

12

Вячеслав Драган
Брестский инженерно-
строительный институт

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Оценка предельного состояния конструктивных элементов с концентраторами напряжений при циклическом нагружении является одной из наиболее сложных и важных задач в проблеме усталости конструкций. Эта задача в литературе исследуется на основе различных подходов, обзор которых дан в работах [1-3]. Во многих исследованиях основное внимание уделяется гипотезам, объясняющим разницу между теоретическим коэффициентом концентрации напряжений K_t и его эффективным значением K_e , и предлагаются выражения для вычисления K_e по значениям K_t [4-7]. Недостатком этих теорий является то, что не учитываются стадии зарождения и развития усталостных трещин, а это накладывает целый ряд ограничений на предлагаемые критерии.

В настоящей работе на основе общих закономерностей зарождения и развития усталостных трещин исследуется взаимосвязь между характеристиками сопротивления усталостному разрушению гладких и надрезанных образцов и рассматривается методика расчёта кривых усталости образцов с концентраторами напряжений по данным испытания гладких образцов.

Исследование закономерностей усталостного разрушения гладких и надрезанных образцов проводили при растяжении-сжатии и кручении на цилиндрических трубчатых образцах с диаметром рабочей части 14 мм и толщиной стенки 1 мм. Использование таких образцов позволило выполнить угловые однородности напряженного состояния при кручении, а также устранить влияние на закономерности усталостного разрушения геометрии образца и технологии его изготовления. Испытывали стали 45, 40Х, 12ХНЗА, испытания проводили в мягком режиме нагружения. Зарождение и развитие усталостных трещин исследовали при помощи оптического

микроскопа с использованием стробоскопического освещения.

Концентратором напряжений служило круглое отверстие диаметром 1,3 мм, просверленное в стенке образца. Теоретический коэффициент концентрации нормальных напряжений при растяжении-сжатии $K_\sigma = 3$, при кручении - $K_\tau = 4$. Напряженное состояние в зоне концентратора в точках, где действуют максимальные нормальные напряжения, линейное как при растяжении-сжатии, так и при кручении, поэтому условия зарождения трещин по краю отверстия подобны условиям зарождения трещин при растяжении-сжатии гладкого образца.

На рис. 1 представлены экспериментально полученные кривые усталости гладких и надрезанных образцов, из которых видно влияние концентрации напряжений на характеристики сопротивления усталости стали 45 в пределах $5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^6$ циклов до разрушения.

На рис. 2 приведены зависимости изменения эффективных коэффициентов концентрации напряжений от числа циклов до зарождения трещин при растяжении-сжатии и кручении. Эффективный коэффициент концентрации напряжений рассчитывали по формуле

$$K_\sigma = \frac{\sigma_a}{\sigma_{на}} \quad (1)$$

где: σ_a , $\sigma_{на}$ - напряжения при растяжении-сжатии гладких образцов и номинальные напряжения при растяжении-сжатии или кручении образцов с концентраторами напряжений при одинаковых числах циклов до зарождения трещин размером 0,1 мм. Для определения эффективных коэффициентов концентрации напряжений при кручении для данного концентратора брали отношение нормальных напряжений при растяжении-сжатии гладких образцов к номинальным нормальным напряжениям при кручении образцов с концентраторами напряжений при одинаковых числах циклов до зарождения трещин размером 0,1 мм.

Номинальные нормальные напряжения при кручении для трубчатых образцов определяем по выражению

$$\sigma_{на} = \tau_{на} = \frac{M_{кр}}{2R R_{ср} l} \quad (2)$$

где: $R_{ср}$ - средний радиус сечения; l - толщина стенки образца; $M_{кр}$ - крутящий момент.

Из рис. 2 видно, что эффективный коэффициент концентрации напряжений K_σ изменяет своё значение в исследуемом диапазоне

чисел циклов нагружения. С увеличением чисел циклов до зарождения трещин K_G монотонно возрастает как при кручении, так и при растяжении-сжатии. Кроме того, наблюдается существенное отличие в характере изменения этих коэффициентов при различных значениях α_G , т.е. при кручении K_G возрастает быстрее с увеличением N_T , чем при растяжении-сжатии.

Анализ этих зависимостей показал, что эффективный коэффициент концентрации напряжений зависит от степени циклической перегрузки, выраженной отношением напряжений для образцов с концентраторами напряжений при данном числе циклов до зарождения трещин $\sigma_{на}$ к напряжениям на уровне предела выносливости $\sigma_{н-1}$:

$$K_G = K'_G \left(\frac{\sigma_{на}}{\sigma_{н-1}} \right)^n, \quad (3)$$

где: $K_G = \sigma_{н-1} / \sigma_{на}$ — эффективный коэффициент концентрации напряжений на уровне предела выносливости; n — постоянная для данного концентратора, не зависящая от материала, в исследуемом случае $n \approx 0,67$.

Подставив в уравнение (3) выражения K_G , K'_G и преобразовав его, запишем:

$$\frac{\sigma_{на}}{\sigma_{н-1}} = \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{н-1}} \right)^{\frac{1}{n+1}}. \quad (4)$$

Полученное выражение устанавливает связь между напряжениями для гладкого образца и образца с концентраторами напряжений при одинаковых числах циклов до зарождения трещин и позволяет рассчитать кривую усталости образцов с концентраторами напряжений по данным испытания гладких образцов, если известен предел выносливости надрезанного образца.

На уровне предела выносливости в зоне концентратора напряжений наблюдали образование неразвивающихся трещин. Так, например, для стали 45 были обнаружены неразвивающиеся трещины, максимальный размер которых достигал 0,042 мм. Условие их нераспространения может определяться тем, что коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) для этих трещин K_I меньше порогового значения КИН K_{Ith} :

$$K_I \leq K_{Ith} \quad (5)$$

Размер неразвивающихся трещин на поверхности гладких образцов на уровне предела выносливости при растяжении может быть определен по выражению:

$$l_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{Ith}}{l_0} \right)^2 \quad (6)$$

Так как напряженное состояние на поверхности концентратора линейное как при растяжении-сжатии так и при кручении, то и размеры неразвивающихся трещин на поверхности гладкого образца при растяжении-сжатии и в зоне концентратора напряжений на уровне пределов выносливости должны быть одинаковыми. Наблюдения за поверхностными трещинами подтвердили это предположение [8].

Поскольку перераспределение напряжений в зоне концентратора вследствие циклических пластических деформаций на уровне предела выносливости незначительно, местные напряжения будут равны $\alpha_c \cdot \sigma_{H-1}$

С учетом сказанного, условие нераспространения микротрещин на уровне предела выносливости в зоне концентрации напряжений может быть записано следующим образом:

$$K_{Ith} \leq Y \alpha_c \sigma_{H-1} \sqrt{\pi l_0} \quad (7)$$

Методом К-тарировки по скорости роста трещин в зоне концентратора напряжений установлено, что геометрический параметр $Y \approx 0,65$. Тогда предел выносливости образцов с концентраторами напряжений может быть определен по выражению

$$\sigma_{H-1} = \frac{K_{Ith}}{Y \alpha_c \sqrt{\pi l_0}}, \quad (8)$$

где: K_{Ith} - пороговое значение КИН, полученное для больших трещин по стандартной методике.

Был произведён расчет пределов выносливости образцов с концентраторами напряжений по формуле (8), результаты которого приведены в таблице 2. Видно, что расчетные и экспериментальные значения хорошо согласуются. Погрешность для исследуемых сталей при кручении и растяжении-сжатии не превышает 31%.

Полученные уравнения (4) и (8) позволяют рассчитать кривую многоциклового усталости образцов с концентраторами напряжений по моменту зарождения трещин по данным испытания гладких образцов и значению порогового КИН для макротрещин.

На рис. 4 приведена схема построения расчетных кривых усталости надрезанных образцов. Исходными данными для построения этой кривой являются кривая усталости гладких образцов при растяжении-сжатии, значение порогового КИН исследуемого мате-

риала, теоретический коэффициент концентрации напряжений. Расчет следует начинать с определения предела выносливости надрезанного образца по формуле (8). Затем рассчитывается наклонный участок кривой усталости. С этой целью для произвольного числа циклов до зарождения трещин N_T по кривой усталости гладкого образца находим напряжение σ_a и по формуле (4) определяем номинальное напряжение для образца с концентратором напряжений $\sigma_{на}$, соответствующее принятому числу циклов. Аналогично определяем положение второй точки на наклонном участке этой кривой. По полученным точкам строим расчетную кривую усталости для образцов с концентраторами напряжений, соответствующее моменту зарождения трещины в зоне концентратора напряжений.

Таблица 2

Данные расчета пределов выносливости образцов с концентраторами напряжений

Марка стали	$K_{1,th}$ МПа \sqrt{m}	Растяжение-сжатие			Кручение		
		$\sigma_{н-1, экв}$	$\sigma_{н-1, расч}$	$\Delta \sigma_{н-1}$	$\sigma_{н-1, экв}$	$\sigma_{н-1, расч}$	$\Delta \sigma_{н-1}$
		МПа	МПа	%	МПа	МПа	%
45	5,8	115	112	3	90	84	7
12ХНЗА	3,0	173	202	17	125	151	21
40Х	3,7	170	218	28	125	164	31

На рис. 1 сравниваются расчетные и экспериментальные кривые усталости для надрезанных образцов при растяжении-сжатии и кручении. Видно, что применение описанной методики позволяет достаточно воспроизвести кривую усталости образцов с концентраторами напряжений по данным испытания гладких образцов и пороговому значению K_{1H} .

Выводы.

1. Установлена взаимосвязь между напряжениями для гладких образцов при растяжении-сжатии и образцов с концентраторами напряжений в виде круглых отверстий при растяжении-сжатии или кручении, которая показала хорошее соответствие экспериментальным данным.

2. Получено выражение, позволяющее рассчитать пределы выно-

сливности образцов с концентраторами напряжений по известным значениям порогового коэффициента интенсивности напряжений, теоретического коэффициента концентрации напряжений и величине σ_0 .

3. На основании полученных зависимостей предложена методика расчета кривых усталости надрезанных образцов при кручении и растяжении-сжатии, соответствующих образованию магистральной усталостной трещины, по данным испытания гладких образцов при растяжении-сжатии и значению порогового коэффициента интенсивности напряжений для материала.

Литература

1. Одинг И.Л. Допустимые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. - М.: Машгиз, 1962. - 260 с.
2. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний. - М.: Металлургия, 1978. - 302 с.
3. Траценко В.Т. Прочность металлов при переменных нагрузках. Киев.: Наук.думка., 1978. - 174 с.
4. Нейбер Г. Концентрация напряжений. - М.: Гостехиздат, 1947. 202 с.
5. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений: графики, формулы для расчета конструктивных элементов на прочность. М.: Мир, 1977. - 302 с.
6. Афанасьев Н.Н. Статистическая теория усталостной прочности материалов. - Киев: Изд-во АН УССР, 1953. - 105 с.
7. Neuber H. *Theory of stress concentration for shear-strained prismatical bodies with arbitrary nonlinear strain law* // *J. Appl. Mech. Trans. ASME* - 1961 - Dec. - p. 544-550
8. Троценко В.Т., Драган В.И. Зарождение и развитие усталостных трещин в конструкционных сталях // *Proc. of the 7th collog. on mech. fatigue of metals, Miskolc, 6-10 Sept. 1983. - Miskolc, 1983. - P. 211-224 - (Publ. of the techn university for heavy industry. Ser. c, Vol. 39, pt.1)*

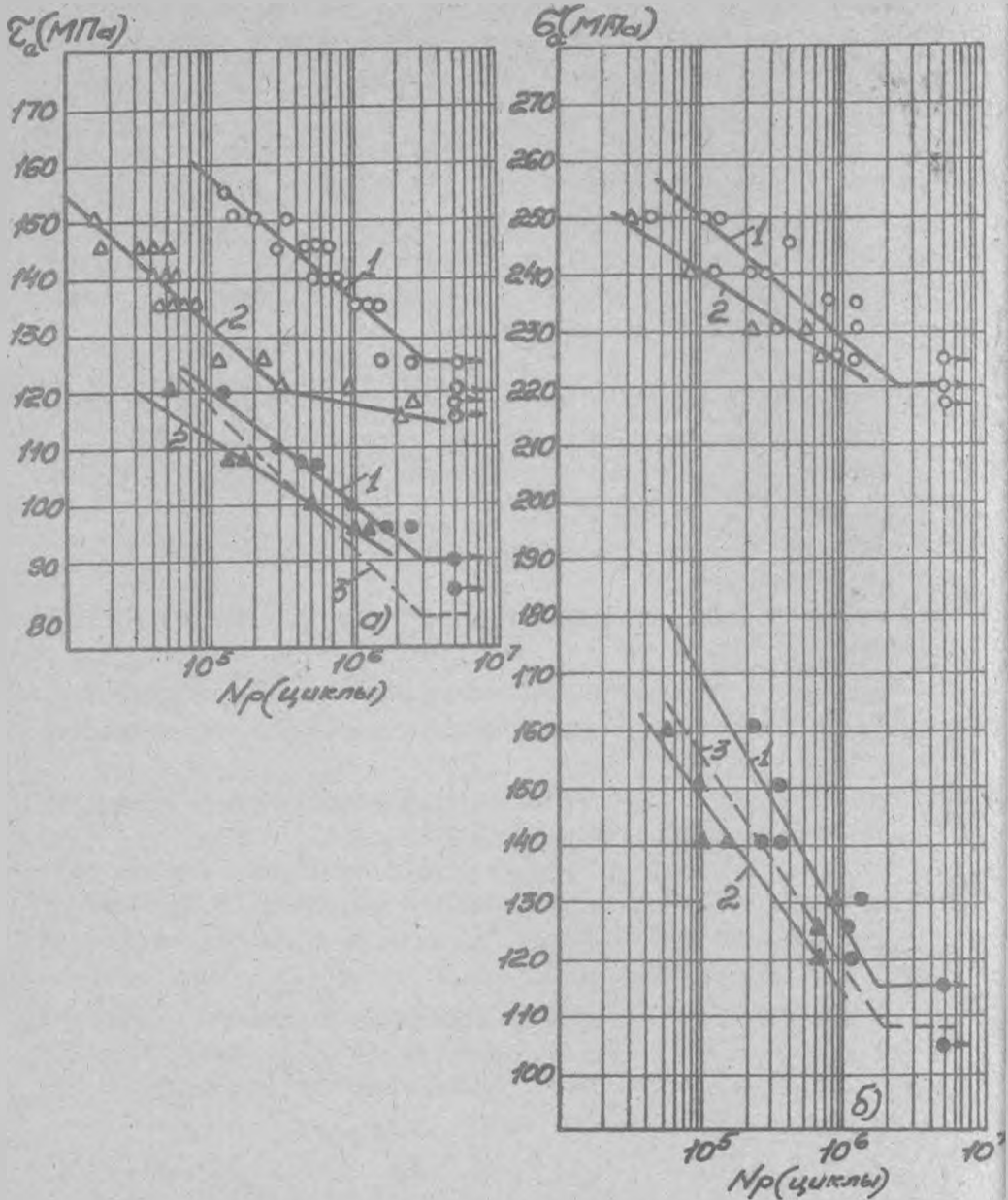


Рис. I. Кривые усталости стали 45 при кручении (а) и растяжении-сжатии (б) для гладких образцов (светлые точки) и образцов с концентраторами напряжений (тёмные точки): 1 - по окончательному разрушению образцов; 2 - по моменту образования усталостной трещины.

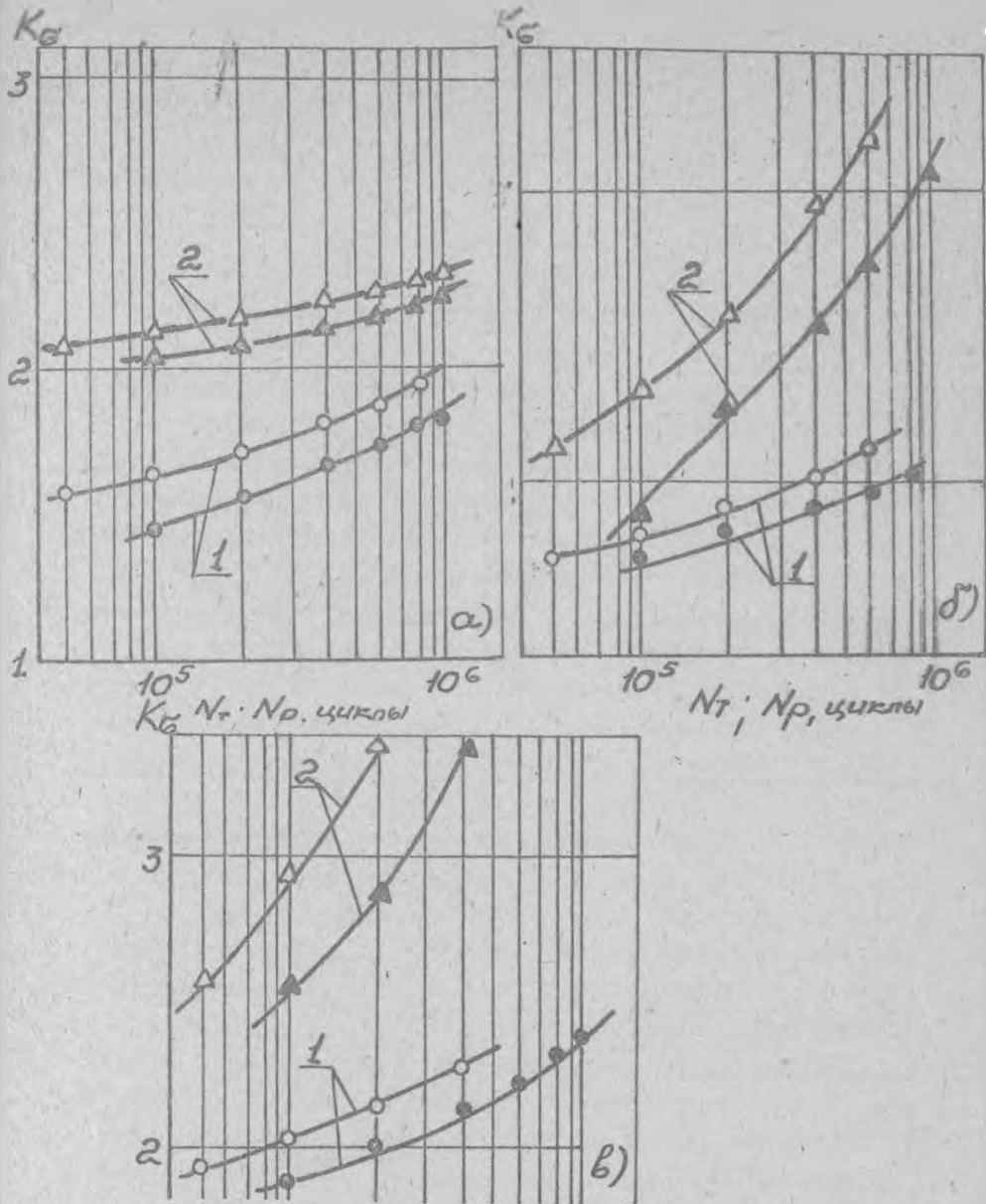


Рис. 2. Изменение эффективных коэффициентов концентрации напряжений от числа циклов до зарождения трещин (светлые точки) или до разрушения образцов (темные точки) при растяжении (1) и кручении (2): а)-сталь 45, б)-сталь 12ХН3А, в)-сталь 40Х.

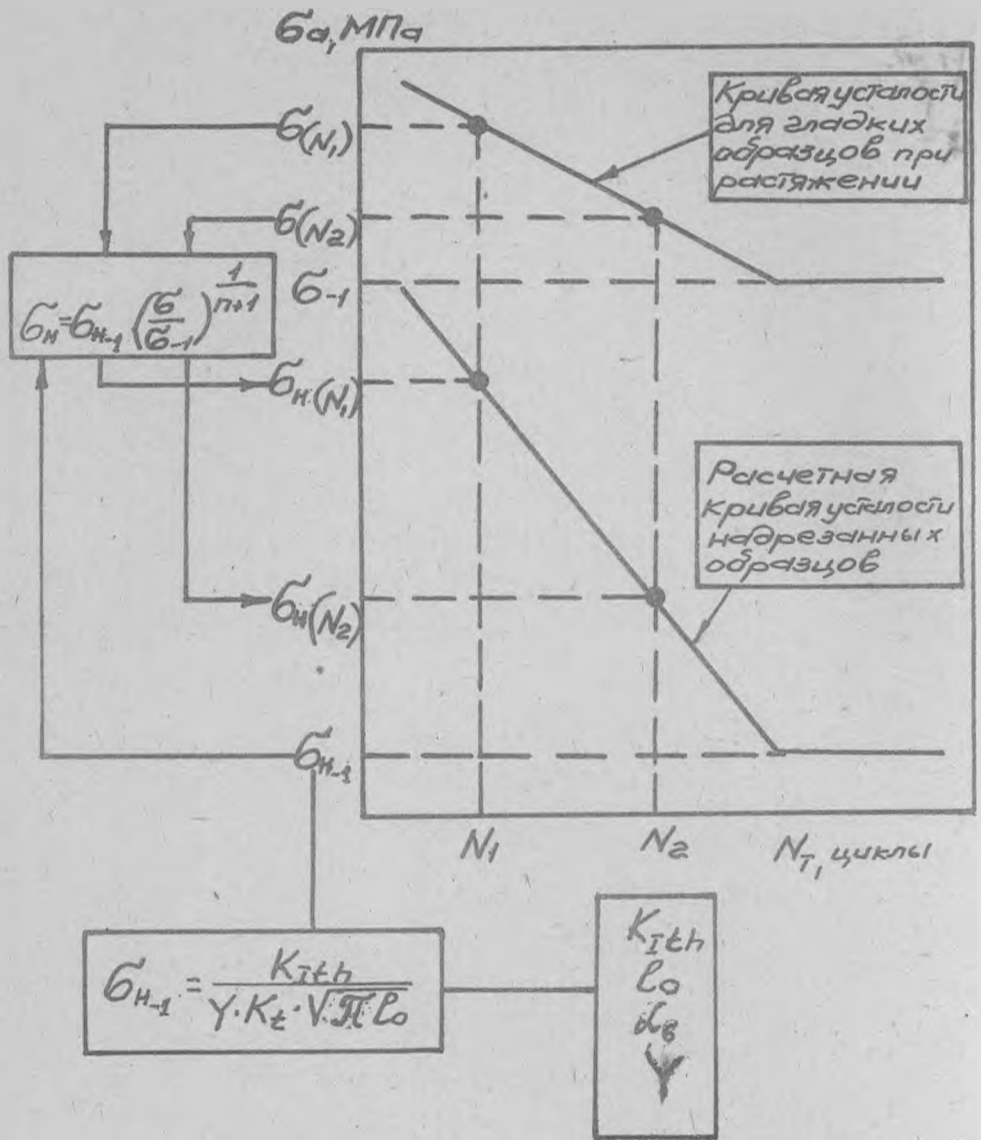


Рис. 3. Схема расчета кривых усталости надрезанных образцов.