

## ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ТРЕЩИНОПОДОБНЫХ ДЕФЕКТОВ НА ОСНОВЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2022 г. Л.А. Прокопьев<sup>1,\*</sup>, Я.М. Андреев<sup>1,\*\*</sup>, Е.С. Лукин<sup>2,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр  
Сибирского отделения Российской академии наук», Россия 677000 Якутск, ул. Петровского, 2

<sup>2</sup>Институт физико-технических проблем Севера им В.П. Ларионова Сибирского отделения

Российской академии наук, Россия 677000 Якутск, ул. Октябрьская, 1

E-mail: \*l.prokopyev@yandex.ru; \*\*yakovmich@yandex.ru 2; \*\*\*lukines@iptn.yasn.ru

Поступила в редакцию 22.07.2022; после доработки 06.10.2022

Принята к публикации 18.10.2022

Исследуются научные основы для разработки метода оценки степени опасности одиночных трещиноподобных дефектов, обнаруженных в тонколистовых металлических элементах конструкций, с помощью АЭ-контроля с использованием способа низкотемпературного нагружения. В качестве критерия предлагается использовать «критическую активность» источника АЭ, вычисленную с помощью уравнений механики разрушения и теплопроводности. Нагружение выполняется охлаждением локальной зоны кольцеобразного вида с помощью закладки диоксида углерода с температурой  $-78^{\circ}\text{C}$ . При этом в результате термического сужения возникают растягивающие напряжения, нагружающие область дефекта при АЭ-контроле. Возникающие при этом температурное поле и механические напряжения рассчитаны известными теоретическими методами с помощью уравнений теплопроводности и механики разрушения. Кольцеобразный вид зоны охлаждения обуславливает инвариантность нагружения относительно угла расположения плоскости трещины. Использование критериев механики разрушения осуществляется с помощью известной степенной зависимости числа актов акустических эмиссий от коэффициента интенсивности напряжений. Таким образом, показана возможность использования критериев механики разрушения для оценки опасности трещиноподобных дефектов методом АЭ-контроля с помощью известной степенной зависимости числа актов акустических эмиссий от коэффициента интенсивности напряжений.

*Ключевые слова:* акустико-эмиссионный контроль, низкотемпературное нагружение, коэффициент интенсивности напряжений, число актов акустических эмиссий.

DOI: 10.31857/S0130308222120028, EDN: BUUVDP

### ВВЕДЕНИЕ

Акустико-эмиссионный (АЭ) метод неразрушающего контроля является одним из перспективных методов при раннем выявлении и оценке зарождающихся трещиноподобных дефектов [1]. Из работ Данегана, Буйло и др. [2] известно о наличии степенной зависимости общего числа зарегистрированных актов акустических эмиссий от коэффициента интенсивности напряжений (КИН) для трещиноподобных дефектов. В настоящей работе исследуется возможность применения данной зависимости для более подробной оценки степени опасности трещиноподобных дефектов, классифицированных по ПБ 03-593-03 [3], как 4-й, наиболее опасный класс дефектов, с использованием критериев механики разрушения и способа локального низкотемпературного нагружения [1]. Данное исследование может позволить разработать более точный и подробный метод анализа опасных АЭ-источников, основанный на критериях механики разрушения. Поставлена следующая цель работы: расчетно-экспериментальное исследование закономерностей способа низкотемпературного нагружения при проведении акустико-эмиссионного контроля.

### РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СПОСОБА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРУЖЕНИЯ

В работе исследуется возможность оценки степени опасности известного единичного источника АЭ на листовом элементе тонкостенной конструкции способом локального низкотемпературного нагружения объекта. Данный способ основан на создании локальных растягивающих напряжений в объекте в результате термических деформаций при охлаждении определенной зоны объекта контроля. При этом величина нагружения возрастает при распространении низкотемпературной зоны посредством теплопроводности. Схема нагружения показана на рис. 1.

Выбран кольцеобразный вид зоны охлаждения для инвариантности нагружения относительно угла расположения плоскости трещины, а также для уменьшения воздействия низких температур

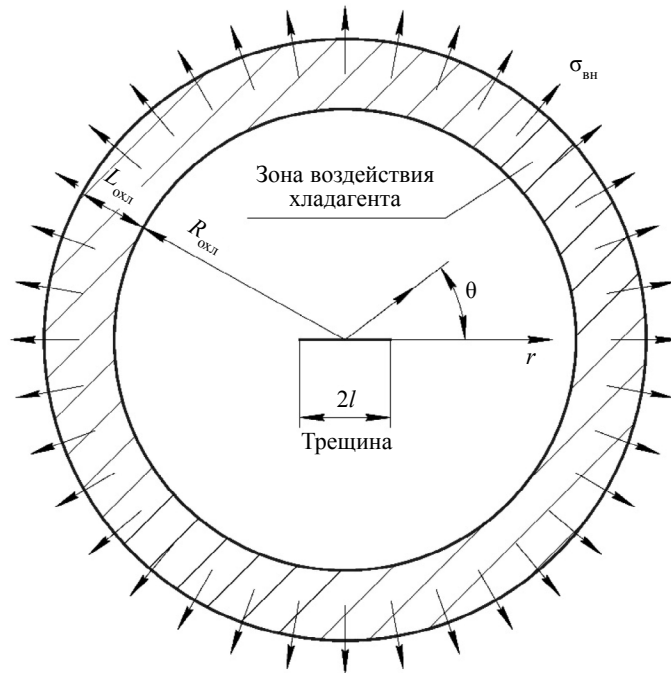


Рис. 1. Схема локального низкотемпературного нагружения.

непосредственно на область исследуемого дефекта. Размеры зоны охлаждения выбраны условно с точки зрения достаточности возникающих напряжений при нагружении и удобства проведения контроля на реальном объекте.

В настоящей работе предлагается метод оценки опасности трещиноподобных дефектов на основе сравнения активности действующего источника АЭ с теоретической активностью критического, недопустимого для исследуемого объекта контроля дефекта. В случае, если размеры найденного в ходе неразрушающего контроля дефекта неизвестны, предлагается с помощью локального низкотемпературного нагружения измерить и сравнить с «предельной» активностью данного источника АЭ. Кольцеобразный вид закладки хладагента должен обеспечить инвариантность АЭ-сигналов от угла ориентации плоских трещиноподобных дефектов.

Известно наличие степенной зависимости числа актов акустических эмиссий от коэффициента интенсивности напряжений. Наличие связи между характеристиками АЭ-сигналов и параметрами механики разрушения дает возможность вывести расчетными методами критическую активность источников АЭ, характеризующую предельное состояние материала. Данная зависимость представлена в работе [2] в следующем виде:

$$N_a = \beta K^\alpha, \quad (1)$$

где  $K$  — коэффициент интенсивности напряжений;  $N_a$  — число актов акустических эмиссий;  $\alpha$ ,  $\beta$  — постоянные коэффициенты, зависящие от типа нагружения, толщины образца и других условий нагружения.

При критическом значении  $K_c$ , характеризующем предельное состояние и стабильный рост трещины, число актов акустических эмиссий достигает также предельных показателей. Однако прогнозировать наступление предельного состояния и стабильный рост трещины по значениям числа актов акустических эмиссий крайне сложно, так как в данном случае требуются известные коэффициенты в вышеупомянутой степенной зависимости, характеризующие условия нагружения, текущие настройки АЭ-комплекса и так далее.

В данной работе предлагается прогнозировать достижение исследуемой трещины предельного значения коэффициента интенсивности напряжений (вязкости разрушения) использованием заранее известных и рассчитанных условий кольцеобразного низкотемпературного нагружения. Таким образом, для элемента тонколистовой стальной конструкции с центрально расположенной трещи-

ной предлагается закладка хладагента в виде твердого диоксида углерода с температурой сублимации  $-78\text{ }^\circ\text{C}$ . По ПБ 03-593-03[3] выставляются все необходимые настройки акустико-эмиссионного комплекса, также предварительно рассчитываются коэффициенты степенной зависимости числа АЭ актов от КИН. При заранее известных и рассчитанных коэффициентах  $\alpha$ ,  $\beta$ , а также известных значениях возникающих напряжений и, соответственно, КИН, становится возможным прогнозирование предельного состояния трещины по значениям числа актов акустических эмиссий с использованием зависимости (1).

С целью расчета возникающих напряжений для выбранной схемы нагружения проведено математическое моделирование данной схемы охлаждения со следующими допущениями и краевыми условиями: решается двумерная осесимметричная задача, в непосредственной зоне контакта с хладагентом действует граничное условие первого рода с постоянной температурой, равной температуре хладагента; все поверхности теплоизолированы, теплота передается теплопроводностью материала объекта. Стандартные решения краевых задач теплопроводности со смешанными граничными условиями приведены в [4]. Для простоты рассматривается одномерное распространение теплоты в теплоизолированной среде. С левой стороны, соответствующей центру нашей модели, реализуется граничное условие второго рода, подразумевающее наличие теплоизоляции. С правой стороны, соответствующей границе закладки хладагента, реализуется граничное условие первого рода с постоянной температурой, равной температуре хладагента. Другие источники или оттоки теплоты отсутствуют. Решается температурное поле в виде разницы температур от первоначальной, в радиальном направлении от центра модели до внутренней границы закладки хладагента. Температурное поле по координате в каждый момент времени выражается по формуле (2), которая описывает стандартное решение краевой задачи теплопроводности со смешанными граничными условиями и приведена в [4]:

$$u_1(r, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{4(t_0 - t_{\text{охл}}) \left[ 2 \sin\left(\frac{\pi k}{2}\right)^2 - 1 \right]}{\pi(2k-1)} \cos\left[\frac{\pi(2k-1)}{2R_{\text{охл}}}\right] r e^{-a_1 \left(\frac{2k-1}{2}\right)^2 \left(\frac{\pi}{R_{\text{охл}}}\right)^2 \tau}, \quad (2)$$

где  $t_0$  — температура всей модели до закладки хладагента,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{охл}}$  — температура хладагента,  $^\circ\text{C}$ ;  $R_{\text{охл}}$  — координата, на которой действует граничное условие первого рода с постоянной температурой, равной температуре хладагента;  $\tau$  — время.

С использованием осесимметричной конфигурации решаемой схемы, приведенной на рис. 1, можно для любого луча  $\theta = -\pi, \dots, +\pi$  применить вышеприведенное стандартное решение в виде формулы (2) с изменением расположения граничных условий. Таким образом, в зоне контакта хладагента с поверхностью образца, т.е. на отрезке  $R_{\text{охл}} < r < R_{\text{охл}} + L_{\text{охл}}$ , действует граничное условие  $t = t_{\text{охл}}$ . Вне зоны охлаждения, т.е. при  $0 < r < R_{\text{охл}}$  и при  $R_{\text{охл}} + L_{\text{охл}} < r$ , температурное поле описывается формулой (2) со сдвигами по оси  $r$  и заменой знака для соответствия с граничными условиями решаемой схемы нагружения. В таком случае, с учетом граничных условий для любого луча  $\theta = -\pi, \dots, +\pi$  (рис. 2), температурное поле в области участка охлаждения выражается в следующем виде:

$$u(r, t) = \begin{cases} u_1(r, t) + t_{\text{охл}} & \text{при } 0 < r \leq R_{\text{охл}} \\ t_{\text{охл}} & \text{при } R_{\text{охл}} < r \leq R_{\text{охл}} + L_{\text{охл}} \\ u_1(2R_{\text{охл}} + L_{\text{охл}} - r, t) & \text{при } R_{\text{охл}} + L_{\text{охл}} < r \end{cases}. \quad (3)$$

Геометрические размеры  $R_{\text{охл}} = 200$  мм,  $L_{\text{охл}} = 50$  мм выбраны для удобства закладки хладагента для реального объекта контроля и в случае необходимости могут быть изменены.

Температурное поле модели по оси  $r$  в четырех моментах времени нагружения представлен на рис. 2.

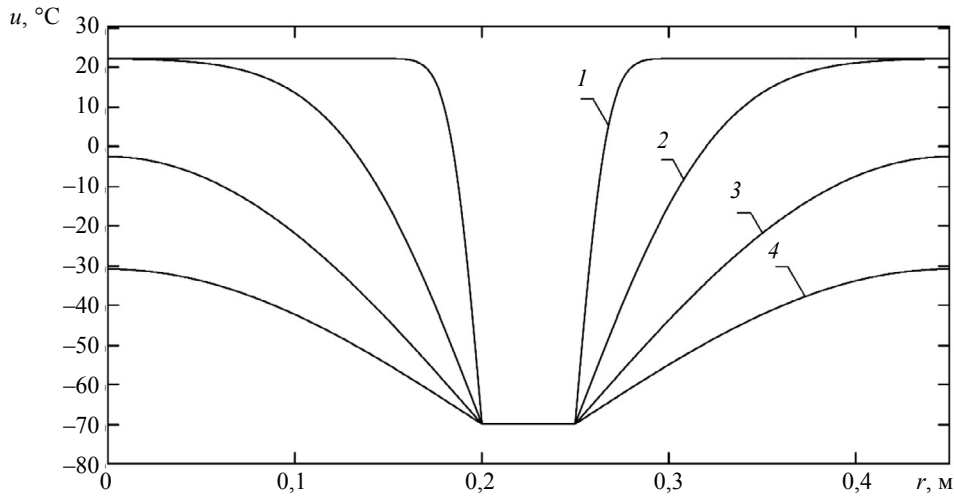


Рис. 2. Температурное поле модели в разных моментах времени нагружения:  
1 — через 5 с; 2 — через 100 с; 3 — через 500 с; 4 — через 800 с.

### ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ТРЕЩИНОПОДОБНОГО ДЕФЕКТА НА ОСНОВЕ СПОСОБА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРУЖЕНИЯ И КРИТЕРИЕВ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Напряжения, возникающие в результате термического сужения, выражаются через известный коэффициент линейного расширения материала. Если разница между начальным и текущим значением температуры материала в заданном участке задано неявно, через распределение поля температур, то средняя суммарная разница температуры в заданном участке определяется путем интегрирования температурного поля на заданном участке. В таком случае при известных значениях распределения температурного поля в каждый момент времени, а также с учетом осесимметричного вида кольцеобразного охлаждения, можно выразить возникающие в результате термического сужения радиальные напряжения, действующие по любому лучу  $\theta = -\pi, \dots, +\pi$  (см. рис. 2):

$$\sigma_{rr}(t) = \alpha_t E \frac{\int_0^{L_{\text{обр}}} u(t, r) dr}{L_{\text{обр}}}, \quad (4)$$

где  $L_{\text{обр}}$  — общая длина рассматриваемого температурного поля образца.

При наличии в модели центрально расположенной трещины коэффициент интенсивности напряжений (КИН) рассчитывается по известным формулам механики разрушения. Радиальные напряжения, возникающие в результате термического сужения, в самом деле возникают в теле модели по мере теплового воздействия на объект. Данные напряжения удобно представить в виде распределенной нагрузки, направленной в радиальном направлении от центра модели, действующей по срединной линии зоны воздействия хладагента. Из известных схем из справочника по КИН [5], наиболее соответствующей данной схеме низкотемпературного нагружения, является схема нагружения диска с центрально расположенной трещиной под распределенной нагрузкой  $\sigma_{\text{вн}} = \sigma_{rr}$ . Формула для выражения КИН в данном случае представлена в следующем виде [5]:

$$K_1 = \sigma_{rr} \sqrt{\pi a} \cdot F(a, R), \quad (5)$$

где  $K_1$  — КИН по первой моде нагружений;  $a$  — полудлина трещины;  $R$  — радиус диска;  $F(a, R)$  — поправочный коэффициент, который для данной схемы нагружения представлен в виде [5]:

$$F(a, R) = \frac{1 - 0,5C + 1,6873C^2 - 2,671C^3 + 3,32027C^4 - 1,8935C^5}{\sqrt{1 - C}}, \quad (6)$$

где  $C = a/R$ .

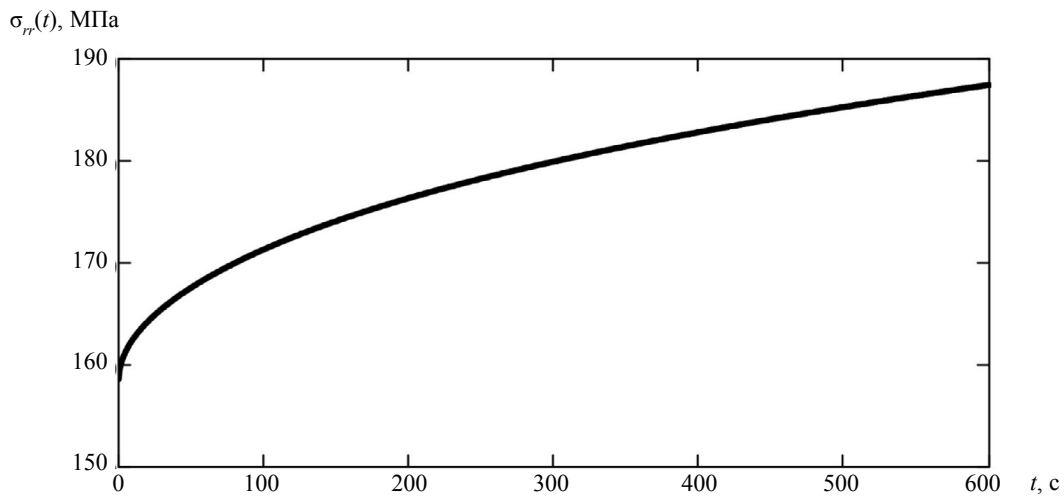


Рис. 3. Изменение расчетных величин радиальных напряжений, возникающих в результате термического сужения, при перераспределении температурного поля по времени.

Расчетные величины КИН при трех разных значениях полудлины трещины ( $a = 0,005$ ;  $a = 0,01$ ;  $a = 0,015$ ) представлены на рис. 4.

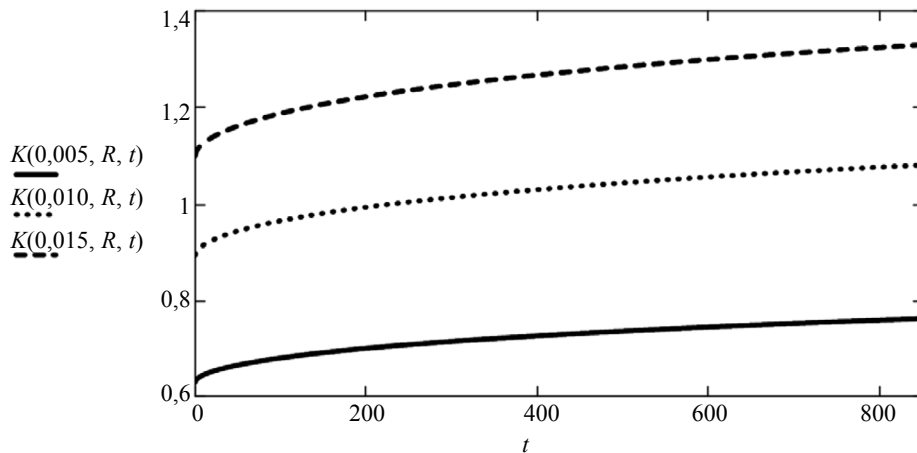


Рис. 4. Расчетные величины КИН при трех разных значениях полудлины трещины ( $a = 0,005$ ;  $a = 0,01$ ;  $a = 0,015$ ) по времени низкотемпературного нагружения.

При известных значениях коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$  в формуле (1) можно приблизительно выразить прогнозируемое количество актов акустических эмиссий, соответствующее достижению трещиной вязкости разрушения материала при некоторой «критической длине» трещины  $l_c$ . В настоящее время имеются сложности в подобном прогнозировании ввиду зависимости коэффициента  $\beta$  в формуле (1) от множества факторов, таких как скорость регистрации АЭ-сигналов, мертвое время и т.д. Однако показатель степени  $\beta$  в большей степени характеризует свойства материала и тип нагружения и показывает чувствительность количества актов АЭ к изменению значения КИН. Следовательно, для фиксированных условий нагружения и известных значениях возникающих нагрузок можно использовать параметр активности источника АЭ, также характеризующий рост количества АЭ-актов при увеличении нагрузки, для оценки степени опасности трещиноподобных дефектов.

В ПБ03-593-03[3] приведены способы классификации источников АЭ с использованием различных параметров, характеризующих опасность дефектов. Одним из таких параметров является активность источника АЭ, выражаемый в следующем виде [3]:

$$F = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{N_{k+1}}{N_k}, \quad (7)$$

где  $N_k$  — число событий в  $k$ -м интервале оценки параметров;  $k = 1, 2, \dots, K$  — номер интервала оценки параметров.

В настоящей работе для оценки степени опасности трещиноподобных дефектов нами предлагается использовать «критическую активность» источника АЭ, соответствующую активности трещиноподобного дефекта с недопустимой длиной  $l_c$  согласно действующим нормативным документам для исследуемого объекта контроля. Для расчета критической активности построена расчетная зависимость числа актов акустической эмиссии от времени при низкотемпературном нагружении, соответствующая источнику АЭ в виде трещины с критической длиной  $l_c$ , что показано на рис. 5.

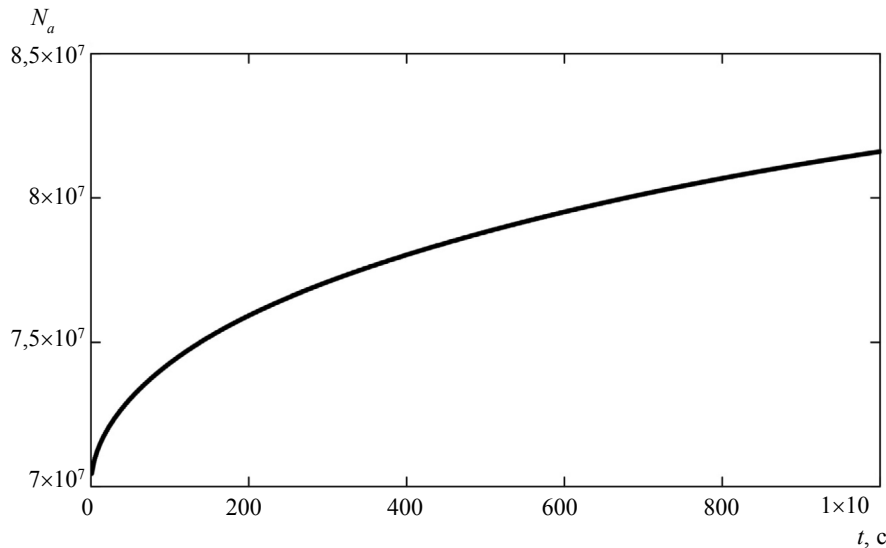


Рис. 5. Расчетная зависимость числа актов АЭ от времени локального низкотемпературного нагружения.

При проведении АЭ-контроля с использованием низкотемпературного нагружения время является важнейшим параметром, так как величина нагружения определяется скоростью распространения теплоты в теле образца. В настоящей работе выбрано оптимальное, с точки зрения удобства проведения контроля и охвата основных информативных сигналов, расчетное время регистрации АЭ-сигналов при реализации способа низкотемпературного нагружения, равное 800 секундам.

Заметим, что в настоящей работе, кроме коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$ , все используемые при моделировании низкотемпературного нагружения параметры являются расчетными, основанными на уравнениях теплопроводности и механики разрушения. Коэффициенты  $\alpha = 1,02 \cdot 10^{-0,2}$ ,  $\beta = 0,995 \cdot 10^8$  определены в результате эксперимента для определенных условий нагружения, таких как материал и толщина образца, выставленные на комплексе АЭ-параметры: время регистрации, мертвое время и т.д.

Далее, по формуле (7) рассчитана «критическая активность» источника АЭ, соответствующая источнику АЭ в виде трещины с критической длиной  $l_c$ . Таким образом, применение кольцеобразного локального низкотемпературного нагружения дает возможность сравнивать активность неопределенного источника АЭ с «критической активностью».

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе предлагается использование способа кольцеобразного локального низкотемпературного нагружения для разработки метода оценки степени опасности одиночных трещиноподобных дефектов, обнаруженных в тонколистовых металлических элементах конструкций с помощью

АЭ-контроля. В качестве критерия метода оценки предложено использовать «критическую активность» источника АЭ. «Критическая активность» вычисляется как активность источника в виде трещины определенной нормативными документами критической длины при его низкотемпературном нагружении с точно такими же, строго определенными условиями. Нагружение выполняется охлаждением локальной зоны кольцеобразного вида вокруг дефекта с помощью закладки диоксида углерода с температурой сублимации  $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При этом в результате термического сужения возникают растягивающие напряжения, нагружающие область дефекта при АЭ-контроле. Кольцеобразный вид зоны охлаждения обуславливает инвариантность нагружения относительно угла расположения плоскости трещины. В результате, такие параметры, как размеры зоны термического влияния и расчетное время нагружения строго фиксируются и используются для расчета «критической активности» источника.

Подобный метод возможно применять для более подробной классификации источников 4-го класса опасности по ПБ03-593-03[3] с использованием, например критической длины  $l_c$ , при котором, по расчетам методами механики разрушения, возникает опасность внезапного раскрытия трещины. Отметим, что вместо вязкости разрушения, или критической длины трещины, можно использовать любой другой критерий механики разрушения.

Широко применяемые методы оценки опасности трещиноподобных дефектов имеют ограничения в виде сложностей точного интерпретирования и моделирования схемы нагружения, соответствия модели фактическим условиям нагружения. Развитие предлагаемого метода оценки опасности объектов, основанное на комплексном применении механики разрушения, инструментальных методов контроля с АЭ-методом, позволит расширить возможности существующих методов оценки степени опасности.

Таким образом, при достаточном изучении степенной зависимости числа актов акустических эмиссий от коэффициента интенсивности нагружения появится возможность оценки КИН и других основных параметров механики разрушения с использованием способа локального низкотемпературного нагружения и акустико-эмиссионного контроля.

## ВЫВОДЫ

Предложено использование способа локального кольцеобразного низкотемпературного нагружения для оценки степени опасности одиночных трещиноподобных дефектов, обнаруженных в тонколистовых металлических элементах конструкций с помощью АЭ-контроля. В качестве критерия оценки степени опасности трещиноподобных дефектов предлагается использовать «критическую активность» источника АЭ, вычисленную с помощью уравнений механики разрушения и теплопроводности. Показана возможность использования критериев механики разрушения для оценки опасности трещиноподобных дефектов методом АЭ-контроля с помощью известной степенной зависимости числа актов акустических эмиссий от коэффициента интенсивности напряжений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Большаков А.М., Андреев Я.М.* Способ низкотемпературного локального нагружения объекта при акустико-эмиссионном методе неразрушающего контроля / Пат. 2614190. Рос. Федерация. Федеральное государственное учреждение науки Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук, ИФТПС СО РАН. № 2016102107; заявл. 22.01.2016; опубл. 23.03.2017; бюл. № 9.
2. *Буйло С.И.* Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики / Монография. Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. 184 с.
3. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. Регистрация Минюста России № 4778 19.06.200. Госгортехнадзор России, 09.06.2003.
4. *Ревина С.В., Сазонов Л.И., Цывенкова О.А.* Уравнения математической физики. Задачи и решения. Ростов-на-Дону: Южный федеральный ун-т, 2014. С. 175.
5. *Ито Ю., Мураками Ю., Хасебэ Н., Ююки Р., Тоя М., Того К., Мията Х., Терада Х., Миядзаки Н., Аоки С.* Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / Пер. с англ. Под ред. Ю. Мураками. М.: Мир, 1990. 448с.