

С.В. ПЕТИНОВ^{1, 2}, Р.В. ГУЧИНСКИЙ²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

² Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

S-N-КРИТЕРИИ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РАСЧЕТОВ РЕСУРСА КОНСТРУКЦИЙ: ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ

В современных правилах оценки усталостной долговечности конструкций, подвергающихся интенсивным переменным нагрузкам, рекомендуется использовать S-N-кривые (кривые усталости) как критерий разрушения в вариантах методик Nominal stress approach, Hot-spot stress и Notch-stress approach. Методики и соответствующие S-N-кривые позволяют рассчитывать сопротивление усталости конструкций, однако расчеты сопровождаются рядом допущений и неопределенностей. Физически и механически более строгие оценки долговечности можно получить с помощью деформационного или энергетического методов расчета, основанных на соответствующих критериях разрушения, однако это также сопряжено с рядом приближений. Кратко комментируется происхождение приближений и неопределенностей, и показаны возможные направления развития методов для применения в расчетах ресурса конструкций.

Ключевые слова: усталостная долговечность, критерии усталости, методики расчета усталости, накопление повреждений, неопределенности в расчетах ресурса.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Петин С.В., Гучинский Р.В. S-N-критерии усталости материалов для расчетов ресурса конструкций: проблемы применения. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; Специальный выпуск 2: 96–103.

УДК 629.5.01:620.178.3

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-96-103

S.V. PETINOV^{1, 2}, R.V. GUCHINSKY²

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya str., 29, St. Petersburg, Russia

² Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences, Bolshoy pr. of Vasilyevsky Ostrov, 61, St. Petersburg, Russia

STRESS-LIFE CRITERIA FOR FATIGUE ASSESSMENT OF STRUCTURES: PROBLEMS OF IMPLEMENTATION

Presently in rules for fatigue assessment of steel, and in particular, welded structures in different technologies subjected to intensive alternating service loading the Stress-Life (S-N) criteria are recommended in several versions of approaches. These are the Nominal stress approach based on typifying welded joints and representing fatigue resistance of the joints by classed S-N curves; the Hot-spot stress approach focused on evaluation of «structural» stress and the Notch-stress approach based on the FEA-based assessment of the local stress caused by the geometry of structural detail and the weld shape. The criteria and approaches provide assessment of fatigue properties of structures, however, accompanied with a series of approximations and uncertainties. A more consistent in sense of physics and mechanics of the damage evaluation of fatigue life may be provided by the strain-life or inelastic strain energy based approaches, again, coupled with uncertainties. The nature of drawbacks of the S-N criteria and approaches is commented and feasible means of improvement the fatigue criteria evaluation and applications in fatigue assessment procedures are proposed.

Key words: fatigue life, criteria for fatigue, fatigue assessment methods, fatigue damage accumulation, uncertainties in fatigue analyses.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Petinov S.V., Guchinsky R.V. Stress-life criteria for fatigue assessment of structures: problems of implementation. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; Special issue 2: 96–103 (in Russian).

UDC 629.5.01:620.178.3

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-96-103

Введение

В правилах для расчета усталостной долговечности конструкций, подвергающихся интенсивному переменному нагружению, S-N-критерии усталости (размах напряжения – число циклов) приняты в версиях, различающихся в основном приемами учета концентрации напряжений в узлах. Это – расчет ресурса по номинальным напряжениям (Nominal stress approach), основанный на типизации сварных соединений и применении S-N-кривых для типовых сварных соединений, метод Hot-spot stress (напряжений «в горячей точке»), в котором с помощью метода конечных элементов (МКЭ) рассчитываются напряжения, обусловленные формой деталей («structural stress»). Рекомендован также метод Notch-stress approach, где рассчитываются по МКЭ локальные напряжения с учетом формы деталей и сварного соединения ([1, 2] и др.). Общее для этих версий – применение правила линейного суммирования повреждений для расчета ресурса конструкций в условиях случайного эксплуатационного нагружения. Однако практическое применение правил выявило некоторые проблемы и неопределенности оценок.

В первую очередь, экспериментально определенные базы данных, S-N-кривые, использующиеся для расчетов усталости конструкций, получены при испытаниях «классифицированных» образцов (с типовыми сварными соединениями, как в случае методики «Номинальных напряжений» [2]). Испытания проводились (и проводятся) при циклическом нагружении вплоть до почти полного разрушения образцов («separation in two parts»), так что результаты включают зарождение и рост трещины. Применение таких данных для расчета конструкций сопровождается неопределенностями оценок, в частности, соответствующего состояния повреждения конструкций, размера трещины к моменту исчерпания расчетной долговечности.

Затем, рекомендации испытывать образцы с типовыми сварными соединениями, которые должны характеризовать влияние материалов соединения (наплавленный металл, металл зоны сплавления и т.д.), остаточных напряжений для формирования базы данных, не обеспечивают идентичность повреждения образцов и деталей конструкции. В основном это связано с разнообразием геометрии деталей конструкций, содержащих типовые соединения, и понимание этой проблемы сложилось десятилетия назад.

Развитие конечноэлементного моделирования позволило рассчитывать местные напряжения в об-

ластях концентрации напряжений в конструкциях, где зарождается разрушение. Эти возможности [3] и опыт измерений деформаций у сварных соединений [4] использовались для разработки метода Hot-spot stress (HSS) ([1, 2] и др.). Приближенность оценки местных напряжений у сварных соединений по этому методу, необходимость учитывать в расчете форму наплавленного металла соединения, привели, в частности, к созданию методики расчета «локальных напряжений» (Notch-stress approach) ([5] и др.). Оценки местных напряжений позволили сократить диапазон S-N-кривых до характеристики свойств «основного» и наплавленного металлов.

Однако, кроме уточнения влияния геометрии соединения деталей конструкции при формировании усталостного повреждения, отмеченные проблемы не нашли решения.

Названные критерии, методические приемы оценок повреждения и проблемы их практического применения рассмотрены ниже более подробно; также предложены некоторые способы совершенствования расчетов усталости конструкций.

Методология расчетов усталости, основанная на S-N-критериях

Современные подходы к расчетам усталости конструкций, например, [2], основаны на предположении об упругой деформации материала при эксплуатационном нагружении. Соответственно, в диапазоне долговечностей (левая граница отвечает этому предположению) S-N-кривые аппроксимируются уравнением Баскена (1910):

$$N(S) = C/S^m, \quad (1)$$

где S – размах напряжения (удвоенная амплитуда); C и m – «константы материала». Амплитуда номинального напряжения не превышает предела текучести (пропорциональности) материала.

Повреждение, вносимое напряжениями ниже предела усталости (определяемого при циклическом нагружении образцов) в последовательностях случайного эксплуатационного нагружения, учитывается коррекцией параметра m кривой (I) при $N \geq 10^7$ (левее – обычно $m = 3$, при $N \geq 10^7$) (рис. 1) [2]. Возможно и другое определение точки «излома» S-N-кривых и указание сниженного предела усталости («cut-off»), примерно до 0,5 обычного («циклического») предела [1].

Механика усталостного повреждения материалов сварного соединения полагается «встроенной»

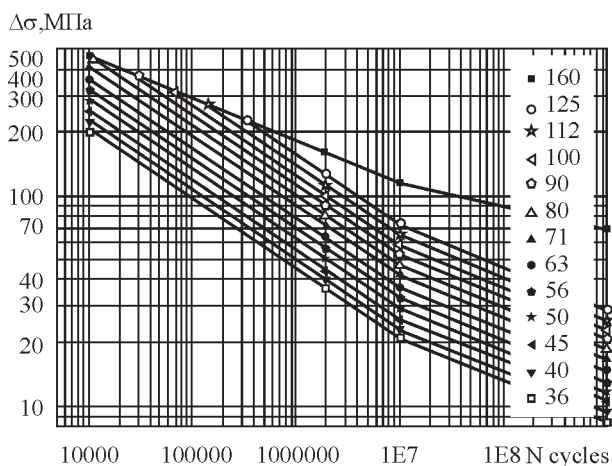


Рис. 1. Расчетные S-N-кривые для сварных соединений стальных компонентов [6]

в расчетные S-N-кривые на основании анализа результатов испытаний образцов с типовыми (классифицированными) сварными соединениями (рис. 2). Механические свойства основного и наплавленного материалов не различаются, и расчетные S-N-кривые единообразно определяют сопротивление усталости соединений сталей умеренной и повышенной прочности (рис. 1) при использовании метода «номинальных напряжений». В то же время известно, что сопротивление усталости сталей примерно пропорционально пределу прочности [6], но и свойства сварных соединений зависят от свойств металла электродов.

Схема определения номинальных напряжений, например, для соединения кницы и балки набора в конструкции судового корпуса (рис. 2) показана на рис. 3.

Особенность усталостных испытаний образцов – автоматическая остановка машины, когда возникшая и растущая трещина заметно влияет на жесткость образца перед разрушением. Поэтому результат испытания, число циклов до его завершения, включает часть долговечности до формирования макротрещины и часть развития трещины почти до разрушения образца.

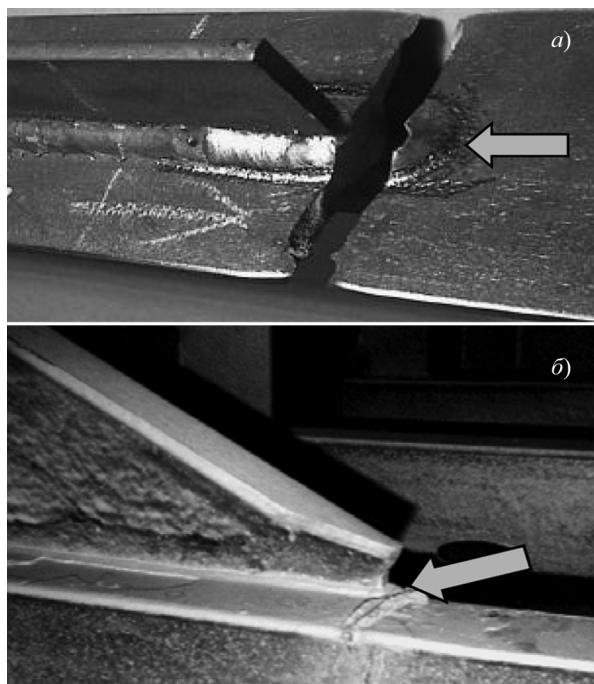
На эту особенность развития усталостного повреждения давно обратили внимание В.С. Иванова [7] и С. Коцаньда [8], описавшие кинетику процесса. Соответственно, применение расчетных S-N-кривых для оценки усталости деталей конструкции не определяет состояние повреждения, размер трещины, который оказывается неопределенным, что при-

знали эксперты (например, [5, 9]). На рис. 2 показан образец с типовым сварным соединением («one-side attachment») и деталь конструкции (днищевая конструкция судна), отнесенные к одному классу соединения. Можно видеть сходство, но не идентичность геометрии, передачи внутренних усилий в сварном соединении этих объектов, существенных для процесса разрушения.

Предлагались приемы приближенного решения проблемы идентичности повреждения сварных соединений в образцах и конструкциях [10, 11], однако для практических расчетов использованы другие разработки.

Еще одна важная особенность испытаний образцов с типовыми сварными соединениями – циклическое нагружение при положительной асимметрии нагрузки (отношении минимального к максимальному усилию в цикле нагружения), чтобы исключить потерю устойчивости образца при сжатии. Это значит, что расчетные S-N-кривые отвечают этому типу нагружения. Делались попытки учесть в расчетах усталости конструкций роль других условий нагружения

Рис. 2. Результаты испытаний образцов с типовыми (классифицированными) сварными соединениями: а) разрушенный образец, FAT63 Class (рис. 1); б) трещина в узле судового корпуса, отнесенном к классу FAT63 (B. Purtle, Lloyd's Register of Shipping, UK)



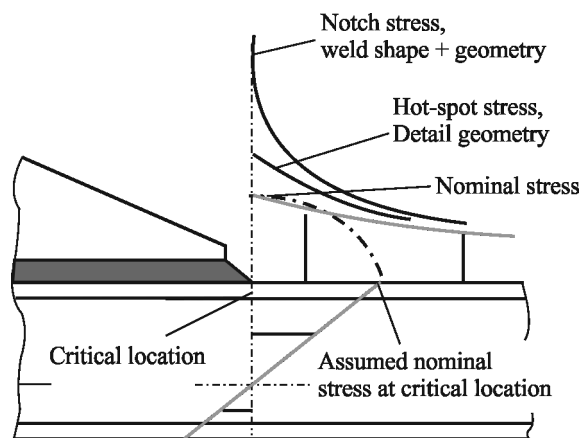


Рис. 3. Определение напряжений для расчетов усталости

(асимметрии) [9]. Между тем на стадии зарождения трещины роль асимметрии нагружения вторична; процесс повреждения, определяемый сдвигами в микроструктуре, зависит от размаха напряжений ([6, 7] и др.). От момента образования трещины ее подрастание в наибольшей мере определяется растягивающей частью цикла нагружения. Поскольку значительная часть долговечности образцов относится к подрастанию трещины, условия нагружения при испытаниях вносят дополнительную неопределенность в расчеты усталости деталей конструкций, а поправки для учета асимметрии не могут быть эффективными.

Отмеченные недостатки метода номинальных напряжений (и типизации сварных соединений), развитие возможностей расчета напряжений МКЭ, привели к разработке и применению в расчетах усталости приемов Hot-spot stress (HSS) ([1, 2] и др.), а позднее – метода локальных напряжений (Notch-stress approach, NSA) ([5] и др.). Для расчетов усталости с помощью этих приемов применяются соответствующие кривые усталости, набор которых сведен к кривой для основного металла и материала сварного соединения (образцы со стыковым соединением) и дополнен кривыми для эксплуатации в условиях коррозионной среды [9]. Приемы Hot-spot stress и Notch-stress по идее предложений должны обеспечить уточнение расчетов усталости благодаря учету геометрии деталей конструкции, особенностей передачи внутренних усилий.

Особое внимание должно уделяться влиянию коррозионной среды на сопротивление устало-

сти деталей конструкции. Экспозиции образцов и конструкций в коррозионной среде существенно различаются: конструкции находятся под воздействием среды десятилетия, а лабораторные образцы – при испытании в аналогичных условиях и по условию необходимой долговечности (по числу циклов) – несколько суток, в зависимости от частоты нагружения.

Испытания [13] сварных образцов сталей для морской техники на воздухе и во влажной среде при весьма низких частотах (1 и 0,12 Гц) показали сокращение долговечности примерно в два раза. Но такие опыты едва ли могут быть систематическими, т.к. длительность испытаний отдельных образцов достигала 6–8 месяцев. Возможной альтернативой могли бы стать испытания при гальваностатическом ускорении коррозионного повреждения: применение этого приема при условии идентичности коррозионного износа в искусственной морской воде показало сокращение долговечности в 5–6 раз (например, [14]).

В методе HSS местные напряжения в «критической» области, в основном у сварного соединения (рис. 3), должны определяться экстраполяцией напряжений, рассчитанных для центральных точек конечных элементов модели узла, к сварному соединению (weld toe). Предполагается, что таким образом определяется напряжение, зависящее только от геометрии детали, а эффект формы наплавленного металла представлен в соответствующей S-N-кривой (кривая D-класса, стыковое сварное соединение).

Принципы конечноэлементного моделирования сварных деталей согласно Notch-stress позволяют определять напряжения с учетом геометрии детали и сварного соединения (рис. 3), правда, в предположении плавного перехода от основного металла к наплавленному [2].

На рис. 4 показаны примеры формирования сетки конечных элементов для модели криволинейного соединения стойки переборки и балки набора палубы в конструкции корпуса судна, предназначенной для расчета названными методами. Сетка на рис. 4а подготовлена для расчета по методу Hot-spot stress; она отвечает принципу « $t \times t$ », где t – толщина пояса балки набора и размер конечных элементов у окончания кницы [9]. Другая сетка (рис. 4б) отвечает принципам конечноэлементного моделирования приемом Notch-stress: размеры элементов у наплавленного металла (weld toe) порядка 0,2 предполагаемого радиуса перехода от основного металла к наплавленному [5].

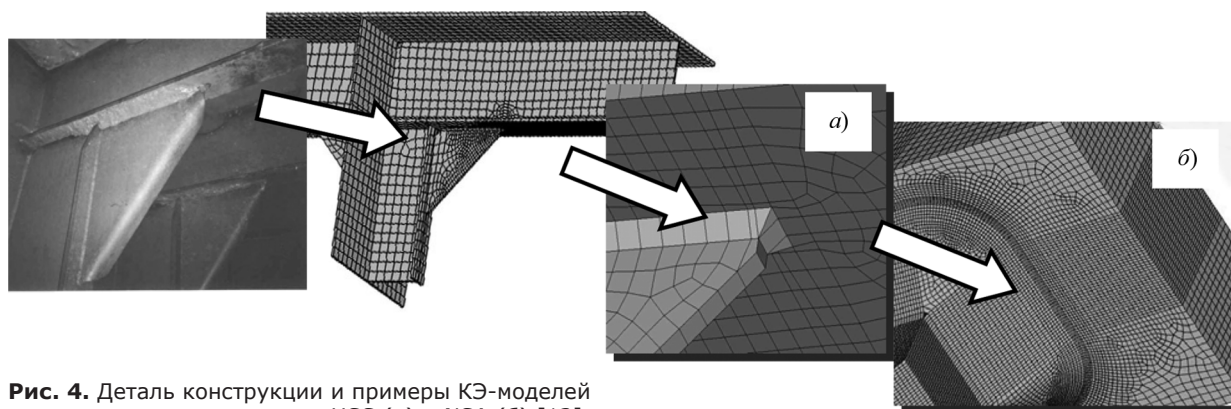


Рис. 4. Деталь конструкции и примеры КЭ-моделей для использования приемов HSS (а) и NSA (б) [12]

Важно подчеркнуть, что расчет местных напряжений по этим методам основан на допущении линейно-упругой деформации материала, в частности «критических» областей. Использование рассчитанных по рекомендованным приемам напряжений и S-N-кривых создает иллюзию достоверной оценки усталостного повреждения, оценки с неопределенностью консервативного порядка. В диапазоне высоких напряжений в эксплуатационном нагружении переоценка повреждения в общей сумме играет незначительную роль благодаря случайному характеру нагружения и сравнительно редким перегрузкам.

В то же время при умеренном эксплуатационном нагружении в многоциклового области, которое в основном определяет накопление повреждений, применение названных выше методов может привести к существенной переоценке повреждений, поскольку игнорируются эффекты микропластической деформации.

Сравнительный анализ показателей ресурса детали палубной конструкции корпуса (рис. 4) при неограниченном районе плавания выявил существенное различие оценок накопленного повреждения за 20 лет эксплуатации. Так, согласно методу Hot-spot stress, индекс повреждения равен $D = 1,24$, а по Notch-stress $D = 0,54$, в то время как расчет по деформационному методу, в котором приближенно учитываются упругопластические свойства материала, показал, что $D = 0,35$ [12].

Это сопоставительное исследование, скорее, иллюстрирует проблему; по-видимому, необходим развернутый анализ. Вместе с тем нужна корректировка наиболее слабых положений современных приемов расчета ресурса конструкций, основанных на применении S-N-критериев.

Что касается техники Hot-spot stress, то совершенствование оценки местных напряжений вряд ли возможно; в рамках правил разработки КЭ-моделей узлов конструкций не может быть и речи об учете циклических упругопластических свойств материала или оценке размера трещины, эффект остаточных сварочных напряжений может оцениваться весьма приближенно.

Предложим возможные меры по развитию метода Notch-stress и корректировке критериев разрушения, S-N кривых:

- с целью установления S-N-критериев усталостные испытания образцов следовало бы проводить до возникновения макротрещин. Для этого потребуются применять известные методы и средства распознавания трещин и соответственно изменить порядок испытаний;
- усталостные испытания образцов предпочтительно проводить при симметричном циклическом нагружении, что позволило бы в расчетах учитывать влияние среднего напряжения на развитие повреждения;
- неупругое циклическое деформирование материала в «критических» областях конструкции можно приближенно учесть корректировкой местных напряжений, например, по Петерсону [15], предложившему определение эффективного коэффициента концентрации (notch factor):

$$K_f = 1 + (K_t - 1)/(1 + g/r), \quad (2)$$

где K_t – теоретический коэффициент концентрации напряжений (местные напряжения по методу Notch-stress рассчитываются в предположении упругой деформации материала); r – радиус

скругления «критической» области; g – «структурный параметр» материала; согласно [16] этот параметр для конструкционных сталей с пределом текучести в диапазоне 235–390 МПа можно оценить величиной $g = 0,38(350/\sigma_u)^{1,16}$, где σ_u – предел прочности материала;

- можно принять во внимание возможность релаксации остаточных сварочных напряжений в фазе зарождения макротрещины благодаря циклической упругопластической деформации материала в «критической» области узла конструкции.

Метод Notch-stress, в принципе направленный на расчет начала разрушения в области концентрации напряжений, может быть дополнен техникой расчета подрастания трещины усталости с помощью оценки накопления повреждений, как показано в [18–20] и др. Элементы такой техники были предложены в работе [17] и др.

Для расчета требуется подготовка КЭ-моделей узлов конструкции с сеткой элементов необходимой подробности в области ожидаемых начала разрушения и траектории подрастания трещины, как показано, например, на рис. 5 [18]. Конечные («материальные») элементы должны быть достаточно малыми, чтобы обеспечивалось необходимое разрешение поля напряжений, но при этом – и возможность применения формата континуальной механики.

На рис. 6 показана КЭ-модель участка трубопровода, использованная для расчета начала усталостного разрушения и роста трещины усталости

Рис. 5. Эволюция контура фронта трещины, рассчитанная моделированием накопления повреждений [18]

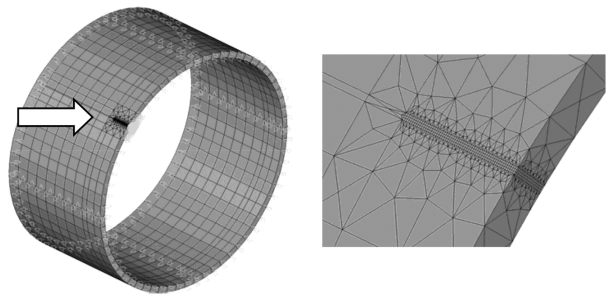
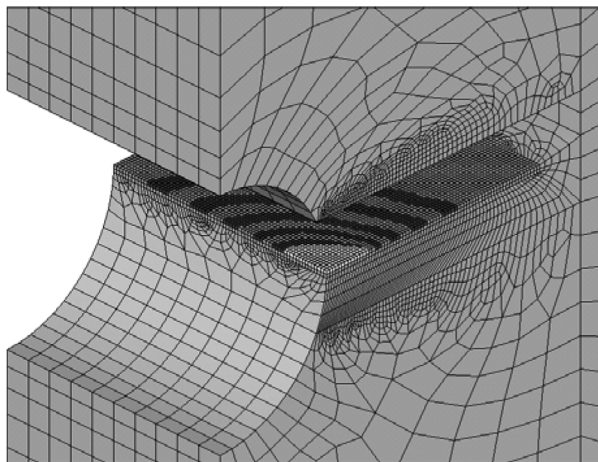


Рис. 6. КЭ-модель участка трубопровода для расчета начала и развития разрушения оболочки [19]

к внешней поверхности [19]. Для расчета начала разрушения предполагалось, что на внутренней поверхности оболочки имеется цепочка дефектов структуры; соответственно, элементам внутренней поверхности придано сниженное значение циклического предела пропорциональности (в расчете использована деформационная модель усталости).

С началом циклического нагружения расчетной модели в элементах, в которых предполагается развитие повреждения, оценивается накопление повреждения по правилу Пальмгрена – Майнера. На начальном шаге расчета рассчитывается поле деформаций (напряжений) для элементов в области зарождения и распространения трещины. Затем с помощью критерия (деформационного или S-N) рассчитывается ресурс элементов N_i и накопленное на начальном шаге повреждение:

$$d_{\text{initial},i} = n_1 / N_i \quad (3)$$

После этого рассчитывается обновленное напряженно-деформированное состояние и определяется число циклов до разрушения следующего элемента с учетом повреждения, накопленного на начальном шаге. Критерий разрушения каждого элемента дается правилом линейного суммирования повреждений:

$$d_i = d_{\text{initial},i} + \sum_j n_j / N_j^i = 1 \quad (4)$$

где n_j – число циклов до разрушения наиболее «слабого» элемента на j -м шаге подрастания трещины; N_j^i – число циклов до разрушения i -го элемента на j -м шаге подрастания трещины, вычисляемое с помощью принятого критерия разрушения.

На рис. 7 показаны ступени подрастания трещины, возникшей у внутренней поверхности оболочки

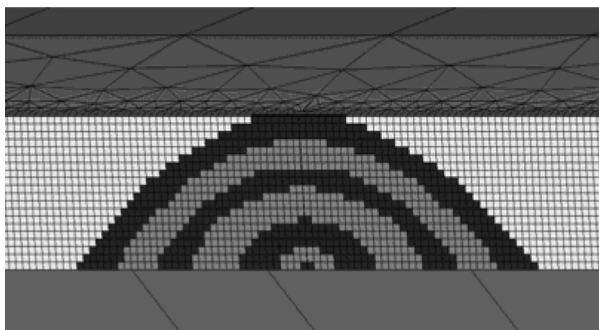


Рис. 7. Моделирование роста трещины к внешней поверхности трубопровода

ки, до момента, когда трещина становится сквозной (в расчете не предусматривался учет возможности нестабильного разрушения оболочки). Ограниченная протяженность трещины вдоль образующей обусловлена в этом примере свойствами сетки КЭ.

Надо заметить, что в рассмотренной процедуре моделирования разрушения может потребоваться перестроение сетки КЭ и последовательный расчет поля напряжений, если траектория трещины заранее не предполагается (в программах МКЭ имеется возможность автоматической перестройки сетки). Однако при этом должна быть сохранена информация о накопленном повреждении окружающего трещину материала.

Отметим, что модель накопления повреждений может быть дополнена моделью подрастания трещины линейной механики разрушения (например, [20]), которая позволит предсказать возможность нестабильного (хрупкого) разрушения компонентов конструкций при подрастании трещин усталости.

Эффективность рассмотренного приема моделирования усталостного разрушения показана на нескольких примерах: разрушение сварного соединения с неполным проплавлением [21], моделирование трещин усталости в образцах [22]; результаты численного моделирования весьма удовлетворительно согласуются с опытными данными.

Заключение

Принятые современными правилами приемы расчета усталости компонентов конструкций, в которых применяются S-N-критерии (Nominal stress approach, Hot-spot stress and Notch-stress approach), приводят к оценке ресурса конструкций при ряде приближений и с неопределенностями. Наиболее существенные проблемы оценки усталости конструкций

методами, основанными на S-N-критериях, – неопределенность соответствия повреждения образцов и деталей конструкций, приближенность учета роли концентрации напряжений (в физическом и механическом аспектах) и другие. Описаны некоторые возможности развития методов расчета усталости конструкций, основанные на опыте ряда исследований.

Работа выполнена в рамках проекта, поддержанного фондом РФФИ (Грант 16-08-00845а).

Библиографический список

1. Niemi E., Fricke W., Maddox S.J. Structural Hot-spot stress approach to fatigue analysis of welded components. Designers' Guide // Int. Institute of Welding, IIW-Doc. XIII-WG3-31r1-14. Cambridge, Abington, 2015. P. 49.
2. EUROCODE 3: Design of Steel Structures. Part 1-9: Fatigue. BS EN 1993-1-9: 2014. P. 36.
3. Marshall P.W. Basic considerations for tubular joint design in offshore construction // WRC Bulletin. 1974. 193. New York.
4. Haibach E. Die Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen aus der Sicht einer Örtlichen Beanspruchungsmessung. Laboratorium für Betriebsfestigkeit (LBF), Darmstadt, Report FB-77, 1968 (in German).
5. Fricke W. Guideline for the fatigue assessment by Notch stress analysis for welded structures. IIW-Doc. XIII-2240r1-08/XV-1289r1-08. Cambridge, Abington, 2008.
6. Frost N.E., Marsh K.J., Pook L.P. Metal Fatigue. Oxford: Clarendon Press, 1974.
7. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Физические основы усталости металлов. М.: Металлургия, 1975.
8. Kocanda S. Zmeceniuowe pekanie metali. Warszawa: Wyd. Naukowo-Techn., 1972.
9. Det Norske Veritas. Fatigue Assessment of Ship Structures. Classification Notes № 30.7. Hovik, Norway, 2014
10. Petinov S.V., Thayamballi A.K. The application of S-N curves considering mismatch of stress concentration between test specimen and structure // Journal of Ship Research. 1998. Vol. 42. No. 1. 1998. P. 68.
11. Petinov S.V., Reemsnyder H.S., Thayamballi A.K. The similitude of fatigue damage principle: application in S-N curves-based fatigue design / Fatigue design and reliability / Ed. by G. Marquis and J. Solin. ESIS Publication 23. Elsevier Science Ltd., 1999. P. 219–228.

12. *Petinov S.V., Afanasyeva I.M.* Fatigue assessment of structures in high-cycle segment: technique and problems // Proc., The XXXVII Intern. Summer School – Conference «Advanced Problems in Mechanics» APM-2010. SPb, Repino, 2010. P. 519–525.
13. *Berge S.* Corrosion fatigue testing of welding joints at low frequencies. SK/R40. Division of Ship Structures, NTH, Trondheim, 1976.
14. *Petinov, S.V., et al.* Low-cycle fatigue in conditions of accelerated corrosion // Papers of the Central Maritime Research Institute (In Russian: Малоцикловая усталость в условиях ускоренной коррозии // Труды ЦНИИ Морского флота). 1974. 186. P. 118–121.
15. *Peterson R.E.* Stress concentration factors. A Handbook. NY: J. Wiley & Sons, 1977.
16. *Petinov S.V.* Fatigue analysis of ship structures. NJ: Backbone Publishing, 2003.
17. *Glinka G.* A cumulative model of fatigue crack growth // International Journal of Fatigue. April 1982. P. 59–67.
18. *Guchinsky R.V., Petinov S.V.* Surface fatigue crack growth simulation based on the finite-element aided damage accumulation procedure // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2015. 8. Issue 7. P. 890–900.
19. *Petinov S.V., Guchinsky R.V., Sidorenko V.G.* Damage accumulation-based and FEA-aided fatigue life evaluation of tubular structures // Proc., The XLIV Intern. Summer School – Conference «Advanced Problems in Mechanics» APM-2016. SPb, IPME RAS, 2016. P. 199–206.
20. *Guchinsky R.V., Letova T.I., Petinov S.V.* Modeling of fatigue process by combining the crack initiation and growth // Proc., The XLII Intern. Summer School – Conference «Advanced Problems in Mechanics» APM-2014. SPb – Repino, SPb, IPME RAS, 2014. P. 128–134.
21. *Guchinsky R.V., Petinov S.V.* Fatigue of fillet-welded joint assessment by the FEA simulation of damage accumulation // Magazine of Civil Engineering. 2011. No. 4(22). P. 5–9.
22. *Imran M., Siddique S., Guchinsky R.V., Petinov S.V., Walther F.* Comparison of fatigue life assessment by analytical, experimental and damage accumulation modeling approach for steel SAE 1045 // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2016. Vol. 39(9). P. 1138–1149.

Сведения об авторах

Гучинский Руслан Валерьевич, к.т.н., старший научный сотрудник ИПМаш РАН. Адрес: 199178, Россия, г. Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., 61. Телефон: +7 (812) 366-26-44. E-mail: ruslan239@mail.ru.

Петинев Сергей Владимирович, д.т.н., профессор СПбПУ, Инженерно-строительный институт. Адрес: 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29. Телефон: +7 (812) 552-39-52. E-mail: sergei.petinov@gmail.com.

Поступила / Received: 03.03.18
Принята в печать / Accepted: 03.05.18
© Коллектив авторов, 2018