

**А.А. Миронов<sup>1</sup>, С.А. Горохов<sup>2</sup>, Е.А. Панькин<sup>2</sup>, Е.Л. Святошенко<sup>2</sup>**  
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД**  
**К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СОСУДОВ**  
**И АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ УСТАЛОСТНОГО**  
**РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

<sup>1</sup>*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева*

<sup>2</sup>*Нижегородский центр технической диагностики, экспертизы и сертификации*

Предложен общий подход к разработке программ ресурсных испытаний для обоснования сроков продления эксплуатации сосудов и аппаратов после выработки расчетного ресурса сварных соединений. Рассмотрены стадии образования и роста усталостной макротрещины. Показана возможность воспроизведения условий усталостного разрушения натуральных объектов при испытании малогабаритных сварных узлов.

*Ключевые слова:* сосуд давления, сварной шов, штуцер, усталость, рост усталостной трещины.

Широко распространенным видом оборудования промышленных и транспортных объектов являются сосуды и аппараты, работающие под давлением. Технологические процессы, связанные с изменением давления и температуры рабочей среды, приводят к накоплению усталостных повреждений в сварных узлах оборудования. Накопленный опыт исследований по проблеме много – и малоциклового усталости сварных конструкций, обзор которых приведен в работах [1 – 3], нашел свое отражение в нормативных документах [4, 5], позволяющих выполнить расчетную оценку ресурса сосудов и аппаратов на стадии до образования усталостной трещины.

При проведении экспертизы промышленной безопасности опасных объектов часто возникает ситуация, когда из результатов расчетов, выполненных с привлечением современных вычислительных систем, следует, что сварные узлы сосудов и аппаратов выработали ресурс из условия усталостной прочности. В тоже время, результаты их диагностики с привлечением средств неразрушающего контроля свидетельствуют об отсутствии признаков усталостного разрушения. Данная ситуация связана с тем, что расчетные методики основаны на использовании кривых циклической прочности металла и значений эффективных коэффициентов концентрации напряжений сварных узлов, дающих консервативную оценку ресурса. В этом случае возникает проблема обоснования возможности дальнейшей эксплуатации и оценки остаточного ресурса рассматриваемых объектов.

Наиболее достоверным подходом к решению поставленной проблемы является выполнение экспериментальных исследований. Проведение натуральных испытаний, как правило, не представляется возможным. Испытания стандартных образцов не решают задач воспроизведения напряженно-деформированного состояния (НДС) и свойств сварного соединения натурального узла. Возможным вариантом решения возникшей проблемы является проведение усталостных испытаний сварных узлов, как специально изготовленных, так и вырезанных из типового натурального объекта. В этом случае воспроизводятся физико-механические свойства сварного соединения, масштабный фактор, влияние градиента НДС, конструктивные особенности узла, влияние технологического процесса сварки.

При проведении испытаний необходимо обеспечить условия подобия процессов усталостного разрушения испытываемого узла и натурального объекта, определяемые параметрами НДС. На стадии накопления рассеянных усталостных повреждений такие

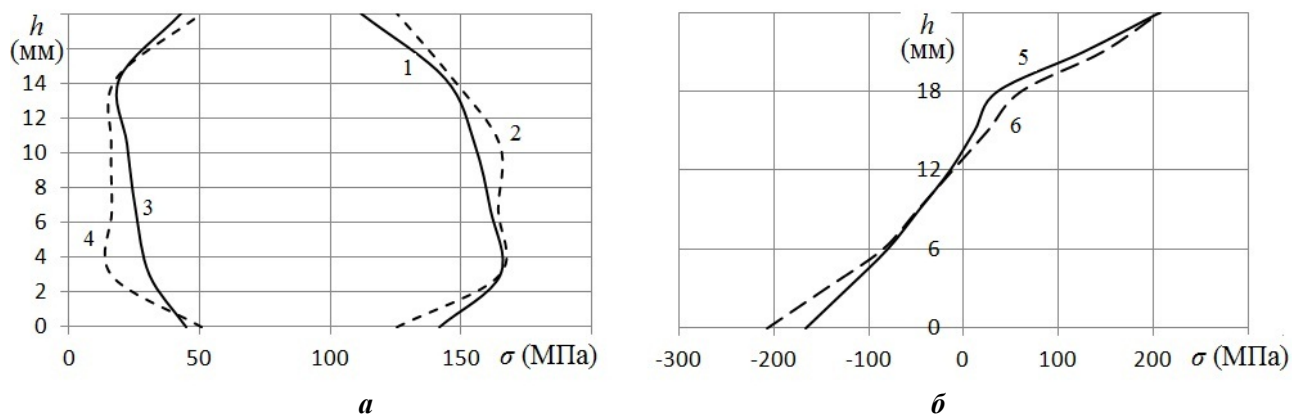
условия обеспечиваются равенством амплитуд приведенных напряжений  $\sigma_{np} = \sigma_1 - \sigma_3$ , где  $\sigma_1, \sigma_3$  – главные напряжения. На стадии развития локализованного повреждения – усталостной трещины условия подобия определяются коэффициентом интенсивности напряжений (КИН), соответствующим типу раскрытия трещины. Наиболее распространенный тип трещин нормального отрыва характеризуется КИН нормального отрыва и при соблюдении геометрического подобия необходимо выполнение равенства размаха напряжения, нормального к поверхности трещины.

В качестве примеров на рис. 1 представлены специально изготовленные крестообразные образцы для исследования усталости сварных штуцерных узлов, выполненных из двухслойной стали, и образец, вырезанный из натурального аппарата, для исследования процесса развития усталостной трещины в сварном соединении рубашки с корпусом сосуда.



**Рис. 1. Сварные узлы для усталостных испытаний (стрелками указаны зоны усталостного разрушения):**  
**а – штуцерное соединение; б – соединение рубашки с корпусом сосуда**

На рис. 2 представлено сравнение результатов расчета с использованием численной процедуры метода конечных элементов (МКЭ) распределений напряжений по сечению сварных швов в зонах усталостного разрушения в сосудах в условиях термосилового нагружения (сплошные линии) и в представленных на рис. 1 сварных узлах при испытании на простое растяжение штуцерных соединений и испытании на трехточечный изгиб соединения рубашки с корпусом сосуда (штриховые линии).



**Рис. 2. Распределение напряжений по высоте сварного шва:**  
**а – штуцерное соединение; б – соединение рубашки с корпусом сосуда;**  
**1, 2 – приведенные напряжения; 3, 4 – радиальные напряжения; 5, 6 – напряжения нормальные к плоскости усталостного разрушения**

Из представленных на рис. 2 результатов следует возможность моделирования двухосного нагружения штуцерных узлов сосудов на крестообразных образцах при одноосном нагружении. Работа сварного узла рубашки с корпусом сосуда воспроизводится при испытании образцов на трехточечный изгиб.

Программа проведения испытаний зависит от исследуемой стадии усталостного разрушения сварного узла. Для стадии образования усталостной трещины в процессе испытаний могут быть решены следующие задачи – обоснование возможности эксплуатации на заданный срок, определение остаточного ресурса, определение действительного значения эффективного коэффициента концентрации напряжений. Для учета стохастического характера явления усталости при разработке программы проведения испытаний, по мнению авторов, необходимо учитывать нормативные коэффициенты запаса по числу циклов нагружения  $n_N = 10$  и амплитуде напряжений  $n_\sigma = 2$ , обеспечивающие требуемый уровень безопасности эксплуатации объекта. Учет коэффициентов запаса приводит к двум различным программам испытаний.

Первый вид испытания соответствует нагрузкам, создающим в расчетном сечении узла амплитуду приведенного напряжения, равную значению для натурального объекта. Число циклов нагружения в испытании определяется планируемыми сроком продления эксплуатации объекта и определяется выражением:

$$N_u = N_g + N_n \cdot n_N, \quad (1)$$

где  $N_g$  – существующая наработка объекта, для образцов из натурального объекта  $N_g = 0$ ;  $N_n$  – число циклов нагружения в течение планируемого срока продления эксплуатации.

Вторая программа испытаний предусматривает увеличение нагрузок в соответствие с коэффициентом запаса по амплитуде напряжений  $n_\sigma$ . Число циклов нагружения в испытании определяется выражением:

$$N_u = N_g + N_n. \quad (2)$$

При доведении испытаний до появления усталостной макротрещины остаточный ресурс узла  $N_{ост} = N_n$  и определяется из выражений (1) и (2). В этом случае для полученной базы испытания может быть определено значение эффективного коэффициента концентрации напряжений, равного отношению разрушающей амплитуды напряжений по кривой усталости материала и амплитуды напряжений в зоне образования трещины по результатам расчетов без учета геометрических особенностей сварного шва. По результатам испытаний штуцерных сварных соединений из двухслойной стали, выполненных с конструктивным зазором и представленных на рис.1, получены средние значения эффективных коэффициентов концентрации напряжений, составляющие для внутренней поверхности патрубка  $k_\sigma = 1,3$ , для зоны сварного шва  $k_\sigma = 1,5$ .

Рассмотрение второй стадии усталостного разрушения, связанной с развитием усталостной трещины, возникает при обосновании возможности дальнейшей эксплуатации оборудования по результатам неразрушающего контроля. Положительные результаты контроля свидетельствуют об отсутствии на момент контроля в сварном соединении макротрещин с размерами, превышающими установленный порог чувствительности принятого метода контроля. В качестве начального размера возможной макротрещины для конструкций, выработавших расчетный ресурс, принимается один из следующих вариантов – размер дефекта, соответствующий порогу чувствительности метода контроля, размер области в концентраторе напряжений, где в условиях многоциклового усталости расчетная амплитуда напряжений превышает предел усталости материала, размер области циклического пластического деформирования в условиях малоциклового усталости [6]. Программа испытаний для второй стадии усталостного разрушения предполагает исследование закономерностей роста усталостной трещины в сварном узле с определением

характеристик циклической трещиностойкости материала, входящих в уравнение для скорости роста трещины. Наиболее распространенной в расчетной практике зависимостью для скорости роста усталостной трещины при размахх КИН, превышающих пороговый уровень, является уравнение Пэриса [7]:

$$v = C \left( \frac{\Delta K}{\sqrt{1-R}} \right)^n, \quad (3)$$

где  $C$  и  $n$  – параметры циклической трещиностойкости материала,  $\Delta K$  – размах КИН,  $R$  – коэффициент асимметрии цикла нагружения. Использование зависимости (3) позволяет для случаев термосилового нагружения объектов с переменным уровнем напряжений определить эквивалентный размах напряжений при испытании:

$$\Delta \sigma_9 = \left[ \frac{1}{k} \sum \left( \frac{\Delta \sigma_i}{\sqrt{1-R_i}} \right)^n \right]^{\frac{1}{n}},$$

где  $\Delta \sigma_i$  и  $R_i$  – параметры  $i$ -го цикла в повторяющихся блоках нагружения,  $k$  – число циклов в блоке.

Описание развития сквозных дефектов основано на их представлении в виде внутренней эллиптической или поверхностной полуэллиптической трещин. Размер дефекта характеризуется размерами полуосей по глубине  $h$  и протяженности  $c$ . Отношение выражений для скоростей развития дефекта по протяженности и глубине дает дифференциальное уравнение, позволяющее для заданных начальных размеров дефекта получить функциональную зависимость  $c = c(h)$  [8].

Остаточный ресурс конструкции после проведения неразрушающего контроля определяется числом циклов нагружения, соответствующим развитию дефекта от начального размера до предельно допустимого:

$$N_{ост} = \int_{h_0}^{[h]} \frac{1}{v[h, c(h)]} dh,$$

где  $h_0$  – начальная глубина дефекта;  $[h]$  – значение глубины дефекта, определяемое по критерию разрушения с учетом коэффициента запаса, равного 3 [9]. Характерный вид кривой зависимости  $N_{ост}$  от начальной глубины дефекта в виде протяженной поверхностной трещины в узле конструкции, приведенном на рис 1б, представлен на рис. 3. Из представленных результатов следует, что остаточный ресурс конструкции зависит от используемых средств и методик неразрушающего контроля, дающих начальный размер возможного дефекта.

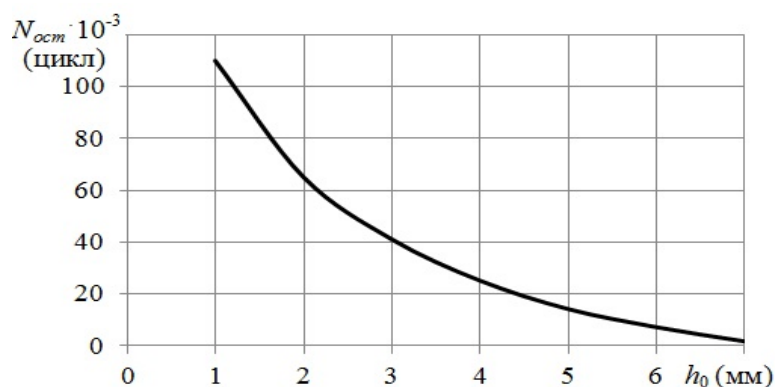


Рис. 2. Зависимость остаточного ресурса от начальной глубины дефекта

Предложенный экспериментально-теоретический подход дает обоснование продления сроков эксплуатации оборудования, выработавшего расчетный ресурс, основанное на апробированных моделях усталостного разрушения, включающих стадии образования и роста усталостной трещины. Расчетная часть позволяет смоделировать НДС образцов, эквивалентное натурному объекту по повреждающему воздействию. Экспериментальная часть позволяет учесть особенности сопротивления усталостному разрушению сварных соединений. Наиболее эффективным является применение данного подхода для серийного оборудования.

### *Библиографический список*

1. Кудрявцев, И.В. Усталость сварных конструкций [Текст] / И.В. Кудрявцев, Н.Е. Наумченков. – М.: Машиностроение, 1976. – 270 с.
2. Винокуров, В.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности [Текст] / В.А. Винокуров, С.А. Куркин, Г.А. Николаев. – М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.
3. Карзов, Г.П. Особенности развития усталостных трещин в сварных штуцерных соединениях / Г.П. Карзов, В.П. Леонов, В.З. Марголин [Текст] // Автоматическая сварка. 1992. № 6. С. 3-8.
4. ГОСТ Р 52857.6 – 2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность при малоцикловых нагрузках [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2008. – 17 с.
5. РД 26-11-05-85. Сосуды и аппараты из двухслойной стали. Нормы и методы расчета на прочность [Текст]. – 5 с.
6. Волков, В.М. Объединенная модель образования и роста усталостных трещин в концентраторах напряжений / В. М. Волков, А. А. Миронов [Текст] // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2005. Вып. 67. С. 20-25.
7. РД 50-345-82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 96 с.
8. Варфоломеев, И. В. Критерии и устойчивые формы роста несквозных трещин при циклическом нагружении. Сообщение 2 / И.В. Варфоломеев, В.А. Вайншток, А.Я. Красовский // Проблемы прочности. 1990. № 9. С. 11-16.
9. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86). – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.