

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА ЖУКОВА В.А.
на диссертацию ЗЕЛЕНСКОГО Николая Алексеевича на тему
«Обоснование метода неразрушающего контроля прочности
элементов конструкций глубоководных сооружений на основе
использования явления акустической эмиссии»,
представленную на соискание учёной степени
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК
по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной
среды, веществ, материалов и изделий

Диссертационная работа ЗЕЛЕНСКОГО Николая Алексеевича «Обоснование метода неразрушающего контроля прочности элементов конструкций глубоководных сооружений на основе использования явления акустической эмиссии» представляет собой научное исследование, целью которого является совершенствование метода АЭ–контроля прочности и оценки ресурса корпусных элементов глубоководных сооружений в результате реализации технологически упрощённого экспресс-нагружения и анализа результативности АЭ–показателей.

По своей направленности и основным научным положениям она является продолжением работ, выполненных рядом исследователей на основе микромеханической модели (ММАЭ) с использованием концентрационно-кинетических АЭ–показателей прочностного состояния материала.

Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью совершенствования методов и способов неразрушающего контроля конструкций глубоководных сооружений и аппаратов как с целью повышения их надёжности и обеспечения безопасности в процессе эксплуатации, так и снижения трудоёмкости испытаний. Актуальность данной работы подтверждается также выдачей РОСПАТЕНТ патента на изобретения «Способ оценки прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата»; дата подачи заявки на изобретение и начала действия патента – 04.04.2016 г.

По теме диссертации опубликовано 6 научных работ в научных изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ, а также одна работа в издании, цитируемом в БД *Scopus*.

Обоснование предлагаемого метода неразрушающего контроля выполнено автором на основе анализа результатов научных публикаций по следующим позициям.

1. Предполагается, что существует статистически значимая взаимосвязь между некоторыми АЭ-показателями и степенью опасности дефектов конструкции, а процесс разрушения при номинальных напряжениях ниже предела текучести материала может быть представлен двумя стадиями:

- стадией мелкодисперсного разрушения; в пределах этой стадии имеет место увеличение концентрации структурных повреждений до критической степени;

- стадией локализованного роста трещины, для описания которого применимы методы механики разрушения.

Первая стадия состоит из двух этапов: кинетически неоднородного и кинетически однородного структурного повреждения материала. Предполагается в качестве основы оценки опасности дефекта конструкции использовать взаимосвязь АЭ ξ -показателей второго этапа (рис. 2.9 и 2.10) и концентрации субмикротрещин C в виде:

$$\xi(t) = k_{AE}C(t),$$

где k_{AE} – акусто-эмиссионный коэффициент.

Автором предлагается в качестве критерия отбора диагностических АЭ ξ -показателей принять коэффициент корреляции значений ξ или показателей прочностной надёжности, рассчитываемых по значениям $f(\xi)$, со значениями экспериментально определяемых показателей прочности.

2. С целью снижения неопределённости оценивания взаимосвязи между некоторыми АЭ-показателями и степенью опасности дефектов конструкции, а также параметров экстраполяционных зависимостей долгосрочного прогнозирования предлагается использовать моделирование на основе закономерностей с физически обоснованными константами моделируемого процесса:

- микромеханической модели АЭ (ММАЭ) структурного повреждения в пределах стадии мелкодисперсного разрушения;

- термофлуктуационной модели Журкова С.Н., определяющей среднее время θ до разрушения структурных элементов в зависимости от растягивающего напряжения σ и абсолютной температуры T :

$$\theta(t) = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma(t))/(kT)],$$

где $\tau_0 = 10^{-12} \div 10^{-14}$ с – период колебаний атомов; U_0 – энергия сублимации материала; γ – структурно-чувствительный параметр, или активационный объём согласно термофлуктуационной модели; k – постоянная Больцмана.

Согласно ММАЭ структурное повреждение на стадии мелкодисперсного разрушения исследуют при номинальных напряжениях ниже предела текучести конструкционных сталей. Среднее значение γ испытуемого материала в пределах этой стадии считается практически постоянным.

Статистический подход к оценке параметров экстраполяционных зависимостей рассматривается как вспомогательный в связи с тем, что вследствие неоднородности температурного поля, структурного и напряжённого состояния материала среднестатистические значения времени разрушения структурных элементов тела в общем случае не одинаковы. Формально это обстоятельство отражено функцией $\Psi(\omega)$ плотности распределения параметра $\omega = \gamma\sigma/(kT)$ по структурным элементам контролируемого объёма материала. Имитационное моделирование показало, что вид функции распределения $\Psi(\omega)$ в малой степени влияет на оценку вероятности разрушения сварных образцов при постоянном напряжении σ .

3. В качестве диагностических параметров, включённых в алгоритмы оценки прочности и ресурса, предполагается принять концентрационно-кинетические АЭ–показатели прочностного состояния (таблица 2.2), соответствующих этапу кинетически однородного структурного повреждения материала:

$$X_{AE} = d\ln\xi/dt, Y_{AE} = d\ln\xi/d\sigma, kY_{AE} = d\ln\xi/dF, W_{AE} = d\ln\xi/dK_n,$$

где F – нагрузка, K_n – коэффициент нагрузки (отношение диагностической нагрузки к рабочей).

Использование указанных концентрационно-кинетических АЭ–показателей при нагружении сварных соединений растягивающими силами по данным других исследователей обеспечивает получение значений коэффициентов корреляции не ниже 0,9 (таблицы 3.1 – 3.3).

4. При экспериментальной оценке опасности дефектов в зонах конструктивных и технологических концентраторов испытуемой конструкции по концентрационно-кинетическим АЭ–показателям необходимо обеспечить наличие этапа кинетически однородного структурного повреждения при АЭ–контроле. В диссертационной работе нагружение сварных элементов глубоководных аппаратов внешним давлением предлагается заменить нагружением сжимающими силами, приложенными «по окружностям определённого диаметра или линиям определённой длины в направлении минимальной оси кольцевого сечения с двух взаимно противоположных сторон для напряжений ниже предела текучести». Экспериментально было

обнаружено, что в условиях сжатия бездефектных стеклопластиковых колец имеет место немонотонное нарастание активности сигналов АЭ с последующим резким снижением её при непрерывном увеличении нагрузки. Автор диссертационной работы ставится задача подбором размеров образцов и мест приложения сжимающих сил обеспечить наличие этапа монотонного возрастания активности сигналов АЭ и устойчивость кольцевых образцов при экспресс-нагрузении.

В целом указанные выше положения, принятые автором на основе анализа результатов научных публикаций, можно считать достаточным обоснованием подхода к разработке метода неразрушающего контроля элементов глубоководных сооружений и его экспериментальной проверки.

Экспериментальное исследование с целью обоснования метода неразрушающего контроля выполнено на кольцевых сварных образцах. В материал сварного шов были внесены конструктивные концентраторы в форме отверстий малого диаметра. По данным АЭ-контроля определялись концентрационно-кинетические АЭ-показатели прочностного состояния

$$X_{AE} = d\ln N_{\Sigma}/dt, Y_{AE} = d\ln N_{\Sigma}/d\sigma \text{ и } W_{AE} = d\ln N_{\Sigma}/dK_n,$$

где $N_{\Sigma}(t)$ – суммарное число импульсов за время испытания t в пределах первой стадии повреждения при постоянной скорости экспресс-нагружения.

Напряжённно-деформированное состояние материала кольцевых образцов определялось с применением программы Autodesk Inventor Professional.

Получило подтверждение предположение автора об относительно более высокой результативности концентрационно-кинетические АЭ-показателей для оценки прочностного состояния элементов глубоководных конструкций, подвергающихся экспресс-нагружению при АЭ-контроле внешними сосредоточенными силами сжатия «по окружностям определённого диаметра или линиям определённой длины в направлении минимальной оси кольцевого сечения».

При изменении показателя W_{AE} в пределах от 0,69 для сварного образца без конструктивного концентратора до 4,39 для образцов с концентраторами получены коэффициенты корреляции значений концентрационно-кинетические АЭ-показателей и расчётных значений максимальных напряжений порядка 0,93 – 0,94. При этом коэффициент корреляции локального динамического показателя m с расчётными значениями σ_{max} равен $r = 0,86$; соответственно, для числа импульсов $N_{\Sigma}(t)$ в пределах первой стадии

повреждения и σ_{max} коэффициент корреляции $r = -0,58$; для суммарной энергии MARSE – $r = -0,38$; для суммарной амплитуды – $r = -0,561$.

При оценке прочностной надёжности испытуемого элемента конструкции по данным АЭ–контроля в диссертационной работе принимается условие $W_{AE} \leq [W_{AE}]$, где $[W_{AE}]$ – критическое (допускаемое) значение W_{AE} на этапе кинетически однородного разрушения. Для конструкционных низколегированных сталей при отсутствии результатов усталостных испытаний элементов конструкции рекомендуется $[W_{AE}] = 1$.

Обоснование предлагаемого способа прогнозирования ресурса при усталостном повреждении элементов глубоководных сооружений и аппаратов базируется в диссертационной работе на следующих предположениях.

1. На основе сравнения экспериментальных значений показателя $Y_R = d\ln N_c / d\sigma$ зависимости числа циклов до разрушения N_c от переменного напряжения σ при усталостных испытаниях в области ограниченной выносливости с экспериментальными значениями концентрационно-кинетического АЭ–показателя $Y_{AE} = d\ln \xi / d\sigma$, полученными другими исследователями при постоянной скорости нагружения, автор диссертационной работы принимает, что $Y_R = Y_{AE}$ (стр. 81÷83). Соответственно, значение Y_{RD} данного элемента конструкции считается равным значению Y_{AED} , полученному по результатам АЭ–контроля этого же элемента (стр. 82).

2. В ММАЭ значение Y_{AE} при испытании образцов без концентраторов считается соответствующим значению $\gamma/(kT)$ формулы Журкова С.Н. (стр. 67). Используя это положение, зависимость числа циклов $N_c(\sigma)$ в области ограниченной выносливости автор диссертационной работы принимает линейной в полулогарифмических координатах и предлагает считать, что в полулогарифмических координатах линейные зависимости $N_c(\sigma)$ для образцов одного и того же материала с различными концентраторами и без концентраторов имеют при $\sigma \rightarrow 0$ общую точку $\ln N_B$.

На основе указанных положений в диссертационной работе представлен алгоритм оценки ресурса элемента конструкции по данным АС–контроля. Определив значения N_B по результатам экстраполяции усталостных испытаний образцов без концентраторов и значение Y_{AED} по результатам АС–контроле элемента конструкции, можно получить оценку ресурса этого элемента, приняв, что значение Y_{RD} равно значению Y_{AED} (стр. 82).

По мнению оппонента, предлагаемая схема аппроксимации и оценки ресурса элементов глубоководных сооружений и аппаратов при переменных напряжениях теоретически приемлема при условии $Y_R/Y_{AE} = Y_{RD}/Y_{AED}$.

Рассмотрим данный способ прогнозирования с целью определения условий экспериментальной оценки его адекватности.

1. В формуле Журкова С.Н., принятой автором диссертационной работы в качестве основы для построения схемы прогнозирования, коэффициент γ характеризует степень перенапряжения атомных связей в зоне повреждения по сравнению с номинальным растягивающим напряжением σ образца без концентратора напряжений. Соответственно, при любом числе циклов N_c в пределах интервала аппроксимации должно иметь место равенство $\gamma\sigma$ материала образца и $\gamma_D\sigma_D$ материала детали в зоне концентратора до момента завершения первой стадии повреждения (до образования макротрещины). При равенстве $\gamma\sigma = \gamma_D\sigma_D$ коэффициент концентрации напряжений $K_\sigma = \sigma/\sigma_D = \gamma_D/\gamma$.

Экспериментально установлено, что действительный коэффициент концентрации, определяемый по отношению переменных напряжений, вызывающих разрушение образцов без концентратора и образцов с концентратором за равное число циклов N_c в области ограниченной долговечности, уменьшается при увеличении переменного напряжения. Однако в случае предложенной автором линейной экстраполяции в координатах « $\ln N - \sigma$ » с общей для образца и детали точкой $\ln N_B$ (рис. 3.6 и 4.12) значение $K_\sigma = \sigma/\sigma_D$ должно оставаться постоянным. Это возможно, если значение K_σ соответствует теоретическому коэффициенту концентрации напряжений α_σ для идеально упругого материала.

Следовательно, проверка принятой схемы экстраполяции должна выполняться в области переменных напряжений, существенно меньше технического предела текучести материала и при степени повреждения материала до окончания первой стадии.

2. Оценку ресурса элемента конструкции по данным долгосрочного прогнозирования можно считать приемлемой при условии, что продолжительность стадии роста трещины мала по сравнению с предполагаемым ресурсом. Для низколегированных конструкционных сталей при усталостном испытании образцов без надреза она оставляет 10 ÷ 20% от общего в пределах 1 ÷ 3 млн. числа циклов до полного разрушения. Наличие острого концентратора и уменьшение числа циклов N_c до разрушения образца резко увеличивает продолжительность стадии роста трещины.

При экспериментальном обосновании способа оценки ресурса элемента конструкции в диссертационной работе использованы результаты испытаний как в области ограниченной выносливости, так и в области малоциклового усталости (до 50 тыс. циклов) низколегированных сталей, что не

соответствует указанным выше ограничениям. По мнению оппонента, результативность предложенной схемы оценки ресурса по данным АЭ-контроля не получила должного экспериментального подтверждения.

Научная новизна исследования обоснованно заявлена диссертантом по следующим позициям, а именно:

- сформулирован принцип совершенствования контроля состояния элементов конструкций глубоководных сооружений;
- разработан способ экспресс-нагружения сварных элементов глубинных аппаратов сжимающими силами;
- получены экспериментальные данные по АЭ кольцевых образцов стыковых сварных соединений при сжатии их сосредоточенными силами, обеспечивающем возможность выделения этапа однородного разрушения при АЭ-контроле;
- при данном способе экспресс-нагружения подтверждена более высокая результативность концентрационно-кинетических АЭ-показателей, определяемых на основе ММАЭ.

На теоретическом уровне научная новизна присуща предложенному автором данной работы способу оценки ресурса при переменных напряжениях и глубины однократного погружения глубоководного аппарата по значению концентрационно-кинетических АЭ-показателей.

Практическая значимость полученных автором результатов

- заключается в обосновании целесообразности использования концентрационно-кинетические АЭ-показателей для оценки прочностного состояния элементов конструкций, работающих в условиях внешнего давления; в разработке способа экспресс-нагружения при АС-контроле этих конструкций; в создании способа оценки по данным АЭ-контроля степени концентрации напряжений, обусловленной наличием технологических и эксплуатационных дефектов конструкции;
- подтверждается выдачей патента на предложенный «Способ оценки прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата» и Справкой об использовании результатов работы в Санкт-Петербургском горном университете.

Замечания оппонента по содержанию диссертационной работы:

- при оценке напряжённого состояния материала сварных образцов в зоне концентраторов при сжатии сосредоточенными силами приведены значения напряжений по-Мизесу, но не представлены значения максимальных напряжений растяжения-сжатия; в ММАЭ и в термофлуктуационной теории

именно напряжения растяжения считаются фактором разрушения, обусловленным нагружением материала;

– представленные в диссертационной работе экспериментальные данные недостаточны для обоснования предложенного автором способа оценки долговечности конструкции при переменных напряжениях по данным АЭ-контроля;

– краткость изложения некоторых частей текста и представления результатов, полученных другими исследователями, затрудняет анализ сведений, содержащихся в диссертационной работе.

Автореферат и публикации отражают существо диссертационной работы.

Диссертация ЗЕЛЕНСКОГО Н.А. является законченной научно-квалификационной работой в части совершенствование метода АЭ-контроля корпусных элементов глубоководных сооружений в результате реализации технологически упрощённого экспресс-нагружения и анализа результативности АЭ-показателей, в которой изложены научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значения для развития страны.

На основе вышеизложенного считаю, что диссертационная работа ЗЕЛЕНСКОГО Николая Алексеевича соответствует требованиям ВАК Российской Федерации, предъявляемым к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата технических наук 05.11.13 – приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент

доктор технических наук, профессор
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения

высшего образования «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»
195251, Санкт-Петербург,
Политехническая ул., 29

Телефон: 8 (812) 775-05-30

Адрес электронной почты: office@spbstu.ru

Владимир Андреевич Жуков

профессор кафедры «Машиноведения и основ конструирования»



Жуков В.А.

Подпись Жуков В.А.
УДОСТОВЕРЯЮ
Ведущий специалист
по кадрам. Климова М.А.
20.12.17