

Определение долговечности при циклических нагрузках консольной балки с концентратором напряжений при изгибе

Г. В. Степанов, И. А. Мамеев

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Приведены методика и результаты исследования долговечности металла консольной балки в области концентратора напряжений при одностороннем циклическом изгибе. В результате сравнения данных эксперимента и численного моделирования между собой определена связь долговечности с амплитудой неупругого циклического деформирования. Установлено влияние деформационного упрочнения и скорости пластической деформации на долговечность.

Ключевые слова: нагружение изгибом, долговечность, скорость пластической деформации.

Введение. В элементах конструкций с концентраторами напряжений, подверженных циклическому нагружению изгибом, при амплитудах, вызывающих неупругое циклическое деформирование, возникают трещины, которые приводят к снижению их долговечности [1–3]. Задача усложняется необходимостью учитывать влияние на долговечность напряженно-деформированного состояния, коррозионного воздействия [4, 5] и скорости деформации [6]. Расчетная оценка долговечности при циклическом нагружении с учетом влияния скорости деформации не представляется возможной без экспериментальных исследований, развитие которых является актуальным.

В данном сообщении приведена методика определения долговечности металла при упругопластическом деформировании в области концентратора по результатам испытаний консольной балки с краевым концентратором напряжений при одностороннем циклическом изгибе с коэффициентом асимметрии перемещений $R_w = 0$.

В результате сравнения данных эксперимента (число циклов до появления трещины заданной длины $\sim 0,5$ мм) и численного моделирования (расчетное число циклов) между собой определена связь долговечности с амплитудой неупругого циклического деформирования с учетом влияния скорости пластической деформации в области концентратора.

Методика экспериментальных исследований. Объектом исследования служили образцы из стали Ст. 3 в виде пластины с поперечным сечением 5×30 мм, длиной $L = 120$ мм и краевым концентратором в виде выемки глубиной $a = 6,5$ мм и радиусом $r_1 = 2$ мм (рис. 1).

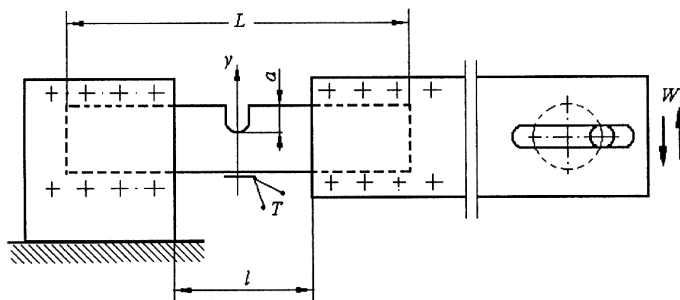


Рис. 1. Схема циклического нагружения образца при изгибе.

Благодаря наличию выемки уменьшается жесткость сечения образца в области концентратора, в результате чего снижаются деформации в остальных областях образца.

Концы образца зажимаются между жесткими пластинами, а конец консольного рычага длиной около 450 мм нагружается заданным перемещением W . Циклическое перемещение конца рычага обеспечивается движением в его продольном пазу кулачка, закрепленного с эксцентриситетом через подшипник на шкиве вала электродвигателя. Изменение эксцентриситета оси подшипника относительно оси вращения двигателя приводит к изменению амплитуды циклических перемещений W .

Зависимость неупругой деформации $\varepsilon_c(W)$ в области концентратора от перемещения конца рычага при циклическом изгибе определяли с помощью расчетно-экспериментальной методики.

С этой целью на первом этапе по результатам серии измерений деформации тензорезистором (на рис. 1 обозначено T) определяли зависимость деформации на нижней грани образца от перемещения рычага $\varepsilon_T(W)$. Связь между неупругой деформацией материала в области концентратора и на нижней грани образца $\varepsilon_c(\varepsilon_T)$ определяли с помощью метода конечных элементов (МКЭ). В расчете использовали модель материала с кусочно-линейным изотропным упрочнением, аппроксимирующим экспериментально определенную диаграмму металла при растяжении истинное напряжение – истинная деформация. По результатам обработки экспериментальной $\varepsilon_T(W)$ и расчетной $\varepsilon_c(\varepsilon_T)$ диаграмм определяли связь $\varepsilon_c(W)$, которую использовали при анализе результатов испытаний.

Ниже приведены данные, необходимые для реализации предложенной методики.

Экспериментальные данные:

диаграмма деформирования металла при статическом растяжении;

зависимость деформации сжатия ε_T на нижней грани образца (под концентратором напряжений) от перемещения конца рычага W ;

число циклов N до появления трещины заданной длины ($\sim 0,5$ мм), наблюдаемой на боковой поверхности образца, при различной величине W .

Расчетные данные (моделирование МКЭ с использованием программы ANSYS ED [7]):

расчетная зависимость максимальной пластической деформации ε_p в области концентратора напряжений от деформации сжатия ε_T волокон на нижней грани образца;

расчетная зависимость приращения эквивалентной циклической пластической деформации $\Delta\varepsilon_p$ в области концентратора напряжений от перемещения рычага W (или изгибающего момента M в сечении образца с концентратором);

расчетная суммарная неупругая деформация металла в области концентратора напряжений, соответствующая появлению макротрещины длиной $\sim 0,5$ мм, в зависимости от приращения эквивалентной циклической пластической деформации.

Результаты экспериментальных исследований. Исходную кривую деформации исследуемого материала определяли при испытании на статическое растяжение образца с поперечным сечением $S_0 = 8 \times 5$ мм и длиной рабочей части $l_0 = 50$ мм, изготовленного из той же листовой заготовки, что и образцы для циклических испытаний. Диаграмму нагрузка P – перемещение Δl или диаграмму условное напряжение σ_y – условная деформация ε_y ($\sigma_y = P/S_0$, $\varepsilon_y = \Delta l/l_0$) пересчитывали в диаграмму истинное напряжение σ – истинная деформация ε с использованием известных соотношений [8], следующих из условия пластической несжимаемости металла (рис. 2):

$$\sigma = \sigma_y (1 + \varepsilon_y); \quad \varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_y). \quad (1)$$

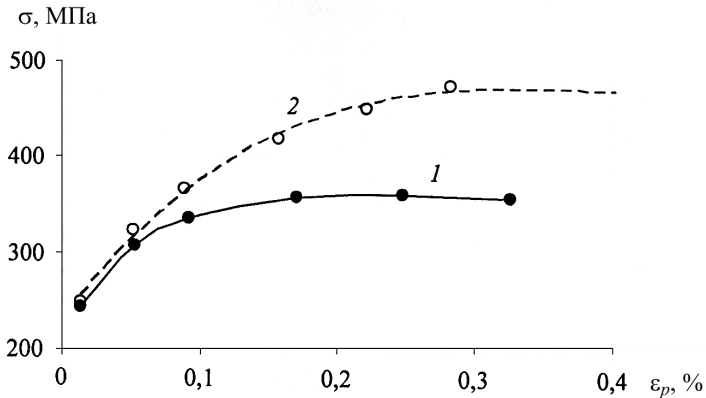


Рис. 2. Диаграмма деформирования образца при растяжении $\sigma_y(\epsilon_y)$ – 1 и расчетная диаграмма $\sigma(\epsilon)$ – 2.

Учитывая, что площадка текучести характеризует процесс распространения начальной пластической деформации по длине рабочей части образца и, следовательно, не описывает связь между напряжениями и деформациями в материале [6], при расчете диаграммы $\sigma(\epsilon)$ использовали диаграмму $\sigma_y(\epsilon_y)$, полученную сдвигом участка упрочнения на величину деформации, соответствующую длине площадки текучести (около 0,15%).

Моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) в балке при консольном изгибе. Расчеты выполнены для балки (рис. 1) из стали Ст. 3 с поперечным сечением 5×30 мм, длиной $l = 40$ мм и краевым концентратором напряжений ($a = 6,5$ мм, $r_1 = 2$ мм) в середине пролета при плоском деформированном состоянии (ПДС). Консольный нагружающий рычаг моделировали упругим участком балки с десятикратным увеличением модуля упругости. Для оценки влияния остроты концентратора расчеты проводили с уменьшенным радиусом ($a = 6,5$ мм, $r_2 = 0,2$ мм). С целью повышения точности оценки локального НДС с использованием МКЭ применяли модель с размерами элементов вблизи концентратора, равными примерно 0,25 и 0,025 мм при радиусах $r_1 = 2$ мм и $r_2 = 0,2$ мм соответственно, что обеспечивает достаточно низкий градиент деформаций в пределах элементов.

Модель поведения металла – упругопластическое деформирование с изотропным упрочнением, аппроксимирующим экспериментальную начальную часть (эквивалентная деформация менее 35%) кривой деформирования при растяжении. Основные механические характеристики металла, принятые в расчетах: диаграмма деформирования при растяжении $\sigma(\epsilon)$; модуль упругости $E = 200$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; предел текучести при растяжении $\sigma_T = 244$ МПа; предел прочности $\sigma_B = 362$ МПа; изменение площади поперечного сечения в шейке $\psi = 0,6$.

Моделирование деформации в области концентратора. При низком уровне нагрузки малое перемещение W по расчетным данным не вызывает неупругих деформаций в области концентратора. В случае повышенной амплитуды W при первом цикле нагружения имеет место пластическая деформация как в области концентратора напряжений, так и на противоположной концентратору грани образца, при последующих циклах нагружения циклическая пластическая деформация ограничена областью концентратора. С ростом W повышается как пластическая деформация при первом цикле нагружения, так и приращение эквивалентной циклической пластической деформации $\Delta\epsilon_p$ в области концентратора. При последующих циклах нагружения величина $\Delta\epsilon_p$ уменьшается без изменения пластической деформации на противоположной грани образца.

По результатам расчетов перемещение конца рычага W в диапазоне выше 3 мм вызывает в области дна концентратора повышенную пластическую деформацию при первом цикле нагружения. При последующих циклах нагружения происходит перераспределение НДС, в результате которого наблюдается циклическое изменение деформации $\Delta\varepsilon_p$ при уровне максимального и минимального эквивалентного напряжения, соответствующего пределу текучести (коэффициент асимметрии цикла напряжений $R_\sigma = -1$).

Напряженно-деформированное состояние в области концентратора при использовании упругопластической модели металла определяется изгибающим моментом в поперечном сечении образца с концентратором, зависимость которого от перемещения рычага приведена на рис. 3.

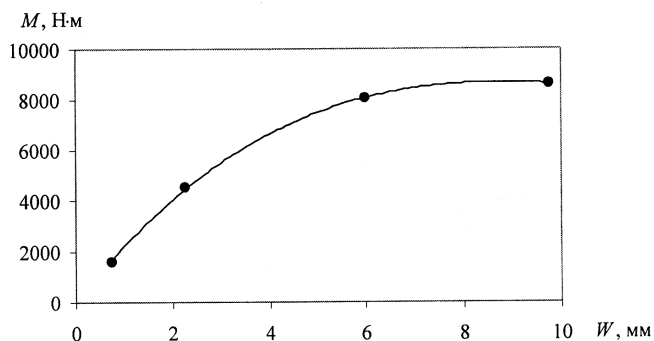


Рис. 3. Зависимость изгибающего момента M в поперечном сечении образца с концентратором от перемещения рычага W .

Примем, что при нелинейном суммировании деформаций $\Delta\varepsilon_p$, определяющих поврежденность, для предельной деформации $\varepsilon_f = -\ln(1-\psi)$ число циклов до появления макротрещины определяется из уравнения [2]

$$N = \frac{\varepsilon_f}{4\Delta\varepsilon_p}. \tag{2}$$

Зависимость роста эквивалентной циклической пластической деформации $\Delta\varepsilon_p$ за цикл нагрузки у поверхности концентратора от числа циклов до разрушения N_f (рис. 4) не зависит от радиуса r в соответствии с формулой (2).

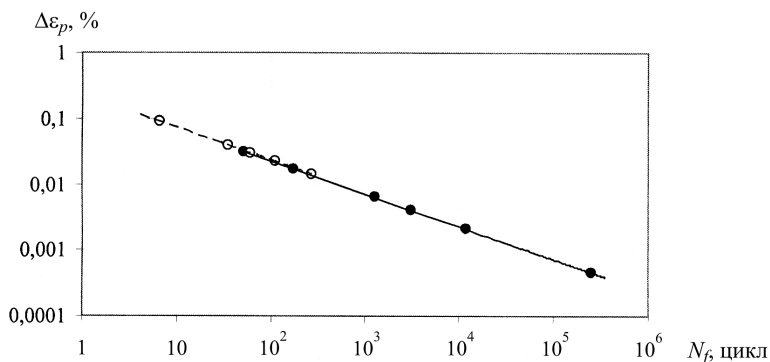


Рис. 4. Зависимость роста эквивалентной циклической пластической деформации $\Delta\varepsilon_p$ за цикл нагрузки от числа циклов до разрушения N_f образца с концентраторами радиусом $r_1 = 2$ мм (●) и $r_2 = 0,2$ мм (○).

Следует заметить, что при использовании в расчетах модели плоского напряженного состояния (ПНС) металла имеют место большие значения циклической пластической деформации. В реальном образце конечной толщины исчерпание ресурса пластичности достигается раньше у кромок в области концентратора, где НДС больше соответствует ПНС. Однако разрушение в центральной части поверхности между кромками определяется как НДС, более близкое к плоской деформации.

Сопоставление расчетной долговечности с полученной экспериментально. Для оценки влияния эффектов вязкости на циклическую неупругую деформацию было промоделировано циклическое нагружение балки с концентратором радиусом $r_1 = 2$ мм при синусоидальном изменении W с частотой 25 Гц. В расчетах для описания деформации металла, чувствительного к скорости пластической деформации, использовали уравнение Пэжины [7]. Динамическое напряжение σ_d , учитывающее скорость пластической деформации, определяется по зависимости

$$\sigma_d = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\gamma} \right)^m \right] \sigma, \quad (3)$$

где $\dot{\epsilon}_p$ – скорость пластической деформации; σ – напряжение при статическом нагружении, не учитывающее влияние скорости пластической деформации; γ , m – параметры, характеризующие влияние скорости деформации (для предварительной оценки принято $\gamma = 1$ и $m = 1$).

По результатам расчетов без учета эффектов вязкости, т.е. без учета скорости пластической деформации, приращение пластической деформации в области концентратора понижается при последующих циклах нагрузки, а амплитуда циклического изменения эквивалентного напряжения повышается в результате деформационного упрочнения. При этом среднее значение напряжения приближается к нулевому уровню (рис. 5), а уровень накопленной пластической деформации возрастает. Приращение эквивалентной циклической пластической деформации за цикл снижается с увеличением числа циклов от начала нагружения (рис. 6).

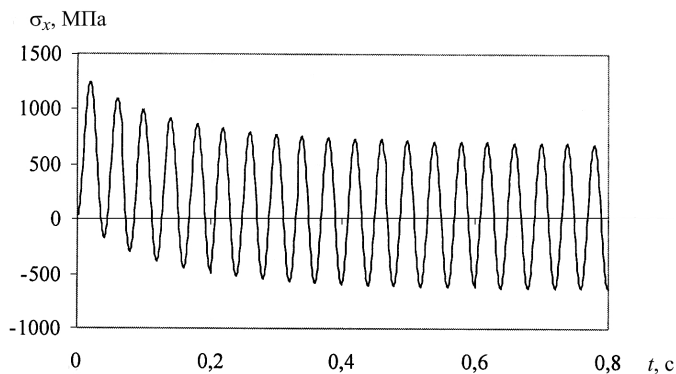


Рис. 5. Изменение во времени напряжения в области дна концентратора ($r_1 = 2$ мм) при циклическом изгибе балки с частотой 25 Гц, $W = 0,45$ мм.

Учет эффекта вязкости, т.е. влияния скорости пластической деформации, при циклическом изгибе с частотой 25 Гц проявляется (по зависимости (3)) в значительном повышении амплитуды циклических напряжений, причем уровень средних напряжений в цикле уменьшается до нуля в течение начальных 15–20 циклов.

Приращение эквивалентной циклической пластической деформации за цикл с учетом эффектов вязкости при $W = 6,0$ мм снижается примерно вдвое. Скорость

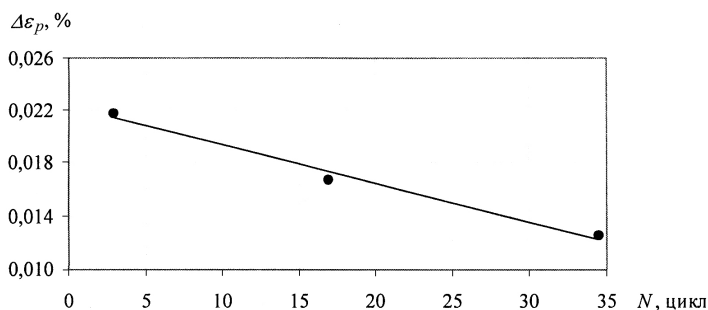


Рис. 6. Изменение эквивалентной циклической пластической деформации в зависимости от числа циклов от начала нагружения при $W = 6$ мм ($M = 8100$ Н·м).

эквивалентной пластической деформации при радиусе концентратора $r_1 = 2$ мм не превышает $0,8 \text{ с}^{-1}$, при $r_2 = 0,2$ мм – $1,6 \text{ с}^{-1}$.

Расчетная величина неупругой деформации за цикл понижается с учетом эффекта вязкости и удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными, полученными при испытании образцов с концентратором радиусом $r_1 = 2$ мм (рис. 7). Число циклов до зарождения макротрещины (появление трещины длиной около 0,5 мм от дна концентратора, наблюдаемой на боковой поверхности образца) с учетом эффекта вязкости существенно выше расчетного значения при квазистатическом нагружении. Значения расчетной долговечности при циклическом изгибе с неупругим циклическим деформированием, определенные по ресурсу пластичности металла (рис. 7), существенно ниже таковых, полученных при циклическом изгибе с частотой 25 Гц. Это свидетельствует о влиянии на НДС и долговечность в области концентратора эффектов деформационного упрочнения и вязкости. Проявление эффектов вязкости при низкой скорости деформации незначительно, а при циклическом нагружении в проведенных экспериментах вызывает снижение эквивалентной циклической пластической деформации.

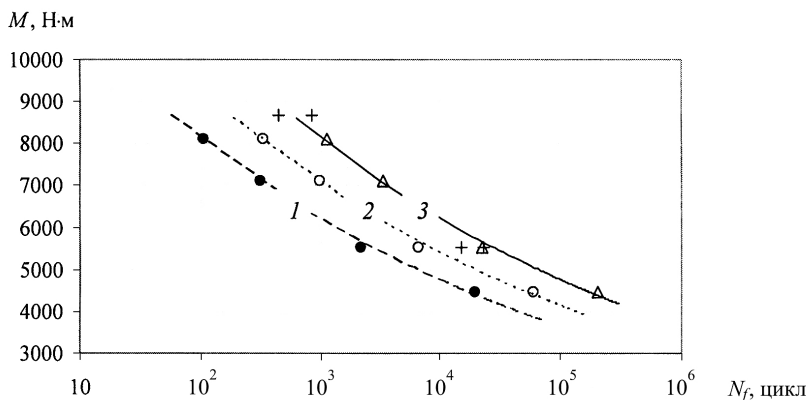


Рис. 7. Зависимость изгибающего момента в сечении с концентратором от расчетного числа циклов до разрушения, определенная по величине $\Delta\varepsilon_p$ при статическом нагружении для 4- (1) и 35-го (2) циклов нагружения; при динамическом нагружении для 35-го цикла (3); + – результаты экспериментов.

Следовательно, эффекты вязкости влияют на уровень неупругой циклической деформации и на долговечность, определяемую ресурсом пластичности металла, и должны учитываться при оценке долговечности конструкции по результатам испытаний образцов при частотах, отличающихся от эксплуатационных.

Выводы

1. Предложенная методика испытаний на циклический изгиб позволяет оценить влияние неупругого циклического деформирования металла в области концентратора на долговечность до появления макротрещины заданного размера.

2. Долговечность до появления макротрещины при циклическом нагружении снижается с увеличением остроты концентратора напряжений и длительности цикла, определяющей эффекты вязкости исследованного металла.

3. Эффекты вязкости влияют на уровень неупругой циклической деформации и на долговечность, определяемую ресурсом пластичности металла, и должны учитываться при оценке долговечности конструкции. При циклическом нагружении амплитуда напряжений выше, а рост эквивалентной циклической пластической деформации за цикл меньше, чем при статическом нагружении.

4. Оценка влияния на долговечность асимметрии цикла неупругого деформирования металла в области концентрации напряжений, в том числе в вершине трещины, является задачей дальнейших исследований.

Резюме

Наведено методику і результати дослідження довговічності металу консольної балки в області концентратора напружень за однобічного циклічного згину. Порівняння даних експерименту і чисельного моделювання між собою свідчить про зв'язок довговічності з амплітудою непружного циклічного деформування. Установлено вплив деформаційного зміцнення і швидкості пластичної деформації на довговічність.

1. Махутов Н. А., Гаденин М. М. Обоснование прочности, ресурса, надежности и безопасности ГЭС // Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем: Тр. Всерос. науч.-практ. конф. (Москва, 1–3 июня 2010 г.). – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 2. – С. 201 – 205.
2. Куркин А. С., Батов Г. П. Предельная пластичность – универсальная локальная критериальная характеристика разрушения для оценки ресурса сварных конструкций // Завод. лаб. – 2010. – 76, № 6. – С. 45 – 54.
3. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
4. Драгунов Ю. Г., Зубченко А. С., Петрова О. Ю., Харина И. Л. Влияние воды высоких параметров на склонность стали 10ГН2МФА к замедленному деформационному коррозионному растрескиванию // Машиностроение и инж. образование. – 2007. – № 4. – С. 35 – 41.
5. Чаусов Н. Г., Лебедев А. А., Гетманчук А. В. Влияние вида напряженного состояния на кинетику накопления повреждений и трещиностойкость стали 15Х2МФА в разных состояниях // Пробл. прочности. – 1993. – № 3. – С. 3 – 9.
6. Степанов Г. В. Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 288 с.
7. ANSYS HTML. Online Documentation. – SAS IP Inc. – 2005.
8. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие / Под ред. В. Т. Трошенко. – Киев: Наук. думка, 1993. – Ч. 1. – 288 с.

Поступила 18. 06. 2013