



## Расчет поврежденности элементов металлических конструкций с концентраторами напряжений при многоцикловой усталости

В.С. Евграфов<sup>1</sup>, И.К. Цэндин<sup>2</sup>, Б.Е. Мельников<sup>3</sup>, В.А. Шерстнев<sup>4</sup>, М.А. Мочалов<sup>5</sup>

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

Информация о статье	История	Ключевые слова
УДК 69	Подана в редакцию 11 февраля 2014 Оформлена 20 апреля 2014	усталость малоцикловая; многоцикловая; строительные металлические конструкционные элементы; концентраторы напряжений; градиенты деформаций; напряжений; пластические деформации; поврежденность; долговечность;
Научная статья	Согласована 30 апреля 2014	

### АННОТАЦИЯ

Работа посвящена вопросу обеспечения усталостной прочности металлических конструкций. Вопросы подобного рода обычно рассматривают уже на стадии проведения проектировочных расчетов. Предлагается модифицированная  $\delta$  – модель оценки поврежденности, которая основана на энергетических критериях с использованием экспериментальных данных на лабораторных образцах с различными типами концентраторов. Получаемые оценки основаны на учете максимальных значений градиентов напряжений в зонах концентраторов.

### Содержание

1.	Введение	129
2.	Энергетическая модель расчета многоцикловой усталости в условиях сложного неоднородного напряженного состояния	129
3.	Сопротивление усталости в области концентрации напряжений	130
4.	Выводы	133

<sup>1</sup> Контактный автор:  
<sup>2</sup> +7 (905) 213 8283, evgrafov-vs@yandex.ru (Евграфов Виталий Сергеевич, ассистент)  
<sup>3</sup> +7 (812) 535 0785, tsendin@yandex.ru (Цэндин Илья Константинович, ассистент)  
<sup>4</sup> +7 (921) 381 8968, kafedra@ksm.spbstu.ru (Мельников Борис Евгеньевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Сопротивления материалов»)  
<sup>5</sup> +7 (911) 944 2425, sherval1@yandex.ru (Шерстнев Владимир Алексеевич, к.т.н, профессор)  
 +7 (812) 535 0785, mochalov@santi.ru (Мочалов Михаил Алексеевич, старший преподаватель)

## 1. Введение

Обеспечению усталостной прочности металлических строительных конструкции и их элементов (резервуаров [1] и трубопроводных систем [2], подъемно-транспортных сооружений [3], оснований морских платформ, мостов [4, 5], элементов шлюзовых ворот судоходных гидротехнических сооружений [6], и др.), подвергающихся воздействию циклических нагрузок в процессе эксплуатации, отводится ключевая роль в проектировочных расчетах. Как правило, усталостные повреждения накапливаются в зоне концентрации напряжений. В работах [7-17], проводится подробный анализ и обобщаются данные многочисленных экспериментов и расчетных методик, позволяющих учитывать влияние не только неоднородностей, но и степени градиентности напряженного состояния, а также принимать во внимание наличие пластических деформаций в зонах концентрации напряжений при оценке долговечности элементов конструкции. Однако вопрос более точного расчета поврежденности элементов металлических конструкций в зонах концентрации напряжений остается по-прежнему актуальным.

Целью данной работы является дальнейшее развитие метода определения долговечности конструктивных элементов с концентраторами напряжений, основанного на анализе напряженно-деформированного состояния в условиях циклического нагружения.

## 2. Энергетическая модель расчета многоциклового усталости в условиях сложного неоднородного напряженного состояния

При эксплуатации строительных металлических конструкций в зонах концентрации напряжений возникают, как правило, локальные пластические деформации, что в случае переменной нагрузки может привести либо к малоцикловым разрушениям, либо к ускорению многоциклового разрушения. Для оценки усталости конструктивных элементов в области концентрации напряжений, прежде всего, должен быть решен вопрос о механическом приспособлении или его отсутствии к заданному нагружению, а затем уже следует проводить соответствующий расчет на многоцикловую или малоцикловую усталость. При наличии приспособления к циклическому нагружению возможен лишь микропластический гистерезис при упругопластическом деформировании отдельных зерен. Вместе с тем при расчетах на циклическую прочность применим подход, основанный на использовании гипотетической модели пластического деформирования и экспериментальных данных по циклическому разрушению образцов при различных коэффициентах асимметрии цикла. Для оценки поврежденности может быть использована энергетическая модель (1), разработанная в СПбГПУ Павловыми П. А. его коллегами [7, 8]. Поврежденность представляет собой сумму составляющей накопленной при однократном приложении максимальной нагрузки и составляющей постепенно накапливающейся в процессе циклического нагружения. Аналогичное разделение было предложено в [18] для деформационного критерия малоциклового усталости, который нашел широкое применение при расчете деталей газотурбинных установок [19, 20].

$$\Pi(N) = \frac{\sigma(N)_{max}}{\bar{\sigma}_p} + \sum_{k=1}^N \varphi(\chi_k, R_k), \quad (1)$$

где  $\sigma(N)_{max}$  – максимальное приведенное главное напряжение за цикл;  $\bar{\sigma}_p$  – истинный предел прочности;  $\varphi(\chi_k, R_k)$  – функция, которая определяется по кривым усталости для различных коэффициентов асимметрии цикла  $R_k$ ,  $\chi_k$  – параметр, характеризующий рассеяние энергии;  $N$  – число циклов.

В дальнейшем концепция накопления повреждений может быть использована также и при появлении в конструкции макротрещины. Методика вычисления поврежденности в этом случае детально описана в [21].

При расчетах, согласно рекомендациям [7], полагалось

$$\chi_k = \frac{\sigma_{max}(1 - R_k)}{C_2} - 2, \quad (2)$$

где  $C_2 = 0,8\sigma_{-1}$ ;  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости.

В случае стационарного нагружения соотношение (2) преобразуется к виду:

$$\Pi(N) = \frac{\sigma_{max}}{\bar{\sigma}_p} + \varphi(\chi, R)N, \quad (3)$$

Отсюда из результатов экспериментов на усталостное нагружение при  $\Pi = 1$  может быть определено

$$\varphi(\chi, R) = \left(1 - \frac{\sigma_{max}}{\bar{\sigma}_p}\right) \frac{1}{N_p}, \quad (4)$$

где  $N_p$  - разрушающее число циклов, соответствующее значению  $\sigma_{max}$  и коэффициенту асимметрии  $R$ .

Функция  $\varphi$  определяется по результатам многоцикловых усталостных испытаний на гладких стандартных образцах при разных значениях  $R$ .

По данным испытаний для различных уровней нагрузки получаются зависимости  $\chi_k - \lg \varphi$ , которые представляет собой семейство кривых для различных коэффициентов асимметрии цикла.

### 3. Сопротивление усталости в области концентрации напряжений

При деформировании элементов конструкций, как правило, возникает неоднородное напряженное состояние. Влияние этого фактора на прочность в ряде случаев весьма существенно. В многочисленных работах, например [9,10] проведены исследования по сравнительному анализу пределов выносливости образцов, испытанных в условиях однородного (растяжение-сжатие) и неоднородного (изгиб) напряженного состояния.

Существенная неоднородность напряженного состояния наблюдается в зоне концентраторов напряжений. Из-за сложности анализа напряженно-деформированного состояния в районе концентратора чаще всего применяются упрощенные методы расчета на усталость. В работах [7-15], выполнена систематизация уравнений, связывающих теоретические и эффективные коэффициенты концентрации напряжений. В работе [22] используется понятие характерного размера  $l_c$  - критической длины трещины, распространяющейся вглубь образца. Величина этой трещины соответствует пороговому значению коэффициента интенсивности напряжений. Показано [22], что  $l_c$  может рассматриваться как характеристика материала.

Большое влияние на явление усталости оказывает существование поверхностного (приповерхностного) слоя с ослабленными прочностными свойствами. Основная причина отличия свойств этого слоя заключается в отсутствии связей атомов на поверхности (точнее в отсутствии их с одной стороны), а также в отсутствии стеснения деформации при деформировании неблагоприятно расположенных к направлению нагрузки микрообъемов. По данным работы [16] предел текучести в поверхностном слое падает до 40% от интегральной величины. Глубина слоя ослабленных свойств материала - 0,125-0,22 мм.

В зонах концентрации напряжений и деформаций имеют место большие значения градиентов этих величин. Оценка долговечности по максимальным значениям напряжений в области концентратора напряжений приводит к ее заниженным значениям по сравнению с данными опытов. Возможное объяснение заключается в том, что при таком подходе найденная долговечность соответствует образованию микротрещин в точке наибольшей концентрации напряжений и не учитывает того количества циклов, которое необходимо для их распространения.

В связи с этим Петерсон Р. [23, 24] предложил определить долговечность до образования пороговой макротрещины по напряженному состоянию точки, отстоящей от поверхности концентратора на некотором расстоянии  $\delta$ . Сначала такой подход применялся для определения эффективного коэффициента концентрации напряжений в случае статического разрушения. В дальнейшем [25, 26] он был распространен на случай много- и малоциклового усталости получил название  $\delta$  - модели. Однако при этом не учитывалось возникновение пластических деформаций в зоне концентраторов напряжений. В работах [25, 26]  $\delta$  - размер рассматривается, как характеристика материала, не зависящая от типа концентратора и уровня циклической нагрузки. Вместе с тем установлено влияние уровня напряжений на

величину  $\delta$  - размера. Кроме того, в известных подходах не учитывается влияние неоднородности напряженного состояния на характеристики усталостного разрушения.

Ниже предлагается метод расчетно-экспериментальной оценки сопротивления усталости конструкционного элемента состоящий из двух этапов [27].

На первом этапе определяются экспериментальные параметры  $\delta$  - модели. На втором этапе проводится расчет элемента конструкции и определяется его поврежденность по данным первого этапа.

Первый этап включает в себя следующую последовательность операций:

1.1. Получение кривых многоциклового усталости (если они не известны) на гладких стандартных образцах при различных значениях коэффициента асимметрии цикла. На основании данных на циклическую усталость определяются функции  $\varphi$  выражение (4).

1.2. Получение кривых многоциклового усталости на основании опытов на образцах с концентраторами напряжений при различных значениях коэффициента асимметрии цикла

1.3. Получение результатов численного (конечно-элементного) расчета напряженно-деформированного упругопластического циклического состояния в зоне концентрации напряжений для образцов из п. 1.2. Для обеспечения высокой точности результатов упругопластических расчетов при сложном циклическом нагружении целесообразно использовать многомодельный подход [28].

1.4. Выбор многоциклового модели определения поврежденности (1-4) в случае наличия механического приспособления полученного по результатам расчета образцов с концентраторами п. 1.3.

1.5. Определение зависимостей распределения долговечности от глубины расположения расчетной точки  $N_p \sim \delta$  для заданного уровня циклической нагрузки и заданного значения коэффициента асимметрии цикла. Расчетная долговечность определяется на основании опытных данных п.1.1 и выбранной модели оценки усталости п. 1.4. Расчет проводится по линии максимального градиента напряжений. На рис.1 представлена зависимость  $N_p \sim \delta$  для плоского образца с круглым отверстием (сталь 45), для двух уровней максимальных номинальных напряжений.

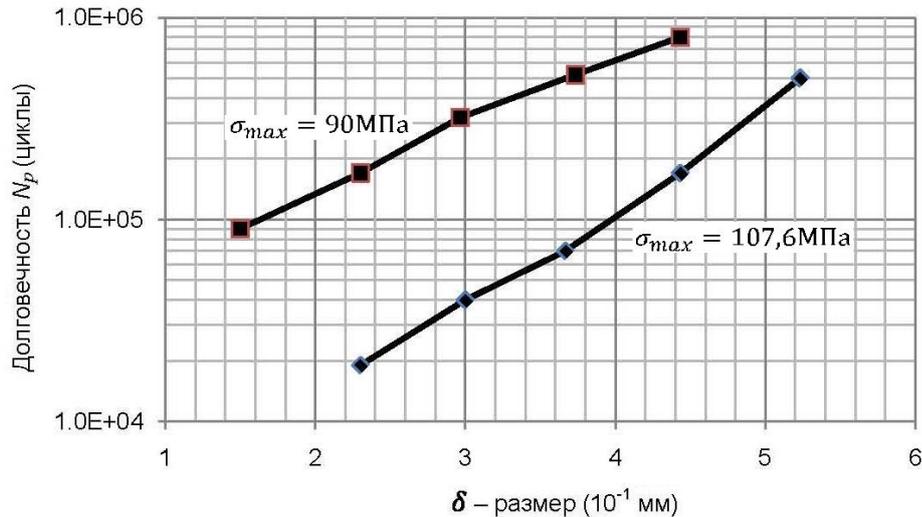
1.6. Определение величин  $\delta$ - размера для различных уровней максимальных расчетных амплитуд первых главных напряжений -  $\sigma_a$ , действующих в точке наибольшей концентрации для заданного уровня циклической нагрузки и заданного коэффициента асимметрии цикла. По экспериментальной кривой усталости п.1.2 и максимальному расчетному значению циклического напряжения определяется величина долговечности, отвечающая принятой вероятности разрушения. По данному уровню долговечности из кривых  $N_p \sim \delta$  (п.1.5), определяется  $\delta$ - размер, соответствующий данному материалу, типу концентратора, уровню циклического нагружения и коэффициенту асимметрии цикла для образца с концентратором.

1.7. На основании полученных значений  $\sigma_a$ ,  $\delta$  устанавливается соответствие  $\sigma_a \sim \bar{\delta}$ , где  $\bar{\delta} = \delta \cdot \bar{G}$  - относительный градиент первого главного напряжения в области концентрации для упругого деформирования

Величина  $\bar{G}$  может быть определена с помощью конечно-элементного анализа области концентрации образцов или на основании справочных данных [29].

Повторение операций п.1.2-1.7 данного этапа для различных значений циклической нагрузки позволяет получить зависимость  $\sigma_a \sim \bar{\delta}$  для любой области концентрации напряжений. Повторение операций п. 1.2-1.7 для различных типов концентраторов (радиусов надрезов) позволяет получить семейство кривых  $\sigma_a \sim \bar{\delta}$ .

Таким образом, на первом расчетно-экспериментальном этапе (1.1-1.7) могут быть получены зависимости -  $\sigma_a \sim \bar{\delta}$  для нескольких концентраторов напряжений (радиусов выточек), необходимые для проведения расчета долговечности реальной конструкции. При этом амплитуда максимального напряжения  $\sigma_a$  в области наибольшей концентрации определяется уровнем максимальной нагрузки.



**Рисунок 1. Расчетно-экспериментальные кривые зависимости долговечности  $N_p$  от глубины расположения расчетной точки ( $\delta$  – размера) для пластины с круглым отверстием и двух уровней циклической нагрузки при симметричном цикле нагружения**

Критерием подобия конструкционных (расчетных) концентраторов и концентраторов, для которых определены параметры модели (1.1-1.7) предлагается принять равенство (максимальное приближение) градиентов первых главных напряжений в зонах наибольшей концентрации при упругом деформировании.

Второй этап определения долговечности элемента конструкции основан на данных, полученных в ходе выполнения первого этапа. При этом предлагается следующая последовательность операций:

2.1. Определение линии наибольшего градиента напряжений и вычисление величины  $\bar{G}$  и  $\sigma_a$ , в области наибольшей концентрации напряжений для элемента конструкции по заданным параметрам циклического нагружения из расчета напряженно-деформированного состояния Амплитудные значения напряжений  $\sigma_{a\ max}$  приводятся к симметричному циклу нагружения. При простейшем представлении диаграммы предельных амплитуд (аппроксимация Гудмана [30]), которое получают при минимальном наборе необходимых экспериментальных данных о материале, расчетное значение приведенной к симметричному циклу амплитуды принимает вид:

$$\sigma_{a\ max}^* = \sigma_{a\ max} + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_u} \sigma_m, \quad (6)$$

где  $\sigma_m$  - среднее значение напряжения за цикл;  $\sigma_{-1}$  - предел выносливости материала при симметричном цикле;  $\sigma_u$  - предел прочности материала, определенные для стандартных образцов.

Обращается внимание [31, 32] на необходимость обеспечения строгой однородности напряженного состояния испытываемых образцов при определении предела выносливости  $\sigma_{-1}$  в условиях осесимметричного растяжения-сжатия. Минимизация сопутствующего изгиба при этом позволяет получить более корректную оценку (с эффектом повышения долговечности материала) за счет ослабления дополнительного деструктивного воздействия. При наличии более полных сведений о конструкционном материале (дополнительно определено значение  $\sigma_0$  - предел выносливости лабораторного образца без концентратора при отнулевом цикле нагружения) представляется возможность повысить точность получаемой оценки. Для этой цели вполне приемлема широко используемая в практике машиностроения билинейная модель диаграммы предельных амплитуд. Так для области знакопеременных циклов ( $-1 \leq R < 0$ ) расчетное значение приведенной амплитуды принимает вид

$$\sigma_{a\ max}^* = \sigma_{a\ max} + (\xi_1 - 1) \sigma_m, \quad (7)$$

а для области знакопостоянных напряжений ( $0 < R < 1$ ) это трансформируется следующим образом:

$$\sigma_{a\ max}^* = (\sigma_{a\ max}(1 - \xi_2) + \xi_2 \sigma_m) \xi_1, \quad (8)$$

где  $\xi_1 = 2\sigma/\sigma_0$ ,  $\xi_2 = \sigma_0/2\sigma_u$  - геометрические параметры расчетной модели, которые отражают влияние физических свойств материала, представленных его механическими характеристиками

2.2. Определение величины  $\bar{\delta} = \delta/\bar{G}$  - значения глубины расположения расчетной точки от поверхности по найденному значению  $\sigma_{a\max}^*$  с помощью зависимости  $\sigma_a \sim \bar{\delta}$  для найденного (в пункте 2.1) значения  $\bar{G}$ . Расчетная точка лежит на линии соединяющей точки наибольших значений напряжений.

2.3. Определение параметров кинетической модели накопления повреждений для случая многоциклового усталости (1-4), по найденным в ходе расчета значениям максимального растягивающего напряжения  $\sigma_{a\max}$  за всю историю деформирования. 2.4. Определение (1) расчетной долговечности  $N_p$  для стационарного режима нагружения или суммарной поврежденности  $P$  как суммы поврежденностей каждого  $j$ -го блока нагружения при нестационарном режиме.

2.4. Определение зависимости  $lg N_p \sim F_{max}$  на основании результатов пункта 2.4 для стационарного режима нагружения, где  $F_{max}$  амплитудное значение циклически меняющейся нагрузки. Для получения расчетной кривой усталости конструкционного элемента необходимо проведение расчетов (п.2.1-п. 2.5) для нескольких уровней циклической нагрузки.

## Выводы

Предлагается уточненный метод определения долговечности конструкционных элементов с концентраторами напряжений, основанный на анализе напряженно-деформированного состояния в условиях переменного нагружения.

Для определения долговечности предлагается модифицированная  $\delta$  – модель, включающая два этапа. На первом этапе определяются расчетно-экспериментальные параметры модели. На втором проводится расчет долговечности конструкционного элемента.

Модель основана на энергетических критериях кинетического накопления повреждений. В качестве экспериментальных данных для модели предлагается использовать кривые усталости гладких образцов при различных коэффициентах асимметрии цикла и кривые усталости образцов с различными типами концентраторов напряжений.

При определении долговечности учитывается зависимость связывающая накопление повреждений с максимальными значениями градиентов напряжений в зоне концентратора.

Поле напряжений в зоне концентратора определяется на основе численного КЭ-анализа.

## Литература

1. Землянский А.А., Вертынский О.С. Опыт выявления дефектов и трещин в крупноразмерных резервуарах для хранения углеводородов // Инженерно-строительный журнал. 2011. №7(25). С. 40-44.
2. Petinov S.V., Melnikov B.E. Effect of Prestrain on Fatigue Crack Growth in Low-carbon Steel // Magazine of Civil Engineering. 2011. №3(21). Pp. 71-74.
3. СТО 02494680-0049-2005. Стандарт организации. Конструкции стальные строительные Основные принципы расчета на прочность, устойчивость, усталостную долговечность и сопротивление хрупкому разрушению/
4. Петин С.В., Гучинский Р.В. О расчетах долговечности трубчатых конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2013. №1(36). С. 39-47.
5. Ватин Н.И., Синельников А.С. Большепролетные надземные пешеходные переходы из легкого холодногнутого стального профиля // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. № 1. С. 47-53.
6. Абросимов В.Г. Вопросы усталостного разрушения металлоконструкций двухстворчатых шлюзовых ворот (затворов). Монография. /В.Г. Абросимов// М.: Издательство "Альтаир" МГАВТ, 2004. 109 с.
7. Павлов П.А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность. Л.: Машиностроение, 1988. 252 с.
8. Computation and experimental investigation of the fatigue strength of a material in the plane stress state with allowance for stress concentration / Pavlov P.A., Borovkov A.I., Melnikov B.E., Mochalov M.A.// Strength of Materials. 1992. Т. 24. № 1. С.1-5.
9. Трощенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. Киев: Наукова Думка, 1981. 344 с.
10. Трощенко В. Г. Усталость металлов при неоднородном напряженном состоянии. Сообщ. 1. Методы оценки напряженного состояния и результаты исследования // Пробл. Прочности, 2010. № 2. С.5-24.
11. Noda N. A., Takase Y. Stress concentration formula useful for all notch shape in a round bar (comparison between torsion, tension, and bending) // Ibid. 2006. 28, No.2. Pp.151-163.
12. Ye D., Matsuoka S., Suzuki N., and Naeda Y. Farther investigation of Neuber's rule and the equivalent strain energy density [ESED] method // Int. J. Fatigue. 2004. 26, No. 5. Pp.447-455.
13. Ciavarella M. and Meneghetti G. On fatigue limit in the presence of notches: classical vs. recent unified formulations // Int. J. Fatigue. 2004. 26, No. 3. Pp. 284-298.
14. Atzori B., Lazzarin P., and Meneghetti G. Fracture mechanics and notch sensitivity // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. 2003. 26, No. 7. Pp. 257-267.
15. Neuber H. Theory of stress concentration for shear-strained prismatic bodies whin arbitrary nonlimar stress-strain low 11 J. Appl. Mech. (Trans. ASME). 1961. 28. Pp. 544-549.
16. Naik R. A., Banning D. B., Nicholas G. et. al.. A critical plane gradient approach for the prediction of notched HCF life 11 Int. J. Fatigue. 2005. 27. Pp. 481-492.
17. Волков И. А., Коротких Ю.Г., Тарасов И. С. и др. Численный анализ усталостной долговечности полосы с отверстием при малоцикловом нагружении. Прикладная механика и технологии машиностроения. Сборник научных трудов. Н. Новгород: Изд-во общества «Интелсервис», 2010. № 2(17). С. 218-229.
18. Pavlov P.A., Getsov L.B., Krasnov E.G. Use of strain criterion for a computational evaluation of the failure conditions of materials under a cyclic load in a complex stressed state // Strength of Materials. Vol. 21, Issue 3. Pp. 275-278.
19. Гецов Л.Б., Рыбников А.И., Семенов А.С. Сопротивление термической усталости жаропрочных сплавов // Теплоэнергетика. 2009. № 5. С. 51-58.
20. Getsov L., Semenov A., Staroselsky A. A failure criterion for single-crystal superalloys during thermocyclic loading // Materials in Tehnologije. 2008. Т. 42. № 1. С. 3-12.
21. Семенов А.С., Носиков А.И., Мельников Б.Е. Описание роста усталостной макротрещины на основе концепции нелокальных континуальных повреждений//Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2002, №3. С. 179.

22. Трощенко В.Т. Покровский В.В. Прокопенко А.В. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении. Киев: Наукова Думка, 1987. 256 с.
23. Peterson R.E., Application of Stress Concentration Factors in Design //Proceedings of the Society for Experimental Stress 1943. Vol. 1. Pp. 120-129.
24. Peterson R. E. Stress Concentration Factors. - New York: Wiley, 2008. 560 p.
25. Доннел, Порди. Усталостная прочность деталей с трещинами Конструирование и технология машиностроения. 1964. Т 2. С .147-159.
26. Фомичев П.А., Полак Я. Методика расчета долговечности образцов с концентратором напряжений. Сообщ. 3 Пробл, прочности. 1989. С. 100-103.
27. Павлов П.А., Боровков А.И., Мельников Б.Е., Мочалов М.А. Расчет и экспериментальное исследование сопротивления усталости материалов при плоском напряженном состоянии с учетом концентрации напряжений // Проблемы прочности. 1992, N1. С. 3-7.
28. Мельников Б.Е., Семенов А.С., Семенов С.Г. Многомодельный анализ упругопластического деформирования материалов и конструкций. Современное состояние // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. 2010. № 53. С. 85-92.
29. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени. Машиностроение, 1977. 232 с.
30. Goodman J. Mechanics Applied to Engineering. London: Longmans, 1914. 880 p.
31. Шерстнев В.А. Сопутствующий изгиб как ошибка в опытах на осесимметричное нагружение. // Проблемы прочности. 1989. №3. С.115-118.
32. Шерстнев В.А. О двух методологических принципах в механике конструкционных материалов. // Труды СПбГПУ, N502. 2007. С. 53-61.

## Calculation estimate of damage for metal construction elements with stress concentrators during high-cycle fatigue

V.S. Evgrafov<sup>1</sup>, I.K. Tsendin<sup>2</sup>, B.E. Melnikov<sup>3</sup>, V.A. Sherstnev<sup>4</sup>, M.A. Mochalov<sup>5</sup>

Saint-Petersburg State Polytechnical University, 29 Polytechnicheskaya st., St.Petersburg, 195251, Russia.

### ARTICLE INFO

### Article history

### Keywords

Original research article

Received 11 February 2014  
Received in revised form 20 April 2014  
Accepted 30 April 2014

low-cycle fatigue;  
high-cycle;  
building metal structural materials;  
stress concentrators;  
strain gradients;  
stress gradients;  
plastic strain;  
durability;

### ABSTRACT

This article is about the one of the main questions of ensuring the fatigue strength of steel elements. Questions of this kind are extremely important and usually considered at the designing calculations stage. Modified  $\delta$  - damage assessment model is based on energy criteria using experimental data on laboratory samples with different types of concentrators. Results are based on the maximum stress gradients values in the concentrator areas.

<sup>1</sup> Corresponding author:

+7 (905) 213 8283, evgrafov-vs@yandex.ru (Vitaly Sergeevich Evgrafov, Assistant)

<sup>2</sup> +7 (812) 535 0785, tsendin@yandex.ru (Ilya Konstantinovich Tsendin, Assistant)

<sup>3</sup> +7 (812) 552 6303, kafedra@ksm.spbstu.ru (Boris Evgenjevich Melnikov, D.Sc., Professor, Head of Department "Strength of Materials")

<sup>4</sup> +7 (911) 944 2425, sherval1@yandex.ru (Vladimir Alekseevich Sherstnev, Ph.D., Professor)

<sup>5</sup> +7 (812) 535 0785, mochalov@santi.ru (Mikhail Alekseevich Mochalov, Senior lecturer)

## References

1. Zemlyanskiy A.A., Vertynskiy O.S. Experience of localization of faults and cracks in large size tank beds for carbone storage // Magazine of Civil Engineering. 2011. №7(25). Pp. 40-44. (rus)
2. Petinov S.V., Melnikov B.E. Effect of Prestrain on Fatigue Crack Growth in Low-carbon Steel // Magazine of Civil Engineering. 2011. №3(21). Pp. 71-74.
3. STO 02494680-0049-2005. Standart organizatsii. Konstruktsii stalnyye stroitelnyye Osnovnyye printsipy rascheta na prochnost, ustoychivost, ustalostnuyu dolgovechnost i soprotivleniye khrupkomu razrusheniyu [STO 02494680-0049-2005. Standard organization. Steel building construction is based on basic principles of strength, stability, fatigue life and resistance to brittle fracture]
4. Petinov S.V., Guchinsky R.V. Fatigue assessment of tubular structures // Magazine of Civil Engineering. 2013. №1(36). Pp. 39-47. (rus)
5. Vatin N.I., Sinelnikov A.S. Long span footway bridges: cold formed steel cross-section // Construction of Unique Buildings and Structures. 2012. № 1. Pp. 47-53. (rus)
6. Abrosimov V.G. Voprosy ustalostnogo razrusheniya metallokonstruktsiy dvukhstvorchatykh shlyuzovykh vorot (zatvorov). Monografiya. /V.G. Abrosimov// M.: Izdatelstvo "Altair" MGAVT, [Questions of metal fatigue fracture Bivalve sluice gates (gates). monograph] 2004. 109 p. (rus)
7. Pavlov P.A. Osnovy inzhenernykh raschetov elementov mashin na usta-lost i dlitelnyuyu prochnost. L.: Mashinostroyeniye, [Fundamentals of engineering calculations of machine elements of fatigue and long durability] 1988. 252 p. (rus)
8. Computation and experimental investigation of the fatigue strength of a material in the plane stress state with allowance for stress concentration / Pavlov P.A., Borovkov A.I., Melnikov B.E., Mochalov M.A.// Strength of Materials. 1992. T. 24. № 1. Pp.1-5.
9. Troshchenko V.T. Deformirovaniye i razrusheniye metallov pri mnogotsiklovom nagruzhenii. Kiyev: Naukova Dumka, [Deformation and fracture of metals at multicyclic loading] 1981. 344 p. (rus)
10. Troshchenko V. G. Ustalost metallov pri neodnorodnom napryazhenom sostoyanii. Soobshch. 1. Metody otsenki napryazhennogo sostoyaniya i rezultaty issledovaniya // Probl. Prochnosti, [Fatigue of metals at a nonuniform state of stress. Posts. 1. Stress estimation methods and results of research] 2010. № 2. Pp.5-24.
11. Noda N. A., Takase Y. Stress concentration formula useful for all notch shape in a round bar (comparison between torsion, tension, and bending) // Ibid. 2006. 28, No.2. Pp.151-163.
12. Ye D., Matsuoka S., Suzuki N., and Naeda Y. Farther investigation of Neuber's rule and the equivalent strain energy density [ESED] method // Int. J. Fatigue. 2004. 26, No. 5. Pp.447-455.
13. Ciavarella M. and Meneghetti G. On fatigue limit in the presence of notches: classical vs. recent unified formulations // Int. J. Fatigue. 2004. 26, No. 3. Pp. 284-298.
14. Atzori B., Lazzarin P., and Meneghetti G. Fracture mechanics and notch sensitivity // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. 2003. 26, No. 7. Pp. 257-267.
15. Neuber H. Theory of stress concentration for shear-strained prismatic bodies whin arbitrary nonliniar stress-strain low 11 J. Appl. Mech. (Trans. ASME). 1961. 28. Pp. 544-549.
16. Naik R. A., Banning D. B., Nicholas G., and Kalemeyer A. R. A critical plane gradient approach for the prediction of notched HCF life 11 Int. J. Fatigue. 2005. 27. Pp. 481-492.
17. Volkov I. A., Korotkikh Yu.G., Tarasov I. S. et. al. Chislennyy analiz ustalostnoy dolgovechnosti polosy s otverstiyem pri malotsiklovom nagruzhenii. Prikladnaya mekhanika i tekhnologii mashinostroyeniya. Sbornik nauchnykh trudov / pod red. V.I. Yerofeyeva, S.I. Smirnova i G.K. Sorokina. N. Novgorod: Izd-vo obshchestva «Intelservis», [Numerical analysis of the fatigue life of the strip with a hole in low-cycle loading. Applied Mechanics and Mechanical Engineering Technology.] 2010. № 2(17). Pp. 218-229. (rus)
18. Pavlov P.A., Getsov L.B., Krasnov E.G. Use of strain criterion for a computational evaluation of the failure conditions of materials under a cyclic load in a complex stressed state // Strength of Materials. Vol. 21, Issue 3. Pp. 275-278.
19. Getsov L.B., Rybnikov A.I., Semenov A.S. Thermal fatigue strength of heat-resistant alloys // Thermal Engineering. 2009. Vol. 56. № 5. Pp. 412-420.
20. Getsov L., Semenov A., Staroselsky A. A failure criterion for single-crystal superalloys during thermocyclic loading // Materiali in Tehnologije. 2008. T. 42. № 1. Pp. 3-12.

21. Semenov A.S., Nosikov A.I., Melnikov B.Ye. *Opisaniye rosta ustalostnoy makrotreshchiny na osnove kontseptsii nelokalnykh kontinualnykh povrezhdeniy* [Description of fatigue crack growth based on the concept of nonlocal continuum damage] // *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2002, №3. 179 p. (rus)
22. Troshchenko V.T. Pokrovskiy V.V. Prokopenko A.V. *Treshchinostoykost metallov pri tsiklicheskom nagruzhении* [Crack resistance of metals under cyclic loading] *Kiyev: Naukova Dumka*, 1987. 256 p. (rus)
23. Peterson R.E., *Application of Stress Concentration Factors in Design* // *Proceedings of the Society for Experimental Stress*. 1943. Vol. 1. Pp. 120-129.
24. Peterson R. E. *Stress Concentration Factors*. - New York: Wiley, 2008. 560 p.
25. Donnel Pordi. *Ustalostnaya prochnost detaley s treshchinami Konstruirovaniye i tekhnologiya mashinostroyeniya*. [Fatigue strength of parts with cracks and Construction Engineering Technology] 1964. Vol. 2. Pp.147-159. (rus)
26. Fomichev P.A., Polak Ya. *Metodika rascheta dolgovechnosti obraztsov s kontsentratorom napryazheniy. Soobshch. 3 Probl, prochnosti*. [Methods of calculating longevity specimens with a stress concentrator] 1989. Pp. 100-103. (rus)
27. Pavlov P.A., Borovkov A.I., Melnikov B.Ye. et. al. *Raschet i eksperimentalnoye issledovaniye soprotivleniya ustalosti materialov pri ploskom napryazhennom sostoyanii s uchetom kontsentratsii napryazheniy* [Calculation and experimental study of the fatigue resistance of materials under plane stress state with the concentration of stress] // *Problemy prochnosti*. 1992. №1. Pp. 3-7. (rus)
28. Melnikov B.Ye., Semenov A.S., Semenov S.G. *Mnogomodelnyy analiz uprugoplasticheskogo deformirovaniya materialov i konstruktsiy. Sovremennoye sostoyaniye* // *Trudy TsNII im. akad. A. N. Krylova*. [The multi-model analysis of elastic-plastic deformation of materials and designs. Current state] 2010. № 53. Pp. 85-92. (rus)
29. Kogayev V.P. *Raschety na prochnost pri napryazheniyakh peremennykh vo vremeni. Mashinostroyeniye*, [Strength calculations for voltages variables over time. Mechanical Engineering] 1977. 232 p. (rus)
30. Goodman J, *Mechanics Applied to Engineering*. London: Longmans, 1899.
31. Sherstnev V.A. *Soputstvuyushchiy izgib kak oshibka v opytakh na osesimmetrichnoye nagruzheniye* [Related bending as an error in experiments on axisymmetric loading] // *Problemy prochnosti*. 1989. №3. Pp.115-118. (rus)
32. Sherstnev V.A. *O dvukh metodologicheskikh printsipakh v mekhanike konstruktsionnykh materialov* [Two methodological principles in mechanics of structural materials] // *Trudy SPbGPU*, №502. 2007. Pp. 53-61.