

НАУКА – ВИРОБНИЦТВУ

УДК 621.124.16

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ОДЕССКОГО ПРИПОРТОВОГО ЗАВОДА

К. И. КИРИЛЛОВ, В. Н. КРАЕВСКИЙ

Малое частное предприятие "МЭОП", Одесса

Предложено оценивать с позиций механики усталостного разрушения остаточный ресурс химико-технологического оборудования, работающего с выявленными трещиноподобными дефектами, учитывая, что окончательному разрушению предшествуют образование и субкритическое развитие усталостных трещин. Время роста дефекта от выявленного размера до максимально допустимого определено с помощью кинетических диаграмм разрушения, построенных при испытаниях образцов, изготовленных из материала конструкции. Расчетное время роста дефектов до критического размера при эксплуатационных нагрузках значительно больше, чем срок регламентной эксплуатации хранилища жидкого аммиака. Однако такой расчет ресурса не учитывает все факторы, которые могут интенсифицировать скорость роста трещин. Предложено проводить акустико-эмиссионный контроль за развитием выявленных дефектов.

Ключевые слова: *остаточный ресурс, освидетельствование, механика разрушения, усталость, трещиностойкость, трещиноподобный дефект, акустическая эмиссия.*

На Одесском припортовом заводе более 30 лет эксплуатируется химико-технологическое оборудование (сосуды давления, технологические емкости и т.д.), нагружаемое внутренними статическим и циклическим давлениями при воздействии коррозионных сред, высоких и низких температур. Известно [1], что после столь длительной эксплуатации крупногабаритных сварных конструкций ухудшаются пластические свойства сталей, а следовательно, снижается их трещиностойкость, что обуславливает зарождение и развитие трещиноподобных дефектов. Наличие таких дефектов подтверждает освидетельствование оборудования. На заводе выполнен большой объем работ по техническому его диагностированию методами неразрушающего контроля и определен остаточный ресурс [2, 3]. Работоспособность оборудования оценивали путем проверки прочности расчетом [3] по допускаемым напряжениям; на статическую прочность; на прочность при малоцикловых нагрузках; на сопротивление хрупкому разрушению; с учетом коррозионного износа. Сопротивление хрупкому разрушению считается обеспеченным [3], если для выбранного расчетного дефекта в виде трещины в рассматриваемом режиме эксплуатации коэффициент интенсивности напряжений (КИН) меньше допускаемого значения, определенного при испытаниях образцов в соответствии с ГОСТ 25.506–85 [4]. Однако реальным остаточным ресурсом оборудования с трещиноподобным дефектом является время его роста от обнаруженного до критического размера, что не регламентируют действующие нормативные документы.

Поэтому целесообразно разработать методику оценки остаточного ресурса такого оборудования на основе критериев механики усталостного разрушения. При этом, используя размеры поверхностных и внутренних трещиноподобных дефектов, обнаруженных при освидетельствованиях, кинетические диаграммы усталостного разру-

Контактная osoba: К. И. КИРИЛЛОВ, e-mail: meop@pochta.ru

шения (КДУР), полученные при испытаниях образцов, изготовленных из отработавших в составе этого оборудования материалов, зная размеры максимально допустимых дефектов, можно рассчитать время роста дефекта от обнаруженного размера до критического, а следовательно, определить остаточный ресурс оборудования.

Применим некоторые положения предлагаемой методики для определения остаточного ресурса элементов обечайки корпуса изотермического хранилища жидкого аммиака (ST) емкостью 30000 м³, представляющего собой цилиндрический резервуар с диаметром основания 51,816 м и высотой 21,336 м. Температура хранения жидкого аммиака –33°С, его плотность 681,36 кг/м³. Обечайка ST имеет равнопрочную конструкцию, обеспечивающую примерно равные напряжения при наливе продукта во всех девяти сварных поясах вследствие уменьшения их толщин с высотой от основания. Толщина нижнего пояса 0,0263 м, а верхнего 0,008 м. Максимальный уровень налива продукта 21,168 м. Резервуар эксплуатируется 30 лет. За это время выполнены два освидетельствования, по результатам которых он допущен к работе. Во время последнего освидетельствования при визуальном контроле на обечайке обнаружен участок точечно-язвенной коррозии с глубиной поражения приблизительно 0,001 м, расположенный на высоте 9,145 м над днищем на поясе толщиной 0,0154 м.

Установлено [5], что на дне коррозионных язв могут зарождаться микротрещины, которые при эксплуатационном нагружении способны объединиться и образовывать макротрещину. Так как достоверно определить наличие либо отсутствие такой трещины методами неразрушающего контроля невозможно, а по степени коррозионного поражения резервуар допускается к эксплуатации, то такие дефекты следует рассматривать как концентраторы напряжений в виде поверхностных полуэллиптических трещин с такой же глубиной, как у язв, и рассчитывать остаточный ресурс конструкции с позиций механики разрушения. Ультразвуковым контролем в обечайке выявлены внутренние дефекты, уровень эхо-сигналов от которых превышал браковочный. Наиболее опасный дефект имел размер 0,0062 м, и его можно представить в виде внутренней эллиптической трещины с малой полуосью 0,0031 м, расположенной на высоте 2,287 м над днищем ST на поясе толщиной 0,0237 м.

Рассчитаем остаточный ресурс ST, определяемый временем роста дефектов от выявленных размеров до критических. На первом этапе необходимо определить возможность роста обнаруженных трещиноподобных дефектов при эксплуатационных нагрузках. Цилиндрическая обечайка хранилища подвергается циклическому нагружению вследствие изменения уровня налива жидкого аммиака, вызванного перегрузкой продукта, который практически является ингибитором коррозии для стали, из которой изготовлено ST. Следовательно, можно считать эксплуатационное нагружение усталостным. Установлено, что изменение уровня жидкого аммиака во времени имеет случайный характер. При статистической обработке результатов измерений уровня аммиака за четыре года методом пересечения заданного уровня [6] выявлено, что в среднем он меняется от 4,92 до 11,51 м с частотой нагружения 186 циклов в год. При расчете использовали экстремальные значения изменения уровней – от 1,2 до 16,7 м.

При определении напряжений в обечайке резервуара применяли безмоментную теорию оболочек [7], в соответствии с которой эквивалентное напряжение в любом ее элементе

$$\sigma = P \cdot r / t, \quad (1)$$

где P – внутреннее давление в резервуаре; r – радиус основания резервуара; t – толщина его стенки. В нашем случае

$$P = P_1 + P_2, \quad (2)$$

где P_1 – гидростатическое давление столба жидкости; $P_2 = 0,00689643$ МПа – давление насыщенных паров над поверхностью жидкого аммиака.

Если высота местонахождения дефекта над днищем равна H , плотность жидкого аммиака 681,36 кг/м³, а его уровень в хранилище h , то выражение (1) для определения напряжения в области дефекта можно представить в виде

$$\sigma = 0,173 \cdot (h - H + 1,0328) / t. \quad (3)$$

При использовании формулы (3) получаем, что максимальное напряжение в зоне поверхностного дефекта 96,47 МПа, а минимальное равно нулю, так как минимальный уровень аммиака ниже местонахождения дефекта. Следовательно, размах напряжений, учитываемый при циклическом нагружении, равен 96,47 МПа. Для внутреннего дефекта, в соответствии с уравнением (3), он равен 112,75 МПа.

КИН для поверхностной полуэллиптической трещины [8]

$$K_1 = 1,1\sigma\sqrt{\pi l} / \theta, \quad (4)$$

где l – глубина трещины; θ – параметр, равный 1,1026 при соотношении осей эллипса 0,2 в соответствии с рекомендациями [8]. Подставив значения l , θ и σ в формулу (4), получаем $K_1 = 5,67 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Для роста трещины необходимо, чтобы это значение превышало порог усталостной трещиностойкости (ΔK_{th}) для исследуемой стали. Так как данные для стали А537-С1, из которой изготовлены нижние пояса резервуара, отсутствуют, воспользовались параметрами субкритического роста усталостных трещин в отечественном ее аналоге стали 09Г2С, для которой $\Delta K_{th} = 8,68 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ [9], по нашим результатам $\Delta K_{th} = 6,52 \div 7,49 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Если по формуле (4) определить глубины трещин, которые при эксплуатационном размахе цикла нагружения, равном 96,47 МПа, соответствуют минимальному и максимальному из вышеуказанных порогов, то видно, что они реализуются при $l = 0,00132 \div 0,00234 \text{ м}$. Так как определенная при освидетельствовании глубина коррозионной язвы весьма приближительна, а при испытаниях на усталостную трещиностойкость разброс значений ΔK_1 и dl/dN (скорости роста трещины) составляет 10%, то с учетом того, что при длительной эксплуатации возможно снижение ΔK_{th} на 20...25% [10], можно сделать вывод, что при существующем эксплуатационном циклическом нагружении концентратор напряжений в виде коррозионной язвы глубиной свыше 0,001 м может быть причиной зарождения и роста усталостной трещины в обечайке корпуса резервуара.

Для дефекта в виде внутренней эллиптической трещины при соотношении осей 0,2 [11]

$$K_1 = 0,952\sigma\sqrt{\pi l}, \quad (5)$$

где l – малая полуось эллиптического дефекта.

При подстановке параметров l и σ в формулу (5) получаем $K_1 = 10,59 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, что превышает значение ΔK_{th} . Следовательно, оба трещиноподобных дефекта могут развиваться при эксплуатационной нагрузке.

При расчете остаточного ресурса ST, определяемого ростом поверхностного дефекта, воспользуемся КДУР (см. рисунок), согласно которой $\Delta K_{th} = 7,33 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Этому пороговому значению по формуле (4) соответствует $l = 0,00167 \text{ м}$. Максимально допустимая глубина дефекта для этого пояса ST равна 0,00947 м, при которой по КДУР $\Delta K_1 = 17,43 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Используя КДУР, определим число циклов нагружения N , необходимое для роста трещины по глубине от 0,00167 до 0,00947 м. На этом участке КДУР выполняются условия плоской деформации, как в образцах толщиной 0,024 м, с использованием которых она получена, так и в обечайке ST, которая в месте нахождения дефекта имеет толщину 0,0154 м. В связи с наличием перегиба на КДУР при $\Delta K_1 = 11,65 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ разделим ее на две части, на которых ΔK_1 изменяется в пределах 7,33...11,65 и 11,65...46,67 $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$, и каждую из них представим отдельной степенной функцией в виде $dl/dN = C \cdot \Delta K_1^b$, где C и b – константы, определяемые с помощью одного из методов получения эмпирических формул [12].

Для первой и второй частей КДУР получаем соответственно:

$$dl/dN = 1,423 \cdot 10^{-22} \cdot \Delta K_1^{13,89} \text{ м/cycle}, \quad (6)$$

$$dl/dN = 7,52 \cdot 10^{-11} \cdot \Delta K_1^{2,74} \text{ m/cycle.} \quad (7)$$

КДУР стали 09Г2, полученная при нагружении на воздухе балочных образцов 0,012×0,024×0,15 м с частотой 5 Hz и асимметрией цикла нагружения 0,05:

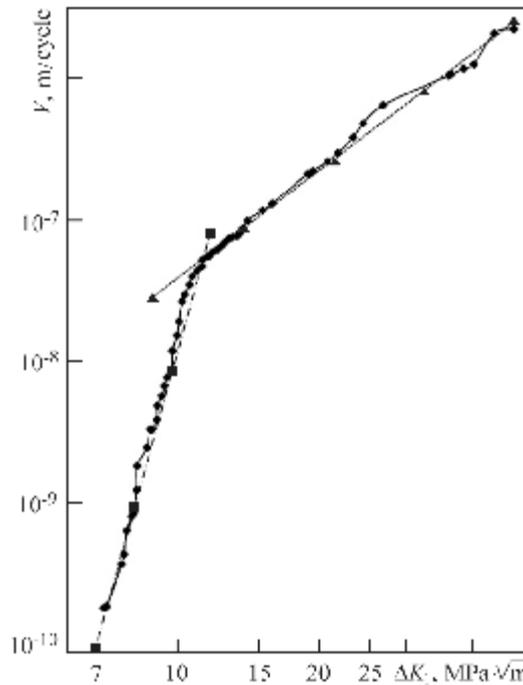
▲ – $dl/dN = 1,423 \cdot 10^{-22} \cdot \Delta K_1^{13,89}$
(штриховая кривая);

■ – $dl/dN = 7,52 \cdot 10^{-11} \cdot \Delta K_1^{2,74}$
(штрихпунктирная).

Kinetic diagrams of fatigue crack growth of 09Г2 steel in air under loading of prismatic specimens of size 0.012×0.024×0.15 m with frequency 5 Hz and load ratio 0.05:

▲ – $dl/dN = 1,423 \cdot 10^{-22} \cdot \Delta K_1^{13,89}$
(dashed curve);

■ – $dl/dN = 7,52 \cdot 10^{-11} \cdot \Delta K_1^{2,74}$
(dash-dotted).



Подставляя в формулу (4) значения $\sigma = 96,47$ МПа и $\theta = 1,1026$, определяем:

$$\Delta K_1 = 179,12 \cdot l^{0,5}. \quad (8)$$

Подставляя выражение (8) в (6), для первой части КДУР имеем:

$$dl/dN = 2,81 \cdot 10^9 \cdot l^{6,945}. \quad (9)$$

Для определения числа циклов нагружения, необходимого для увеличения глубины трещиноподобного дефекта от 0,00167 м, соответствующей согласно формуле (9) $\Delta K_{th} = 7,33$ МПа \sqrt{m} , до 0,00423 м, когда в его вершине $\Delta K_1 = 11,65$ МПа \sqrt{m} , необходимо проинтегрировать выражение (9):

$$\int_{0,001670}^{0,004230} l^{-6,945} dl = 2,81 \cdot 10^9 \int dN. \quad (10)$$

Решив уравнение (10), получаем $N = 1902799$ cycles. Выполнив аналогичные вычисления для второй части КДУР по выражению (7), получаем, что l возрастает от 0,00423 до 0,00947 м за 46941 циклов нагружения, что в сумме с N для первой части дает 1949740 циклов. Соответственно, при частоте нагружения 186 циклов в год остаточный ресурс ST, рассчитанный по времени роста обнаруженного при освидетельствовании в обечайке толщиной 0,0154 м трещиноподобного дефекта глубиной 0,00167 м до максимально допустимой 0,00947 м, составит 10482 года. Для внутренней эллиптической трещины

$$\Delta K_1 = 190,25 \cdot l^{0,5}. \quad (11)$$

Размер обнаруженного на этом поясе ST дефекта 0,0062 м, чему соответствует $\Delta K_1 = 10,59$ МПа \sqrt{m} . Максимально допустимый размер дефекта для этого пояса ST равен 0,007935 м, при котором $\Delta K_1 = 16,94$ МПа \sqrt{m} . При подстановке выражения (11)

в (6) и (7) и интегрировании в соответствующих пределах получаем $N = 53458$ cycle, что соответствует 287 годам.

Темпы развития выявленных при освидетельствовании дефектов малы: размер внутреннего за 15 лет (период между освидетельствованиями) увеличится от 0,0062 до 0,00635 м. Однако следует иметь в виду, что приведенный расчет не учитывает многие факторы, способные интенсифицировать скорость роста трещиноподобных дефектов, в частности: остаточные сварочные напряжения играют роль постоянной составляющей при циклическом нагружении и по некоторым оценкам [13, 14] могут создавать положительную асимметрию цикла нагружения $R = 0,33$, при которой возможно увеличение dl/dN на порядок при тех же размахах ΔK [9, 15]; деградация механических свойств, вызванная длительной эксплуатацией, может вызывать снижение трещиностойкости стали на 20...40% [10]; кинетика роста трещин при нерегулярном как по частоте, так и по размаху цикле эксплуатационного нагружения может существенно отличаться от определенной при испытании образцов с постоянными параметрами нагружения. Поэтому при обнаружении трещиноподобных дефектов целесообразно измерять остаточные напряжения в этой зоне, и контролировать их с помощью АЭ мониторинга даже тогда, когда дефект ремонтируется.

Исследование параметров АЭ при испытаниях образцов для получения КДУР показало, что в диапазоне частот 0,2...0,5 МГц при коэффициенте усиления приемного тракта аппаратуры АЭ равном 70 dB информативная амплитуда сигналов АЭ на выходе датчика с коэффициентом преобразования не менее $1,6 \cdot 10^9$ V/m не превышала 180 μ V во всем актуальном диапазоне изменения ΔK_1 . Измеренные при АЭ мониторинге хранилища уровень шумов и затухание оказались равными 42 μ V и 10 dB/m соответственно. Следовательно, для регистрации сигналов АЭ от растущей трещины в эксплуатационных условиях датчик должен находиться от источника сигнала на расстоянии не более 1,3 м. При установке на такой дистанции 2–3 датчиков АЭ можно, при обеспечении пространственной селекции сигналов АЭ, контролировать рост дефекта без применения дорогостоящих многоканальных систем АЭ контроля. Особо опасные поднадзорные конструкции регулярно подвергаются осмотрам и освидетельствованиям, при которых пропуск недопустимых дефектов мало вероятен, а если и возможен, то, как показывают расчеты, подрастание дефекта за промежуток времени между освидетельствованиями весьма незначительно, что делает малоэффективным и многозатратным АЭ мониторинг всей конструкции.

ВЫВОДЫ

Предложено определять в поднадзорном оборудовании минимальный размер трещиноподобных дефектов, когда реализуется порог трещиностойкости в эксплуатационных условиях, что может вызвать рост трещин. Остаточный ресурс, зависящий от времени роста трещин от обнаруженного размера до максимально допустимого, можно рассчитывать с помощью кинетических диаграмм разрушения, полученных при испытаниях в эксплуатационных условиях образцов, изготовленных из материалов, отработавших соответствующий срок в составе конструкций. Эксплуатационный АЭ мониторинг особо опасных конструкций целесообразно осуществлять только в зонах местонахождения выявленных трещиноподобных дефектов, используя образцовые параметры АЭ, сопровождающей рост трещин при испытаниях на трещиностойкость, с учетом особенностей распространения сигналов АЭ в конструкции.

РЕЗЮМЕ. Запропоновано оцінювати з позицій механіки втомного руйнування залишковий ресурс хіміко-технологічного обладнання, що експлуатується з виявленими під час діагностування тріщиноподібними дефектами, враховуючи, що руйнуванню передуватиме виникнення та субкритичний розвиток втомних тріщин. Час зростання дефекту від виявленого розміру до максимально допустимого визначено за допомогою кінетичних діаграм втомного руйнування, побудованих під час випроб зразків, виготовлених з матеріалу конструкції. Розрахований час підростання дефектів до критичного розміру під час експлуатаційних навантажень значно більший, ніж термін регламентної експлуатації сховища рідкого аміаку. Однак поданий розрахунок ресурсу не враховує усі чинники, які можуть

інтенсифікувати швидкість росту тріщин. Запропоновано виконувати акустико-емісійний контроль за розвитком виявлених дефектів.

SUMMARY. It is proposed to evaluate the value of the residual life of chemical engineering equipment, operating with the crack-like defects, detected during failure diagnostics from the point of view of the fracture mechanics, taking into account that the crack formation and its subcritical growth previous to the final failure of any long-term operating equipment. It is proposed to determine the crack growth rate from its first indicated size up to the tolerance limit by fracture kinetic diagrams obtained during tests of the specimens made of the same material as the constructions. The calculated time of the crack increment up to the critical size under the exploitation loading is essentially longer than the regulated ammonia storage tank exploitation period. However, the proposed resource calculations are notable to take into the account all the factors that may accelerate the crack growth rate. It is proposed to perform the acoustic emission checking of the found crack-like defects development in all cases.

1. *Ремонт магистральных и промысловых газопроводов: Справ. пос.* / В. Н. Груднистый, Е. Е. Зорин, С. А. Егурцов и др. – К.: Интерграфик, 1996. – 192 с.
2. *ДСТУ 4046-2001.* Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні вимоги. – К.: Держстандарт України, 2001. – 24 с.
3. *НПАОП 0.00-7.02-93.* Проведение работ по оценке остаточной работоспособности технологического оборудования нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств. – К.: Госназдорохрантруда, 1993. – 39 с.
4. *ГОСТ 25.506-85.* Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 55 с.
5. *Эльманович В. И., Сурина Т. А., Эльманович И. В.* Техническая диагностика сосудов давления, длительное время эксплуатирующихся в коррозионноактивных средах при циклическом нагружении // *Химическая техника.* – 2005. – № 3. – С. 27–30.
6. *Коллинз Дж.* Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
7. *Федосьев В. И.* Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1967. – 552 с.
8. *Партон В. З., Морозов Е. М.* Механика упругопластического разрушения. – М.: Наука, 1985. – 502 с.
9. *Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов* / О. Н. Романов, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин и др. // *Механика разрушения и прочность материалов.* Справ. пос. в 4-х т. / Под ред. В. В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1990. – 4. – 679 с.
10. *Цирульник О. Т.* Оцінка деградації властивостей як характеристика технічного стану матеріалів конструкцій тривалої експлуатації // *Техн. діагностика и неразр. контроль.* – 2009. – № 2. – С. 36–41.
11. *Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П.* Справочник. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. – М.: Машиностроение, 1985. – 223 с.
12. *Львовский Е. Н.* Статистические методы построения эмпирических формул. – М.: Высш. шк., 1988. – 239 с.
13. *Лукьяненко Н. А., Сергиев Б. П., Шелобоков В. И.* Некоторые направления реализации диагностирования оборудования химических производств // *Химическая техника.* – 2005. – № 9. – С. 20–26.
14. *Сергиев Б. П., Лукьяненко Н. А.* Оптимизация межремонтных периодов технологических установок // Там же. – 2008. – № 7. – С. 20–27.
15. *Троценко В. Т., Покровский В. В., Прокопенко А. В.* Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении. – К.: Наук. думка, 1987. – 253 с.

Получено 21.10.2009