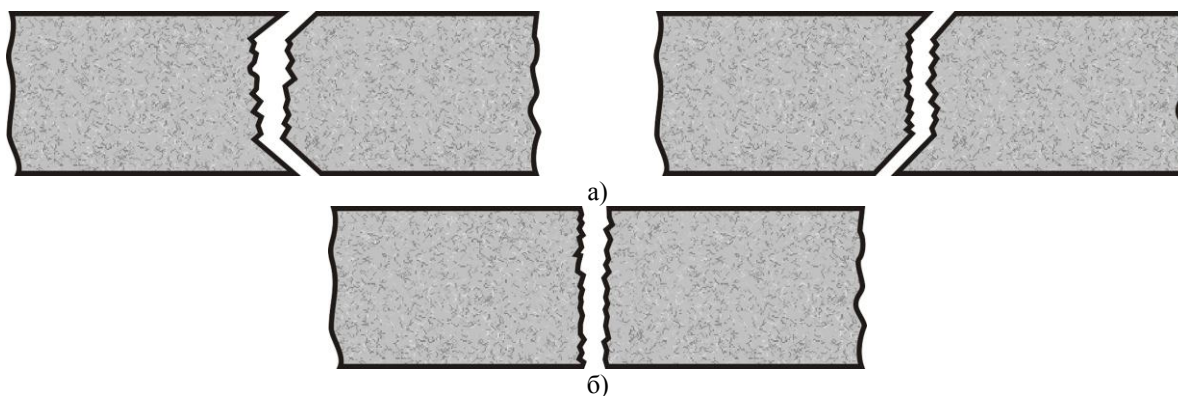
- Дискообразный сдвиг – тонкая область пластического течения. Концентрация касательных напряжений в этой области приводит к образованию трещин на границах диска.
- Поверхность раздела пластической деформации – также тонкая область, где пластическая деформация в теле внезапно меняется до некоторой величины.
- Следующий третий способ возникновения трещин – пересечение линий скольжения.

В монокристалле зарождение хрупкого разрушения может быть связано с развитием микротрещины, которое происходит анизотропно вдоль направления $[001]$, перпендикулярного вектору Бюргерса активной системы скольжения. В связи с этим в монокристалле формирование трещины может зависеть от ориентации кристалла. Однако, как это показано на многочисленных примерах [9], в поликристаллическом металле деформация постепенно охватывает всю группу кристаллов и некоторые отличия отдельных кристаллов как бы нивелируются. Части и целые зерна втягиваются в общую зону деформации по плоскостям и направлениям действующих систем скольжения, которых в ОЦК-решётке может реализовываться 17 123 304. Конкретные действующие системы связаны с векторами усилий воздействия на поликристалл. Трещина образуется при исчерпании способности к пластической деформации.

Как показано в работах [10,11], характер трещинообразования связан и с видом напряженного состояния у вершины трещины. А именно, плоское деформированное состояние способствует хрупкому трещинообразованию, а плоское напряженное состояние – вязкому.

При низкой пластичности металла и большой ширине образца, что имеет место при трещинообразовании стенки труб большого диаметра, плоское деформированное состояние превалирует и, как следствие, реализуется хрупкое трещинообразование. При достаточно высокой пластичности металла наблюдается плоское напряженное состояние и по всему сечению реализуется вязкое трещинообразование.

На рисунке 1 показаны виды получаемой при разрушении кромки разрыва в зависимости от характера разрушения [11].



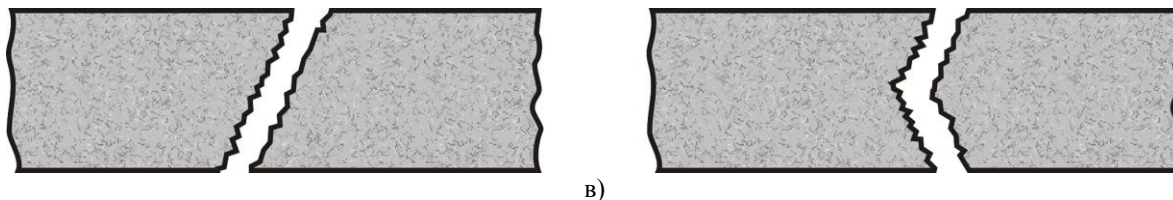


Рисунок 1. Виды разрушения (а – хрупкое разрушение от нормальных растягивающих напряжений с частичным сдвигом, б – хрупкое разрушение с незначительным сдвигом, в – вязкое разрушение сдвигом)

Видно (рис.1,а), что при хрупком разрушении металл деформируется пластическим сдвигом только в поверхностном слое стенки трубы, а хрупкое разрушение распространяется практически по всему сечению стенки трубы и происходит под действием нормальных результирующих растягивающих напряжений $Q_{рез}$ (обусловлены как внутренним давлением в трубе, так и действием раскрывающихся уже за образованной трещиной стенок трубы вследствие «парусности» стенок), которые при хрупком трещинообразовании практически совпадают по направлению с кольцевыми $\sigma_{кольц.}$ (вызваны внутренним давлением в трубе). При понижении пластичности металла, что может быть инициировано как снижением температуры металла, так и повышением скорости деформации (скорость деформации повышается при увеличении скорости трещинообразования по длине трубы), хрупкое трещинообразование реализуется практически по всему сечению стенки трубы (рис.1, б).

При хрупком трещинообразовании формирование трещины происходит преимущественно в наружном поверхностном слое стенки трубы. Это происходит, во-первых, потому, что пластическая деформация при хрупком трещинообразовании реализуется, как это было показано выше (рис.1,а, б), только в тонком поверхностном слое сечения стенки трубы, а, во-вторых, потому, что в поверхностном слое мелкая сеть коррозионных трещин и без пластической деформации формирует на границах коррозионных трещин упрочнение выше предела прочности (σ_v). Кроме того, следует учитывать, что формовка трубной заготовки происходит с пластическим растяжением наружных слоев стенки трубы. Причем, при производстве прямошовных труб - перпендикулярно оси трубы. При этом пластическое растяжение поверхностных слоев реализуется сдвигом в кристаллической решетке металла по действующим системам скольжения (плоскости и направления в элементарной ячейке с наиболее плотной упаковкой атомов, в которых реализуются наибольшие сдвиговые напряжения (τ_c)) по плоскостям с максимальными касательными напряжениями ($\tau_{макс}$), которые отклонены от векторов растягивающих усилий на 45° [12, 13] (при хрупком трещинообразовании от векторов $Q_{кольц.}$).

Поэтому, ещё на стадии формовки трубной заготовки, а затем экспандирования в поверхностных слоях трубы скопления дислокаций формируются в слое наружной поверхности трубы по плоскостям сдвига под углами 45° относительно $Q_{кольц.}$ а по плоскости поверхности трубы – под углами 45° относительно оси трубы. В результате в поверх-

ностных слоях происходит формирование трещин под углами 45° к направлению фронта хрупкого трещинообразования, как это показано на рис. 2.

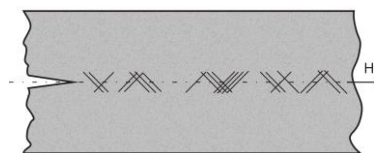


Рисунок 2. Мелкая сетка трещин, образующаяся перед вершиной хрупкой магистральной трещины (Нтр – направление фронта хрупкого трещинообразования)

В результате раскрытия трещин трубы формируются результирующие усилия растяжения стенки трубы $Q_{рез}$, как это показано на рис. 3.

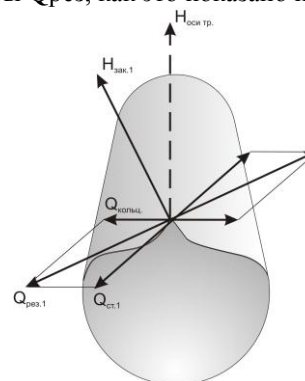


Рисунок 3. Формирование результирующих усилий растяжения стенки трубы перед вершиной трещинообразования, обусловленное действием правой раскрывающейся стенки

При хрупком трещинообразовании результирующие усилия $Q_{рез}$ практически совпадают с кольцевыми усилиями $Q_{кольц.}$. Поэтому при хрупком разрушении хрупкий разрыв, продолжая мелкие трещины на поверхности стенки, приводит к формированию кромок хрупкого разрыва по ломанной кривой под углами 45° от оси трубы, т.е. от направления фронта главной хрупкой трещины.

Хрупкое трещинообразование происходит с низкими энергозатратами на деформацию стенки трубы перед вершиной трещины (деформация незначительная) и непосредственно хрупкого разрыва стенки трубы при перемещении фронта трещины. Поэтому невысокое торможение хрупкому трещинообразованию приводит к высокой скорости трещинообразования по длине трубы (до 1800 м/сек), Скорость трещины может быть значительно выше скорости разгерметизации трубопровода (скорости звука в газе), что приводит к хрупкому разрушению

трубопровода на длину в несколько десятков километров.

Хрупкое трещинообразование показано на рисунке 4.

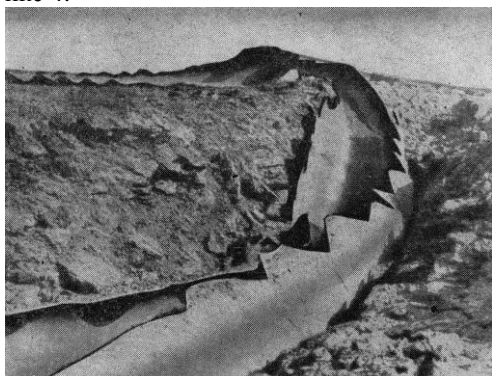


Рис. 4. Разрушение трубопровода хрупкой магистральной трещиной

В отличие от хрупкого при вязком трещинообразовании деформация металла перед вершиной трещины реализуется по всему сечению стенки трубы по действующим системам скольжения (имеющим наибольшие сдвиговые напряжения τ_c) с деформацией сдвига и формированием скоплений дислокаций по плоскостям максимальных касательных напряжений (τ_{\max}), которые при растяжении стенки трубы ориентированы под углами 45° относительно векторов результирующих растягивающих усилий $Q_{\text{рез}}$. При незначительном отклонении результирующих усилий от кольцевых $Q_{\text{кольц}}$ вязкое трещинообразование имеет прямолинейный характер и направлено по оси трубы перпендикулярно векторам $Q_{\text{кольц}}$ [12, 13].

Вязкое трещинообразование показано на рисунке 5.



Рис. 5. Разрушение трубопровода вязкой магистральной трещиной

Значительные пластические деформации стенки трубы при вязком трещинообразовании повышают торможение трещинообразования и значительно снижают по сравнению с хрупким скорость распространения трещины по длине трубопровода.

Кроме того, при вязком трещинообразовании значительные пластические деформации стенки трубы перед вершиной трещины приводят к отклонению векторов результирующих растягивающих усилий перед вершиной трещины $Q_{\text{рез}}$ от векторов кольцевых усилий $Q_{\text{кольц}}$. Нния механизму остановки вязкой трещины.

При повышении пластических деформаций металла перед вершиной формирующей трещины, увеличении усилий и деформаций от раскрывающихся стенок трубы результирующие усилия растяжения $Q_{\text{рез}}$ увеличиваются и значительно отклоняются от кольцевых усилий $Q_{\text{кольц}}$ (рис.3). В связи с тем, что направление формирования вязкой трещины всегда перпендикулярно усилиям растяжения стенки трубы, это приводит к отклонению направления вязкого трещинообразования от оси трубы по направлению $H_{\text{зак}}$ (рис. 3) и закольцовыванию трещины. При этом закольцовывание может реализовываться на коротком участке практически без разгерметизации трубы.

ВЫВОДЫ:

На основании изложенного следует, что хрупкое и вязкое разрушения стенки трубы отличаются:

1. По характеру разрушения.

Хрупкое трещинообразование реализуется с малой пластической деформацией (преимущественно только в поверхностном слое стенки) хрупким разрывом под действием нормальных растягивающих напряжений, по направлению практически совпадающих с кольцевыми усилиями $Q_{\text{кольц}}$, преимущественно, по граням элементарных ячеек и межзёрненным промежуткам

Вязкое трещинообразование реализуется с высоким пластическим растяжением стенки трубы перед вершиной трещины по системам скольжения, которых в ОЦК-решётке насчитывается 17 123 307, сдвигом по плоскостям максимальных касательных напряжений τ_{\max} под действием растягивающих стенку трубы перед вершиной трещины результирующих растягивающих усилий $Q_{\text{рез}}$, которые по направлению значительно отклонены от кольцевых усилий $Q_{\text{кольц}}$

2. По виду общей линии магистральной трещины.

Хрупкое трещинообразование реализуется по ломанной кривой, которую формируют мелкие трещины, формирующиеся перед вершиной главной трещины.

Вязкое трещинообразование реализуется по гладкой линии, направление которого задаётся векторами результирующих усилий растяжения стенки трубы перед вершиной трещины $Q_{\text{рез}}$ и перпендикулярной $Q_{\text{рез}}$.

3. По утонению стенки трубы вблизи кромок разрыва.

При хрупком трещинообразовании виду того, что малые пластические деформации стенки трубы реализуются практически только в поверхностном слое стенки, утонения стенки трубы практически не происходит.

При вязком трещинообразовании стенка трубы перед вершиной трещины деформируется пластически по всему сечению. В результате, стенка трубы получает утонение с деформацией (удлинением) как по оси трубы, так и в поперечном (кольцевом) направлении.

4. По виду плоскостей кромок разрыва стенки трубы.

Хрупкое трещинообразование реализуется с образованием кромок разрыва, перпендикулярных плоскости стенки трубы. Кромки разрыва имеют неровный вид, в впадинах и выступах, обусловленными разрывом по отдельным участкам сечения трубы.

Вязкое трещинообразование реализуется с образованием кромок разрыва под углами 45° к плоскости поверхности стенки трубы. Кромки разрыва гладкие. При каких-либо структурных неоднородностях металла не исключено наличие на поверхности вязкой кромки отдельных участков хрупкого разрушения и расслоений.

5. По скорости трещинообразования
при хрупком трещинообразовании незначительная энергоёмкость разрушения приводит к высоким скоростям трещинообразования (до 1800 м/сек), которые могут многократно превышать скорость звука в газе и, следовательно, скорость разгерметизации трубопровода.

Высокие пластические деформации стенки трубы при вязком трещинообразовании повышают торможение трещинообразования. Скорость трещинообразования при этом значительно ниже, чем при хрупком.

6. По направлению векторов растяжения стенки трубы перед вершиной трещины.

При хрупком трещинообразовании результирующие растягивающие результирующие усилия $Q_{рез}$ практически совпадают по направлению с кольцевыми перпендикулярными оси трубы усилиями $Q_{кольц}$.

При вязком трещинообразовании формируются результирующие растягивающие усилия $Q_{рез}$, которые по направлению значительно отклонены от кольцевых $Q_{кольц}$. Это приводит к качественно отличному механизму остановки вязкой магистральной трещины от остановки хрупкой трещины.

Отмеченные особенности трещинообразования стенки труб большого диаметра отражаются на работоспособности труб при их эксплуатации и особенностях остановки (в случае появления и распространения) магистральных хрупких и вязких трещин.

Список литературы

1. Плишкин Ю.М. ПМТФ, 1962, №2, с.95.
2. Орлов А.Н., Плишкин Ю.М. ФММ, 1957, т.4, №2, с.540.
3. Stepanov A.W. (Степанов А.В.) Phys., 1934? Bd 92, №1 und 2, s.3, 42.
4. Смирнов В.И. и Ярошевич В.Д. Физическая природа хрупкого разрушения металлов. Изд. «Наукова думка», 1965, с.6.
5. Иванова В.С. Усталостное разрушение металлов. Металлургиздат, 1963.
6. Иванова В.С. и др. Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов. Изд. АН СССР, 1956.
7. Трефилов В.И. В сб. «Физические основы прочности и пластичности металлов». Металлургиздат, 1963, с.190.
8. Smith E. Acta metall., 1960, v.8, №6, p.403.
9. Финкель В.М. Физика разрушения. Изд. «Металлургия», 1970, 376 с.
10. Tiffany C. F. u. J. N. Masters Symposium in Fracture Toughness Testing and Its Application, STp, 381, S. 249-277, ASTM Philadelphia (1965).
11. К. Хенкель. Техническое применение механики разрушения. М., «Металлургия», 1974, 64 с.
12. Томленов Ф.Д. Теория пластических деформаций металлов. Машгиз, 1951.
13. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М., Изд. «Наука», 1959, 420 с.