

УДК.620.191.33.621.642

И.М. Розенштейн, заведующий лабораторией механических испытаний, НПП «Форт»

ОСОБЕННОСТИ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

Хрупкое разрушение вертикальных стальных резервуаров – случайное событие, хрупкое разрушение монолитных и сварных лабораторных образцов – достоверное событие. Переходная температура хрупкости не зависит от величины напряжения. Макропластические деформации, предшествующие зарождению хрупкой трещины в вертикальном стальном резервуаре, невозможны, т.к. в его стенке напряжение всегда ниже σ_m . Опасность хрупкого разрушения резервуара не может быть представлена в терминах внешнего напряжения.

Стальные сварные вертикальные резервуары (РВС) для хранения нефти и нефтепродуктов сооружают из свариваемой низкоуглеродистой стали. Их прочностной расчет по третьей теории прочности существует более ста лет и предельно ясен. Конструкция выверена. В свое время сотни РВС, которые еще находятся в эксплуатации в настоящее время, были построены по типовым проектам. Строятся новые РВС и в настоящее время. Прочность любого РВС по умолчанию рассчитывают на действие внешних усилий в соответствии с понятием, что прочность – способность сопротивляться разрушению от действия внешних усилий. Имеется нормативный документ [1], в котором сформулирована декларация, позволяющая не учитывать остаточные напряжения в расчетах на прочность.

Стенка РВС, а именно она объект анализа, работает в условиях статики: динамических нагрузок и перегрузок в принципе быть не может. Это делает РВС удобным объектом для исследования хрупкого разрушения, т.к. оно возникает при постоянной достоверно известной нагрузке, всегда ниже или значительно ниже σ_s . Ничто не предвещает о его приближения, оно всегда неожиданно. Никогда не удавалось связать причину хрупкого разрушения РВС с величиной напряжения. Принято считать, что эта задача может быть решена с помощью механики разрушения [2].

Еще Н.С. Стрелецкий отмечал, что «основной вопрос о величине опасных повреждений остается неизученным. Малые успехи в этой области объясняются недостаточностью внедрения положения строительной физики в расчетную практику и неразработанностью теоретического подхода к изучению повреждений. Таким образом, аварийное состояние конструкций или сооружений является особым состоянием, требующим особого подхода, выходящим за пределы обычного расчета, характеризующего работу конструкции в безаварийном состоянии» [3].

При анализе аварий РВС и во время регламентной экспертизы промышленной безопасности РВС, находящихся в эксплуатации, практически в каждом монтажном сварном соединении стенки наблюдаются участки, у которых геометрическая форма шва не полностью удовлетворяет требованиям стандартов. Назвать эти дефекты концентраторами напряжения можно только с натяжкой. Это не плавный переход металла шва на основной металл. Никаких признаков макропластической деформации нет: ни утяжки, ни вязкого среза в точке зарождения хрупкой трещины, всегда находящейся на линии сплавления. При исследовании поверхности хрупкой трещины по всей ее длине выясняется, что возникла она не у самого значительного дефекта из имеющихся в сварном соединении.

Нарушения формы сварного монтажного шва, всегда являющегося замыкающим, вызваны сложностью его формирования при изготовлении РВС методом рулонирования. В стенке РВС примерно 10% монтажных швов: их число зависит от вместимости РВС, от числа рулонов, из которых его сваривают. Возникают хрупкие трещины только в нижних поясах стенки: обычно в первом и очень редко во втором. Длина участков монтажных сварных швов, в которых непосредственно возможно (когда-либо наблюдалось) появление хрупких трещин, не превышает 1% сварных швов стенки. Остальные сварные швы выполняют и контролируют на заводских установках, и они отличаются высокой надежностью. С начала широкого применения метода рулонирования для изготовления РВС (более 60 лет) не известен ни один случай разрушения заводских швов, выполненных автоматической сваркой. Так что это не повод засомневаться в целесообразности метода рулонирования и сделать все сварные швы монтажными.

Хрупкие разрушения РВС случаются во время гидравлических испытаний или в самом начале его эксплуатации: в первую зиму и очень редко – во вторую. Вопрос о накоплении повреждений в качестве причины разрушения, очевидно, отпадает.

Низкоуглеродистая свариваемая сталь чувствительна к температуре и скоро-

сти деформирования, ей присущи два кристаллографических типа разрушения: вязкий срез по плоскостям [111] и хрупкий скол по плоскостям [100]. Они разграничены на температурной шкале переходной температурой хрупкости t_k^0 : ниже этой температуры излом кристаллографически хрупкий, выше – кристаллографически вязкий. Такая классификация однозначно определяет особенность хрупкого разрушения РВС из низкоуглеродистой стали. Встречаются изломы лабораторных образцов из низкоуглеродистой стали, на поверхности которых наблюдаются хрупкие и вязкие участки. Соотношение между их площадями бывает любым, но между ними всегда имеется дискретная граница.

Кристаллографически квазихрупких изломов при разрушении РВС из низкоуглеродистой стали не бывает. «Незначительные пластические деформации, которые возникают в реальном материале в процессе подготовки разрушения – распространения трещины, считаются сосредоточенными в малой зоне около острия трещины и учитываются как некоторая составляющая плотности энергии разрушения» [4]. Впрочем, под термином «квазихрупкий» разными авторами подразумеваются различные явления.

«Хрупко-вязкий» или, что то же самое – «вязко-хрупкий» переход, всегда сопровождается зоной рассеивания, ширина которой зависит от точности изготовления образцов, соблюдения температурного режима во время испытаний и однородности свойств стали. И еще принципиальное положение. Температуру «вязко-хрупкого перехода» можно определять по различным явлениям, сопровождающим этот переход: по верхней границе зоны рассеивания, по температуре, при которой в изломе появляется заданное соотношение между видами излома: обычно по 50%, (при определении визуально ошибка достигает 20% и более), по работе, потраченной на долом образца после появления трещины в вершине надреза. Задаются и другим соотношением: дело вкуса, определяют t_k^0 и по величине утяжки под надрезом. Авторы, использовавшие различные способы, декларируют, что примененный ими способ самый лучший, что он наиболее точно учитывает

условия эксплуатации конструкции и, конечно, гарантирует ее от хрупкого разрушения. В действительности все эти способы оценивают одну и ту же t_k^0 по различным явлениям, сопровождающим «хрупко-вязкий переход», т.е. определяют ее с разной точностью в пределах зоны рассеивания. Не бывает и двух температур хрупкости – первой и второй: это условное понятие, физического обоснования для этого не существует. Есть одно событие – «хрупко-вязкий» («вязко-хрупкий») переход и соответствующая ему температура, характерная для конкретного способа ее определения.

Значение t_k^0 не является константой марки стали [5], а тем более – элементов сварной конструкции. У любой марки стали возможно множество способов определения t_k^0 в зависимости от размеров сечения и скорости деформирования. Связь между различными t_k^0 для одной стали неизвестна: единственный путь – лабораторное определение. По этому поводу Э. Гудремон в предисловии к монографии «Специальные стали» [6] писал, что результаты испытаний у него получились настолько противоречивыми, что он не решился их опубликовать.

Опасность хрупкого разрушения РВС традиционно анализируют в терминах напряжения, при этом из поля зрения выпадает, что хрупкое разрушение исторически является синонимом хладноломкости, и за давностью лет эта смысловая связь утеряна.

При хрупком разрушении лабораторных образцов имеют место две стадии – стабильный процесс возникновения хрупкой трещины при напряжении, превышающем σ_r , и ее нестабильное распространение, при напряжении ниже σ_r (наблюдалось распространение хрупкой трещины при $0,1\sigma_r$). Возникновение хрупкой трещины сопровождается макропластической деформацией. Ее величина достигает примерно стандартного значения, указанного в заводском сертификате на поставку проката, определенного при испытании на одноосное растяжение, соответствующее третьей теории прочности. При распространении хрупкой трещины в стенке РВС макропластической деформации не бывает, а упругой энергии, имеющейся в областях, непосредственно примы-

кающих к траектории трещины, достаточно для начала ее распространения: наблюдались случаи одновременного распространения пучка хрупких трещин, иногда наблюдается ветвление хрупких трещин. Процесс разрушения не соответствует третьей теории прочности. Ранее было показано [7], что хрупкое разрушение лабораторного образца – достоверный процесс. Его достоверность обеспечивает стандартизованная величина макропластической деформации (относительное удлинение). Хрупкое разрушение реального РВС – случайный процесс: таким его делает отсутствие макропластической деформации при разрушении. Поэтому и не удастся связать разрушение РВС с величиной напряжения. Хрупкие разрушения РВС и лабораторного образца – различные процессы, хотя и приводят к одинаковому результату – образованию хрупкой трещины.

Макропластичность, сопровождающая возникновение хрупкой трещины, является своеобразным энергетическим барьером, аналогичным сифону, защищающим сварную конструкцию от хрупкого разрушения.

Каким образом кристаллографически хрупкая трещина появляется при постоянной нагрузке ниже σ_r , минуя стадию возникновения, понятно лишь качественно. Можно утверждать, что ее появление питается упругой энергией внутреннего или внутреннего и внешнего напряжения.

Кристаллографически хрупкая трещина может быть только нестабильной: для ее распространения имеется избыток упругой энергии, накопленной в поле внутренних сварочных напряжений. Этот тезис подтвердил незапланированный эксперимент. При хранении нескольких десятков ферм зимой на складе в целом ряде фасонки появились кристаллографически хрупкие трещины. Внешние нагрузки отсутствовали. Выйдя за пределы поля внутренних растягивающих напряжений, хрупкие трещины останавливались.

«Случайный» эксперимент подтвердил, что энергии внутренних напряжений достаточно для возникновения (без классической стадии возникновения хрупкой трещины, наблюдаемой в лабораторных образцах) и частичного распространения хрупкой трещины.

Для того чтобы исключить появление трещин, в фасонках ферм были стандартизованы увеличенные расстояния между привариваемыми элементами: возникновение хрупких трещин прекратилось.

Распространение кристаллографически хрупкой трещины является дискретным процессом. Магистральная хрупкая трещина распространяется скачками. Перед ее вершиной в середине толщины листа возникает плоский дефект, распространяющийся во все стороны, сливающийся с вершиной магистральной трещины и т.д. Новые плоские дефекты возникают выше или ниже плоскости, в которой распространяется вершина магистральной трещины. Перемычки между ними срезаются. Чем выше напряжение, в поле которого распространяется хрупкая трещина, чем больше запас упругой энергии, который может быть затрачен на распространение хрупкой трещины, тем большие расстояния возможны между вершиной магистральной трещины и возникающими плоскими дефектами. Распространение хрупкой трещины – это многократное возникновение дефекта и его слияние с вершиной распространяющейся магистральной трещиной. При относительно небольших запасах упругой энергии это расстояние может уменьшиться практически до нуля: в изломах фасонки «шевронный» узор практически был неразличим. Чем больше величина напряжения, тем грубее рисунок поверхности излома [8].

Процесс распространения хрупкой трещины прекращается, если отсутствуют температурные условия для возникновения нового плоского (хрупкого) дефекта. Разрушение по плоскостям [100] дискретно сменяется разрушением по плоскостям [111]. При лабораторных испытаниях остановка («увязание») хрупкой трещины сопровождается образованием дискретной границы в форме «ногтя». Превращение хрупкой трещины в вязкую сопровождается утяжкой и подрастанием, величина которого может достигать 10–15 мм. При хрупком разрушении реальных РВС вязкое подрастание и утяжки после остановки хрупкой трещины не наблюдается: для этого недостаточно упругой энергии, которая могла бы поддержать распространение вязкой трещины. Вяз-

кое подрастание – типичная картина, наблюдаемая в лаборатории. Чем больше величина напряжения, тем грубее рисунок поверхности излома. Процесс, идущий у вершины магистральной трещины, автономен в том смысле, что реализуется за счет упругой энергии, накопленной в области, прилегающей к вершине хрупкой трещины. Форма и размеры этой области определяются соотношением скорости распространения хрупкой трещины (примерно 1000 м/с и скорости упругой волны 5000 м/с). В случае хрупкого разрушения стенки РВС отраженная волна разгрузки не успевает дойти до очага разрушения в вершине трещины.

На каждую точку в процессе разрушения действуют два вектора, благодаря которым поверхность излома представляет собой «шевронный узор», составленный кусочками параболы. Вероятно, можно утверждать, что нестабильное распространение хрупкой трещины определяется законами механики разрушения. Однако значение вязкости разрушения в этом процессе константой не является, а зависит от величины напряжения в поле, через которое распространяется трещина. Расход энергии на распространение хрупкой трещины в поле с более высоким напряжением увеличивается, т.к. больше энергии расходуется на срез перемычек, отстоящих друг от друга на большем расстоянии: чем выше напряжение, тем грубее «шеврон». Отсюда практическая польза при расследовании хрупких разрушений РВС: имея тарированные в лаборатории образцы, всегда можно задним числом проконтролировать величину напряжения, действовавшего во время распространения хрупкой трещины вдоль всей ее траектории в стенке РВС.

Подрастание и утяжка трещины, сопровождаемые макропластичностью перед разрушением, предшествующим возникновению кристаллографически хрупкой трещины, делают процесс разрушения достоверным, воспроизводимым, но встречается он только в лаборатории. Эта модель разрушения зафиксирована в ГОСТ на определение характеристик трещиностойкости [2].

Кристаллографически вязкая трещина может распространяться только стабильно за счет энергии подводимой испытательной машиной, очевидно, при

напряжении, превышающем σ_c (чего не может быть в стенке РВС или в ферме, стоящей на складе).

Долгие годы считалось, что существуют две различные переходные температуры хрупкости – возникновения хрупкой трещины, характерной для всех, кроме Робертсоновских испытаний, и только в последних выявляется температура остановки (увязания) хрупкой трещины. В действительности существует лишь одна по своей природе или механизму температура «хрупко-вязкого», или «вязко-хрупкого», перехода, t_k^0 . Этот вывод обоснован анализом процесса распространения хрупкой трещины и идентичностью механизмов возникновения и остановки (увязания) хрупкой трещины [8].

Поскольку автор настоящей статьи был когда-то руководителем темы, целью которой было создание методических рекомендаций по «определению характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) на стадии остановки трещины» [8], то именно ему и уместно обосновать отказ от прежней трактовки этой идеи и подчеркнуть, что определяемая t_k^0 ничем по своей природе не отличается от переходных температур, определенных иным способом, но является максимально возможной для конкретного случая. Экспериментально было установлено, что t_k^0 в момент остановки хрупкой трещины (температура «увязания хрупкой трещины») не зависит от величины напряжения [7]. При более высокой температуре хрупкое разрушение в стенке РВС получить невозможно ни при какой величине усилия. Идентичность природы любых t_k^0 позволяет говорить об их общности и распространить кажущийся парадоксальным вывод о независимости от величины напряжения любой переходной температуры хрупкости.

При возникновении хрупкой трещины в сварном соединении РВС никогда не удается обнаружить следов макропластичности. В деталях это выглядит так. Хрупкая трещина зарождается в точке, лежащей на линии сплавления, распространяется по ширине всего наплавленного металла. Пройдя по нему 30–40 мм, она переходит на основной металл и далее распространяется вдоль образующей по основному металлу. Можно предполагать, что на основной

Российский разработчик и производитель противокоррозионных защитных лакокрасочных материалов марки АКРУС®, специального и промышленного назначения.


**МЫ ПРОИЗВОДИМ
ТОЛЬКО ЗАЩИТНЫЕ
ПОКРЫТИЯ**

Это позволяет нам концентрироваться на особенностях их изготовления и потребления.


ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ:

- Нефтехимическая индустрия
- Нефтегазодобывающая промышленность
- Судостроение
- Машиностроение
- Мостостроение
- Гражданское строительство



**117420, г. Москва,
ул. Намёткина, д. 10Б
Тел./факс: +7(495) 363-56-69
info@akrus-akz.ru
www.akrus-akz.ru
www.akrus.pф**

металл хрупкая трещина «выталкивается» сложной системой внутренних напряжений, имеющих в наплавленном металле.

Механизм хрупкого разрушения РВС может быть сформулирован так.

В точке, лежащей на линии сплавления, имеется охрупченный от влияния сварки объем стали, у которого значение t_k^0 выросло по сравнению с исходным и стало равным или выше температуры окружающей среды. Конкретное значение t_k^0 неизвестно, как и неизвестна ее связь с переходной температурой, определяемой при испытании стандартных ударных образцов. При этом становится возможным раскалывание кристалла, точнее кристаллита, по одной из плоскостей [100]. Выше этой температуры кристаллографически хрупкое разрушение невозможно, только вязкий срез. Возникшая трещина скола сразу становится нестабильной, т.к. в области разрушения всегда имеется достаточный запас энергии внутренних напряжений, а высокая скорость деформирования обеспечивает повышенное значение t_k^0 и, следовательно, нестабильное распространение хрупкой трещины. Трещины будут распространяться пока на своем пути не встретит объем стали с более низкой t_k^0 .

Для начала хрупкого разрушения РВС не требуется дефект, который можно пред-

ставить как разрез из теоретической модели: таких дефектов при расследовании хрупких разрушений РВС никогда и не обнаруживали. Выше отмечалось, что в точке возникновения хрупкой трещины обычно находят дефект сварного шва, не самый грубый из обнаруженных в монтажном шве.

Точка на линии сплавления, из которой стартует хрупкая трещина, благодаря шевронному узору определяется четко. Представляется вероятным, что в этой точке возникли температурные условия, при которых стало возможным раскалывание кристалла по плоскости [100]. Раскалывание кристалла по плоскости [111] при более высокой температуре термодинамически невозможно ни при каком усилии, как и невозможно распространение кристаллографически вязкой трещины еще и потому, что этот процесс не обеспечен интенсивностью потребления энергии. Максимальная температура, при которой возможно распространение кристаллографически хрупкой трещины, – это температура «увязания», зависящая от марки стали и толщины проката.

Следовательно, с помощью механики разрушения опасность хрупкого разрушения РВС не может быть описана, а ГОСТ на резервуары и на механику разрушения, как отмечалось в начале статьи, не пересекаются.

Литература:

1. СТ СЭВ 3972-83. Надежность строительных конструкций и оснований. Конструкции стальные. Основные положения по расчету, п. 1.11.
2. ГОСТ 25.506-85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.
3. Стрелецкий Н.С. К вопросу развития методики расчета по предельным состояниям. МИСИ, Москва, 1966.
4. Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. – Киев: Наукова думка, 1991. – 411 с.
5. Provisional report on an International Investigation of Brittle Fracture. Welding in the World. 1965/ vol. 3, № 2.
6. Гудремон Э.А. Специальные стали, «Металлургия», т. 1. – М., 1966.
7. Розенштейн И.М. Особенности хрупкого разрушения сварных стальных конструкций. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007, №3.
8. Розенштейн И.М. Аварии и надежность стальных резервуаров. – М.: Недра, 1995. – 253 с.
9. МР 71-82. Расчеты и испытания на прочность. Определение характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) на стадии остановки трещины. Госстандарт. 1982.

Ключевые слова: кристаллографически хрупкое разрушение, вертикальные стальные резервуары, переходные температуры хрупкости.