

## Оценка влияния концентрации напряжений на сопротивление усталости конструкционных материалов при асимметричном нагружении

А. Д. Погребняк, М. Н. Регульский, А. В. Желдубовский

Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины, Киев, Украина

*Выполнена расчетно-экспериментальная оценка чувствительности конструкционных материалов к концентрации напряжений в условиях многоциклового асимметричного нагружения растяжением–сжатием, изгибом и кручением. При решении используется предложенная модель предельного состояния. Получено удовлетворительное согласование результатов расчета с экспериментальными данными.*

**Ключевые слова:** сопротивление усталости, асимметричное многоцикловое нагружение, модель предельного состояния, концентрация напряжений, конструкционные материалы.

**Введение.** Создание современных машиностроительных конструкций, обеспечение их надежности и ресурса на стадии проектирования неразрывно связано с разработкой новых материалов, всесторонним исследованием механических свойств, совершенствованием методов расчета на прочность.

Использование конструкционных материалов в изделиях предусматривает исследование механических свойств с учетом влияния различного рода факторов, в той или иной степени формирующих их работоспособность в конкретных условиях эксплуатации.

Анализируя факторы, влияющие на несущую способность и долговечность конструкций, выделим их конструктивные особенности, такие как надрезы, отверстия, резкие изменения геометрической формы, что неизбежно приводит к усложнению напряженного состояния. Концентрация напряжений в этом случае оказывает существенное влияние на сопротивление материалов циклическим нагрузкам, которые возникают при эксплуатации многих машиностроительных конструкций, особенно транспортного назначения.

Чувствительность конструкционных материалов к концентрации напряжений определяется, прежде всего, их свойствами, теоретическим коэффициентом концентрации напряжений  $\alpha_\sigma$ , размером исследуемых объектов, условиями нагружения.

Степень влияния концентрации напряжений на сопротивление усталости принято оценивать по эффективному коэффициенту концентрации напряжений  $K_\sigma$ , представляющему собой отношение предела выносливости  $\sigma_{-1}$  гладких образцов к пределу выносливости  $\sigma_{-1H}$  образцов с концентратором напряжений, либо по коэффициенту чувствительности к концентрации напряжений  $q = (K_\sigma - 1)/(\alpha_\sigma - 1)$ .

Результаты многочисленных экспериментальных исследований, обобщенные в фундаментальных монографиях и справочной литературе [1–8 и др.], свидетельствуют о том, что чувствительность к концентрации напряжений

при симметричном цикле нагружения углеродистых сталей, чугунов, сплавов легких металлов с увеличением предела прочности повышается.

К сожалению, в меньшей степени исследована чувствительность к концентрации напряжений конструкционных материалов в условиях асимметричного нагружения. В работе [1] по результатам ограниченной экспериментальной информации оценено влияние концентрации напряжений на сопротивление усталости при асимметричном растяжении–сжатии, изгибе и кручении.

При растяжении–сжатии испытывали образцы диаметром 16 мм с надрезом глубиной  $t = 0,5$  мм, радиусом  $\rho = 0,1$  мм при угле  $\omega = 60^\circ$  из углеродистых сталей с пределом прочности  $\sigma_B = 778,9$  и  $754,4$  МПа.

При изгибе испытывали плоские образцы размером  $10 \times 10$  мм с надрезом ( $t = 0,02$  мм,  $\rho = 0,05$  мм,  $\omega = 60^\circ$ ) из хромоникелевой стали ( $\sigma_B = 1177,2$  МПа).

Испытания на кручение проводили на цилиндрических образцах диаметром 12 мм (в глубине надреза) из хромоникелевой стали при параметрах надреза:  $t = 0,2$  мм;  $\rho = 0,05$  мм;  $\omega = 60^\circ$ .

Влияние надреза оценивали по отношению пределов выносливости гладких образцов к таковым надрезанных в зависимости от значений  $\operatorname{tg} \alpha = \sigma_{\max} / \sigma_m$  или  $\operatorname{tg} \alpha = \tau_{\max} / \tau_m$ .

Выполненный анализ показал неоднозначность влияния асимметрии цикла нагружения на чувствительность материала к концентратору напряжений.

С ростом статической компоненты цикла нагружения ( $\operatorname{tg} \alpha \rightarrow 1$ ) чувствительность к концентрации напряжений может как снижаться, что получено при асимметричном изгибе, так и увеличиваться при растяжении–сжатии или оставаться примерно на одном уровне для исследованных материалов. Вместе с тем значения эффективного коэффициента концентрации напряжений с увеличением статической компоненты цикла нагружения возрастают практически во всех случаях нагружения.

Детальный анализ влияния концентрации напряжений на сопротивление усталости конструкционных материалов изложен в работах [6–9]. Средние сжимающие напряжения повышают предельную амплитуду при асимметричном нагружении стальных образцов с надрезами, с необработанной поверхностью после литья и образцов, подвергнутых воздействию коррозионных сред. В условиях растягивающей статической нагрузки поведение исследованных надрезанных образцов аналогично поведению гладких образцов: диаграммы предельных амплитуд цикла в этом случае близки к линейной зависимости Гудмана. Такой же результат получен при испытании конструкционных сталей при асимметричном кручении, поэтому зависимость Гудмана может быть рекомендована к использованию в расчетах на прочность. Вместе с тем, по мнению авторов работы [6], она может привести к ненадежному определению пределов выносливости при асимметричном нагружении образцов с концентраторами напряжений из сплавов с высоким отношением предела текучести к пределу прочности при растяжении. В этих материалах разрушение может происходить при напряжениях в вершине концентратора, меньших предела текучести (надрез снижает предельные значения как циклической, так и статической компоненты цикла нагружения).

Сопrotивление усталости разных алюминиевых сплавов при асимметричном нагружении может сильно различаться в зависимости от коэффициента концентрации напряжений и соотношения напряжений в цикле.

В [10] с целью оценки сопротивления усталости в широком диапазоне изменения статической компоненты цикла была предпринята попытка построения диаграммы предельного состояния для образцов с надрезом на основе соответствующей экспериментальной диаграммы для гладких образцов. Сопоставление полученной диаграммы с экспериментальной показало удовлетворительное их согласование. Большеe соответствие между ними получено при использовании предела выносливости при симметричном нагружении надрезанных образцов. Вместе с тем в [6] не рекомендуется использовать эту методику.

Наиболее достоверная информация о влиянии концентрации напряжений на предельное состояние при многоцикловом асимметричном нагружении может быть получена из экспериментальных диаграмм предельных амплитуд цикла, построенных по результатам испытаний образцов с соответствующим концентратором.

Однако из-за трудоемкости подобных исследований предпринимались попытки корректировки известных диаграмм предельных напряжений с целью их уточнения и возможности использования при расчетных оценках влияния концентрации напряжений на сопротивление усталости конструкционных материалов при асимметричном нагружении.

К решению этой задачи авторы подходят с разных позиций [11]. В ряде работ предлагается учитывать влияние концентрации напряжений при асимметричном нагружении путем введения в уравнение диаграммы предельных напряжений эффективного коэффициента концентрации напряжений  $K_\sigma$ :

$$\sigma_a = \frac{1}{K_\sigma} \left( \sigma_{-1} - \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} \sigma_m \right). \quad (1)$$

При этом предполагается, что значение  $K_\sigma$  не зависит от асимметрии нагружения.

В то же время эффект концентрации напряжений может быть отнесен только к циклической составляющей  $\sigma_a$ . Тогда диаграмма предельных амплитуд с учетом концентрации напряжений описывается уравнением

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma} \left( 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_T} \right). \quad (2)$$

Однако и в этом случае полагают, что коэффициент  $K_\sigma$  не зависит от асимметрии нагружения в пределах статической компоненты  $\sigma_m = 0 \dots \sigma_T$ .

В [11] отмечается, что в литературных источниках имеется недостаточно информации по испытаниям гладких и надрезанных образцов при асимметричном нагружении, в связи с чем сформулированные выводы требуют дополнительных исследований. Опубликованные данные свидетельствуют о

том, что эффект концентрации напряжений может существенно изменяться, увеличиваясь с повышением среднего напряжения. В частности, обнаружено понижение прочности материалов при наличии концентраторов напряжений в условиях асимметричного нагружения растяжением–сжатием, т.е. увеличение эффекта концентрации с повышением среднего напряжения цикла. В то же время при воздействии коррозионной среды возможно уменьшение эффекта концентрации напряжений с ростом статической компоненты.

Таким образом, задача по оценке влияния концентрации напряжений на сопротивление усталости при асимметричном нагружении требует дальнейших исследований с целью обеспечения необходимой точности прочностных расчетов деталей машин. Существующие подходы к ее решению с использованием экспериментальных методов сопряжены, как правило, с большой трудоемкостью исследований, длительными сроками их проведения.

Известные расчетные методы, к сожалению, не обеспечивают необходимой точности из-за использования зависимостей, которые не отражают поведение исследованных материалов, адекватное реальному.

Одним из возможных путей решения данной задачи является использование моделей предельного состояния, апробированных при испытаниях гладких образцов конструкционных материалов в условиях растяжения–сжатия, изгиба и кручения [12, 13].

**Модели предельного состояния конструкционных материалов с учетом концентрации напряжений.** Рассмотрим предельное состояние образцов стали с концентратором напряжений, подверженных асимметричному нагружению растяжением–сжатием. Концентратор напряжений чаще всего выполняется в виде кругового надреза, геометрия которого характеризуется следующими параметрами: диаметр образца в надрезе, глубина, радиус и угол раскрытия (обычно принимается  $60^\circ$ ). Теоретический коэффициент концентрации напряжений  $\alpha_\sigma$  рассчитывается в соответствии с данной геометрией надреза.

Номинальные напряжения в образце, подверженном многоцикловому асимметричному нагружению, определяются зависимостью

$$\sigma_{\text{ном}} = f(\sigma_a; \sigma_m; C_i), \quad (3)$$

где  $\sigma_a$ ,  $\sigma_m$  – циклическая и статическая составляющие цикла нагружения;  $C_i$  – материальная константа.

При формулировке и апробации моделей предельного состояния гладких образцов конструкционных материалов последние условно подразделялись на хрупкие и пластичные, что и определяло выбор модели для последующих расчетов.

Исследуемые в настоящей работе стали и алюминиевые сплавы имеют относительно невысокую пластичность при растяжении  $\delta_p$  (в пределах 15%). В связи с этим при выполнении расчетов использовалась модель предельного состояния, сформулированная на основе функции  $\arccos$ .

В этом случае предельное состояние гладких образцов в условиях асимметричного растяжения–сжатия описывается моделью вида

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_n} = \frac{2}{\pi} \left[ \arccos \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^\xi \right]. \quad (4)$$

Для образцов с концентратором напряжений соответствующее выражение запишем так:

$$\frac{\sigma_{ан}}{\sigma_{нн}} = \frac{2}{\pi} \left[ \arccos \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^\xi \right], \quad (5)$$

где  $\sigma_{ан}$ ,  $\sigma_{нн}$  – амплитуда и предел ограниченной выносливости образцов с концентратором,  $\sigma_{нн}$  определяется исходя из уравнения кривой усталости

$$n = \frac{1}{C\sigma_n^q}, \quad (6)$$

которое рассчитывается по результатам усталостных испытаний образцов с концентратором напряжений при симметричном цикле нагружения;  $C$  и  $q$  – коэффициенты уравнения кривой усталости.

Как свидетельствуют многочисленные исследования, концентратор напряжений в виде надрезов и отверстий, а также изменения их геометрии незначительно влияют на характеристики кратковременной прочности малопластичных материалов. Поэтому в уравнении (5) используется значение предела прочности  $\sigma_B$ , определенное при испытаниях гладких образцов. В то же время исследования кратковременных характеристик некоторых материалов показывают, что значение предела прочности  $\sigma_B$  образцов с концентратором напряжений может быть выше, чем гладких. Учитывая это, при использовании зависимости (5) предварительно необходимо провести испытания образцов с надрезом и определить их предел прочности  $\sigma_{вн}$ . Геометрия надреза в этом случае должна соответствовать геометрии надреза образцов материала, применительно к которому планируется определить предельное состояние при асимметричном нагружении.

Предварительные исследования позволили установить, что чувствительность к концентрации напряжений зависит от соотношения компонентов асимметричного цикла напряжений. Использование в зависимости (4) показателя степени  $\xi$ , определенного в базовом эксперименте на гладких образцах, безусловно, может привести к серьезным ошибкам в оценке предельного состояния образцов с надрезом. Поэтому коэффициент  $\xi$  для таких образцов определяется по результатам единичного базового эксперимента при отнулевом цикле на образцах с соответствующим концентратором напряжений.

Расчет коэффициента  $\xi$  в случае растяжения–сжатия осуществляется на основе зависимостей:

для гладких образцов –

$$\xi = \frac{\lg(\sigma_a^0/\sigma_n) - \lg(2/\pi)}{\lg[\arccos(\sigma_m^0/\sigma_B)]}, \quad (7)$$

для образцов с концентратором напряжений –

$$\xi = \frac{\lg(\sigma_{ан}^0 / \sigma_{нн}^0) - \lg(2/\pi)}{\lg[\arccos(\sigma_{нн}^0 / \sigma_{вн})]}, \quad (8)$$

где  $\sigma_a^0$ ,  $\sigma_m^0$ ,  $\sigma_{ан}^0$ ,  $\sigma_{нн}^0$  – параметры отнулевого цикла нагружения гладких образцов и образцов с концентратором соответственно;  $\sigma_n$  и  $\sigma_{нн}$  – пределы ограниченной выносливости при симметричном цикле гладких и надрезанных образцов, соответствующие долговечности  $n^0$  при отнулевом цикле;  $\sigma_v$ ,  $\sigma_{вн}$  – пределы прочности гладких и надрезанных образцов.

**Влияние концентрации напряжений на сопротивление усталости и предельное состояние.** Оценка влияния концентрации напряжений на сопротивление усталости конструкционных материалов осуществлялась, как отмечалось выше, с помощью эффективных коэффициентов концентрации напряжений  $K_\sigma$  либо, что реже, через построение диаграмм предельных амплитуд напряжений цикла.

Результаты исследований показывают, что значение  $K_\sigma$  с повышением статической компоненты изменяется, причем в зависимости от свойств исследуемого материала и условий нагружения. Характерно, что концентратор напряжений обуславливает изменение диаграммы предельных амплитуд цикла напряжений, однако именно она дает более полное представление о влиянии концентрации напряжений на сопротивление усталости в условиях асимметричного нагружения в широком диапазоне изменения статической компоненты. В таком случае необходимо проводить исследования с целью адекватного установления влияния концентрации напряжений на сопротивление усталости при асимметричном нагружении. Для этого воспользуемся подходом, который применяется к оценке предельного состояния гладких образцов конструкционных материалов.

*Углеродистые и легированные стали.* С помощью результатов исследований сопротивления усталости конструкционных сталей в условиях асимметричного растяжения–сжатия по разработанной методике построим диаграммы предельных амплитуд цикла напряжений гладких образцов и образцов с концентратором напряжений. При этом использовали результаты испытания углеродистых St37, St52 [1] и легированной Э16 [14] сталей. В табл. 1 приведены пределы кратковременной прочности  $\sigma_v$  и выносливости при симметричном цикле  $\sigma_{-1}$ , параметры отнулевого цикла (амплитуда  $\sigma_a$  и статическая компонента  $\sigma_m$ , используемая при расчете параметров формы диаграмм) при асимметричном растяжении–сжатии. Предел выносливости  $\sigma_n$  и параметры отнулевого цикла относятся к числу циклов  $n^0 = 10^7$ .

Результаты исследования сталей St37 и St52 получены на плоских образцах. Концентратор напряжений представлял собой отверстие диаметром 17 мм, отношение диаметра отверстия  $d$  к ширине образца  $b$  составляло 0,24.

Исследование стали Э16 проводили на гладких цилиндрических образцах диаметром 6,95 мм в рабочей части и образцах с концентратором напряжений диаметром 6,4 мм в рабочей части. Концентратор напряжений пред-

Т а б л и ц а 1

Данные для построения диаграмм предельных амплитуд цикла напряжений и пределы выносливости образцов из стали с концентратором при растяжении–сжатии

Сталь	$\theta$ , °С	$\sigma_{в}$ , МПа	$\sigma_a^0$ , МПа	$\sigma_m^0$ , МПа	$\sigma_n$ , МПа	$n^0$ , цикл	$\xi$	$\sigma_m$ , МПа	$\sigma_{гэ}$ , МПа	$\sigma_{гп}$ , МПа	$\delta$ , %
St37, гладкие образцы	20	362,0	89,3	89,3	125,3	$10^7$	0,59	28,27	113,03	107,42	4,96
								52,43	104,85	99,32	5,27
St37, надрез	20	362,0	62,6	62,6	72,0	$10^7$	0,91	17,06	68,24	69,13	-1,30
								32,70	65,40	66,82	-2,17
St52, гладкие образцы	20	579,8	153,7	153,7	178,1	$10^7$	1,17	42,46	169,84	172,81	-1,75
								83,46	166,92	166,38	0,32
St52, надрез	20	579,8	106,0	106,0	119,6	$10^7$	1,02	28,79	115,18	116,01	-0,72
								56,13	112,25	112,53	-0,25
								294,3	86,30	87,20	-1,03
Э16, гладкие образцы	20	1275,3	441,4	441,4	569,0	$3 \cdot 10^6$	1,00	196,2	529,74	513,03	3,15
								451,3	451,26	441,45	2,17
								686,7	353,16	363,02	-2,79
Э16, надрез	20	1863,9	236,6	236,6	264,7	$3 \cdot 10^6$	0,87	196,2	235,44	280,82	-2,28
								686,7	181,48	191,93	-5,76
								1030,0	166,77	156,90	5,92

ставлял собой круговой надрез радиусом у вершины 0,3 мм, глубиной 0,8 мм при  $\omega = 80^\circ$ , теоретический коэффициент концентрации напряжений  $\alpha_\sigma = 3,0$ .

На рис. 1 представлены расчетные (линии) и экспериментальные (точки) диаграммы предельных амплитуд цикла. Расчет диаграмм для гладких образцов осуществляли по зависимости (4):

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \frac{2}{\pi} \left[ \arccos \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_{в}} \right)^{\xi} \right]. \quad (9)$$

Диаграммы предельных амплитуд цикла для образцов с концентратором напряжений рассчитывали с помощью (5):

$$\sigma_{ан} = \sigma_{-1н} \frac{2}{\pi} \left[ \arccos \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_{вн}} \right)^{\xi} \right]. \quad (10)$$

Коэффициент  $\xi$  для гладких образцов рассчитывали по зависимости (7), для образцов с концентратором напряжений – по (8) и значениям параметров



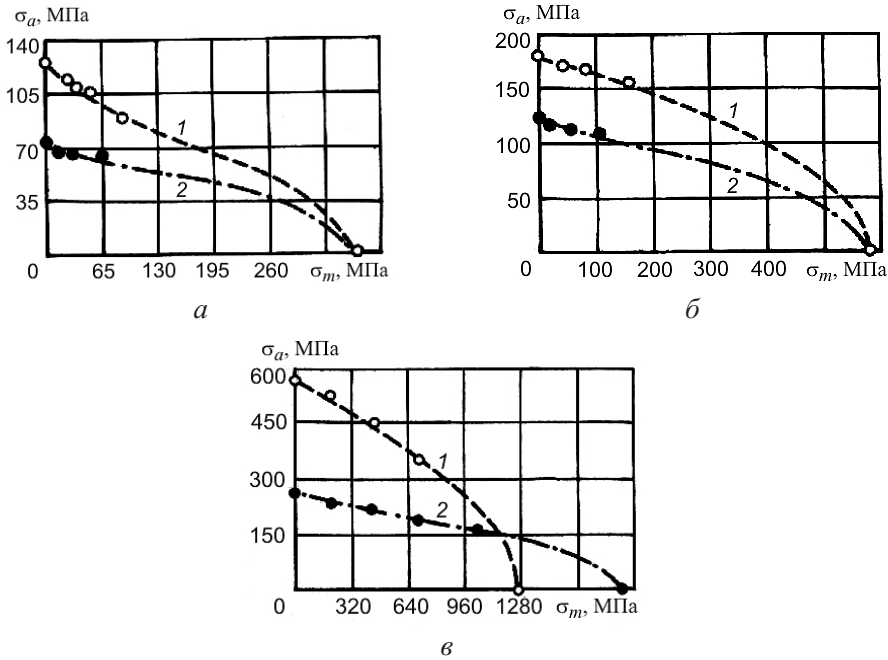


Рис. 1. Диаграммы предельных амплитуд цикла для сталей St37 (а), St52 (б) и Э16 (в) в условиях асимметричного растяжения–сжатия: 1 – гладкие образцы; 2 – образцы с концентратором напряжений.

отнулевого цикла нагружения, полученным по результатам испытаний гладких образцов и образцов с концентратором напряжений (табл. 1).

Углеродистые стали St37 и St52 (рис. 1) обладают относительно невысокими прочностными характеристиками: соответственно предел прочности  $\sigma_B = 362,0$  и  $579,8$  МПа. Небольшая по величине статическая компонента ( $\sigma_m / \sigma_B \approx 0,3$ ) приводит к заметному снижению амплитуды циклической составляющей  $\sigma_r$ , особенно при испытании образцов стали St37. К сожалению, сопоставить данные расчета с экспериментом и определить степень дальнейшего снижения  $\sigma_r$  с ростом статической составляющей в нашем случае не представляется возможным из-за отсутствия экспериментальных результатов.

Сталь Э16 (рис. 1) относится к низколегированным сталям. Она обладает более высокими прочностными характеристиками. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что предел прочности  $\sigma_B$  гладких образцов стали Э16 по данным [14] равен  $1257,3$  МПа, образцов с надрезом –  $1863,9$  МПа.

В табл. 1 приведены также рассчитанные и экспериментальные пределы выносливости для соответствующих значений статической компоненты цикла нагружения. Как видно, расхождение между пределами выносливости не превышает 10%, что можно считать вполне приемлемым.

**Алюминиевые сплавы.** Исходными данными при определении влияния концентрации напряжений на предельное состояние алюминиевых сплавов и проведении соответствующих расчетов служили результаты испытаний при комнатной температуре сплавов 24S-T4 [15] и 14S-T6, 75S-T6 [16]. Исследования по оценке влияния концентрации напряжений на сопротивление



усталости в условиях асимметричного нагружения растяжением–сжатием выполнены на гладких образцах диаметром 10 мм в рабочей части и на цилиндрических образцах с круговым надрезом. Теоретический коэффициент концентрации напряжений  $\alpha_\sigma = 2,4$  и  $3,4$  при радиусе надреза у вершины 0,80 и 0,25 соответственно. Сплавы обладают примерно одинаковыми прочностными свойствами, хотя для сплава 75S-T6 характерен более высокий предел прочности, для сплава 24S-T4 – более высокая пластичность.

Характерная особенность сопротивления алюминиевых сплавов циклическим нагрузкам состоит в том, что кривые усталости не имеют горизонтального участка, параллельного оси абсцисс, в диапазоне исследованных долговечностей (более  $10^8$  цикл). В связи с этим в расчетах используются значения пределов ограниченной выносливости  $\sigma_n$  при симметричном цикле, отнесенные к конкретному числу циклов до разрушения.

Результаты испытаний гладких и надрезанных образцов из исследованных сплавов позволили рассчитать коэффициент  $\xi$  в уравнениях диаграмм предельных амплитуд и построить соответствующие диаграммы. Необходимые данные, в частности пределы прочности  $\sigma_b$ , пределы ограниченной выносливости при симметричном цикле  $\sigma_n$ , параметры отнулевого цикла, приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

**Данные для построения диаграмм предельных амплитуд цикла напряжений и пределы выносливости образцов из алюминиевых сплавов с концентратором при растяжении–сжатии**

Сплав	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_a^0$ , МПа	$\sigma_m^0$ , МПа	$\sigma_n$ , МПа	$n^0$ , цикл	$\xi$	$\sigma_m$ , МПа	$\sigma_{r3}$ , МПа	$\sigma_{rp}$ , МПа	$\delta$ , %
14S-T6, гладкие образцы	516,7	126,6	126,6	164,4	$10^7$	0,74	60,4	132,7	142,8	-7,61
							255,1	94,5	97,92	-3,60
14S-T6, $\alpha_\sigma = 2,4$	668,7	70,9	70,9	95,8	$10^7$	0,41	38,0	81,6	76,7	6,00
							300,7	44,9	46,7	-4,01
14S-T6, $\alpha_\sigma = 3,4$	582,5	49,6	49,6	68,9	$10^7$	0,34	25,9	55,2	53,4	3,26
							342,1	25,9	25,6	1,16
75S-T6, гладкие образцы	586,1	71,4	71,4	131,0	$10^7$	0,20	80,1	68,9	69,6	-1,02
							137,9	55,2	60,4	-9,42
75S-T6, $\alpha_\sigma = 3,4$	657,7	43,4	43,4	62,0	$10^7$	0,29	48,3	41,4	42,7	-3,14
							85,7	34,5	38,8	-12,50
75S-T6, гладкие образцы	586,1	221,1	221,9	348,2	$10^4$	0,63	124,3	265,5	262,6	1,09
							403,9	150,3	146,0	2,86
75S-T6, $\alpha_\sigma = 3,4$	662,0	105,9	105,9	165,5	$10^4$	0,34	115,0	101,7	104,0	-2,26
							228,2	84,5	84,4	0,12

На рис. 2 и 3 приведены расчетные (линии) и экспериментальные (точки) диаграммы предельных амплитуд цикла для сплавов 14S-T6 при  $n_R = 10^7$  цикл и 75S-T6 при  $n_R = 10^4$  и  $10^7$  цикл.

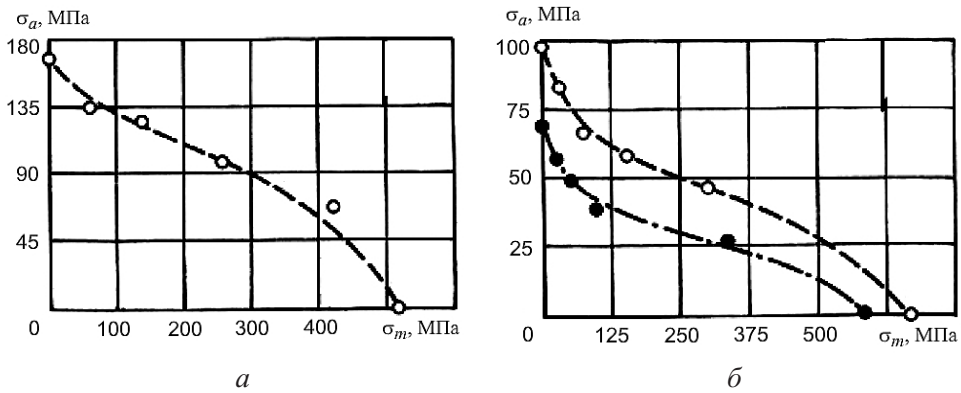


Рис. 2. Диаграммы предельных амплитуд цикла для сплава 14S-T6 в условиях асимметричного растяжения-сжатия при  $n = 10^7$  цикл: *a* – гладкие образцы,  $\alpha_\sigma = 1,0$ ; *б* – образцы с концентратором напряжений при  $\alpha_\sigma = 2,4$  (○) и  $3,4$  (●).

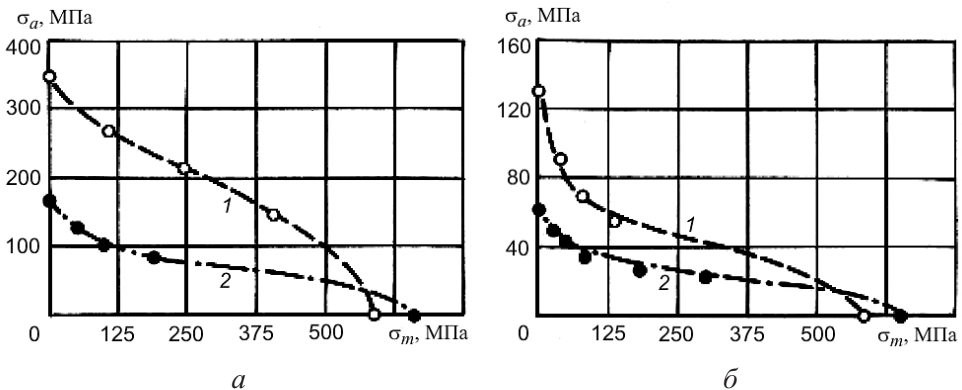


Рис. 3. Диаграммы предельных амплитуд цикла для сплава 75S-T6 в условиях асимметричного растяжения-сжатия при  $n = 10^4$  (*a*) и  $10^7$  цикл (*б*): 1 – гладкие образцы; 2 – образцы с концентратором напряжений при  $\alpha_\sigma = 3,4$ .

Сопоставление диаграмм предельного состояния гладких и надрезанных образцов показывает несколько разную чувствительность к статической компоненте цикла в широком диапазоне ее изменения, вплоть до  $\sigma_m / \sigma_B \approx 0,5$ .

Характерно, что диаграммы предельного состояния гладких образцов близки к линейным, в то время как концентратор напряжений обуславливает изменение их общего вида – они в большей степени являются вогнутыми, в первую очередь это относится к диаграммам, построенным при  $\alpha_\sigma = 3,4$ . Близкие результаты получены при проведении расчетов и построении диаграмм предельных амплитуд цикла для сплава 75S-T6 при долговечностях  $10^4$  и  $10^7$  цикл (рис. 3).

В табл. 2 представлены также значения рассчитанных и экспериментальных пределов ограниченной выносливости в широком диапазоне измене-

ния статической компоненты  $\sigma_m$ . Их сопоставление свидетельствует о том, что погрешность  $\delta$  расчета по отношению к эксперименту, как правило, не превышает 10%. Однако в ряде случаев погрешность может быть больше 10%, что, видимо, обусловлено методическими особенностями испытаний и является, скорее всего, исключением.

Рассмотрим особенности влияния концентрации напряжений на сопротивление усталости в условиях асимметричного изгиба и асимметричного кручения. В первом случае воспользуемся результатами испытаний гладких образцов и образцов с концентратором напряжений из хромоникелевой стали [1]. Авторы испытывали образцы с поперечным сечением квадратной формы размером  $10 \times 10$  мм. Концентратор напряжений имел вид надреза радиусом  $\rho = 0,05$  мм, глубиной  $t = 0,2$  мм при  $\omega = 60^\circ$ .

Диаграммы предельного состояния гладких образцов из хромоникелевой стали при асимметричном изгибе рассчитывали по выражению

$$\sigma_a^b = \sigma_{-1}^b \frac{2}{\pi} \left[ \arccos \left( \frac{\sigma_m^b}{\sigma_B^b} \right)^\xi \right], \quad (11)$$

образцов с концентратором напряжений –

$$\sigma_{aH}^b = \sigma_{mH}^b \frac{2}{\pi} \left[ \arccos \left( \frac{\sigma_m^b}{\sigma_B^b} \right)^\xi \right]. \quad (12)$$

Коэффициент  $\xi$  при изгибе и кручении определяли по результатам испытаний при отнулевом цикле нагружения по выражениям, аналогичным (7) и (8), адаптированным к соответствующему виду нагружения.

В табл. 3 содержатся данные, необходимые для расчета и построения диаграмм предельных амплитуд цикла для хромоникелевой стали [1].

Т а б л и ц а 3

**Данные для построения диаграмм предельных амплитуд цикла напряжений и пределы выносливости образцов из стали с концентратором при изгибе**

Сталь	$\theta$ , °С	$\sigma_B^b$ , МПа	$\sigma_a^{b0}$ , МПа	$\sigma_m^{b0}$ , МПа	$\sigma_n^b$ , МПа	$n^0$ , цикл	$\xi$	$\sigma_m^b$ , МПа	$\sigma_{r3}^b$ , МПа	$\sigma_{rp}^b$ , МПа	$\delta$ , %
Хромо- никелевая, гладкие образцы	20	1062,4	454,8	454,8	549,4	$10^7$	1,56	196,2	510,12	524,26	-2,77
								392,4	470,88	474,85	-0,84
								588,6	431,64	406,19	5,90
То же, надрез	20	1062,4	247,1	247,1	294,3	$10^7$	0,95	196,2	269,77	256,39	4,96
								392,4	225,63	219,60	2,67
								588,6	176,58	180,52	-2,23

На рис. 4 представлены расчетные (линии) и экспериментальные (точки) диаграммы предельного состояния как гладких, так и надрезанных образцов из исследуемой стали, которые являются выпуклыми.

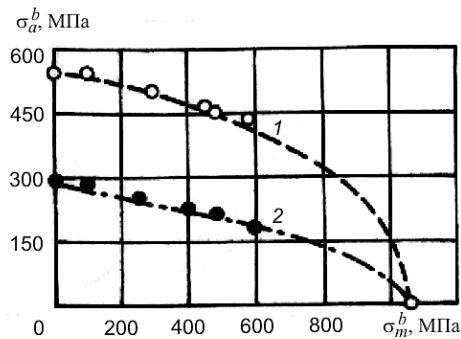


Рис. 4. Диаграммы предельных амплитуд цикла для хромоникелевой стали в условиях асимметричного изгиба: 1 – гладкие образцы; 2 – образцы с концентратором напряжений.

Сопоставление рассчитанных пределов выносливости с экспериментальными для заданных значений статической компоненты цикла напряжений показывает удовлетворительное их согласование: относительная ошибка не превышает 10% вплоть до  $\sigma_m/\sigma_B \approx 0,55$ .

Применительно к асимметричному кручению анализируются результаты испытаний гладких образцов из хромоникелевой стали и образцов с концентратором напряжений диаметром 12 мм,  $\rho = 0,05$  мм,  $t = 0,2$  мм и  $\omega = 60^\circ$  [1].

Диаграммы предельного состояния гладких образцов из хромоникелевой стали в условиях асимметричного кручения рассчитывали по выражению

$$\tau_a = \tau_{-1} \frac{2}{\pi} \left[ \arccos \left( \frac{\tau_m}{\tau_B} \right)^\xi \right], \quad (13)$$

образцов с концентратором напряжений –

$$\tau_{aH} = \tau_{-1H} \frac{2}{\pi} \left[ \arccos \left( \frac{\tau_m}{\tau_B} \right)^\xi \right]. \quad (14)$$

В табл. 4 приведены данные, необходимые для расчета диаграмм предельных амплитуд цикла напряжений указанных материалов.

На рис. 5 представлены расчетные (линии) и экспериментальные (точки) диаграммы предельных амплитуд цикла. Заметим, что статическая компонента незначительно влияет на пределы выносливости при асимметричном нагружении как гладких, так и надрезанных образцов – уменьшение пределов выносливости не превышает 10...15% в диапазоне изменения статической компоненты цикла  $0 < \tau_a/\tau_B < 0,64$ . Диаграммы предельного состояния являются выпуклыми. Такой характер влияния статической компоненты  $\tau_m$  на

Т а б л и ц а 4

Данные для построения диаграмм предельных амплитуд цикла напряжений и пределы выносливости образцов из стали с концентратором при кручении

Сталь	$\theta$ , °С	$\tau_b$ , МПа	$\tau_a^0$ , МПа	$\tau_m^0$ , МПа	$\tau_n$ , МПа	$n^0$ , цикл	$\xi$	$\tau_m$ , МПа	$\tau_{r\sigma}$ , МПа	$\tau_{rp}$ , МПа	$\delta$ , %
Хромо- никелевая гладкие образцы	20	613,7	294,3	294,3	304,1	$10^7$	4,06	196,2	304,11	302,22	0,62
								392,4	274,68	272,46	0,81
То же, надрез	20	613,7	201,1	196,2	206,0	$10^7$	3,08	196,2	201,10	202,19	-0,54
								392,4	176,58	172,64	2,23

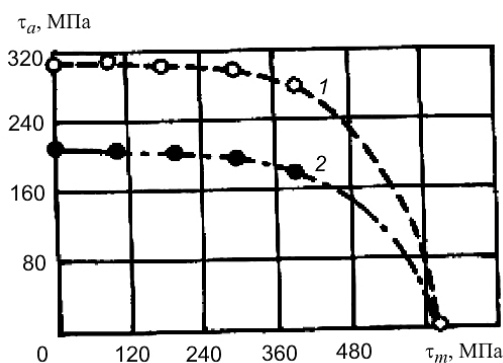


Рис. 5. Диаграммы предельных амплитуд цикла для хромоникелевой стали в условиях асимметричного кручения: 1 – гладкие образцы; 2 – образцы с концентратором напряжений.

циклическую  $\tau_a$  в условиях асимметричного кручения отмечается в ряде известных публикаций [6, 11].

В табл. 4 представлены также рассчитанные и экспериментальные пределы выносливости гладких и надрезанных образцов из исследованных материалов, сопоставление которых свидетельствует об их удовлетворительном согласовании.

С помощью выражений, позволяющих определить предельные диаграммы при соответствующих видах нагружения для гладких образцов и образцов с концентратором напряжений, найдем значения эффективного коэффициента концентрации напряжений применительно к условиям асимметричных растяжения–сжатия, изгиба и кручения (для выбранных значений статической компоненты цикла напряжений).

Результаты расчета коэффициентов концентрации напряжений  $K_\sigma$  и  $K_\tau$  приведены в табл. 5.

Видно, что в зависимости от механических свойств и условий нагружения влияние концентратора напряжений при асимметричном нагружении проявляется по-разному. Для углеродистых и некоторых низколегированных сталей коэффициент  $K_\sigma$  при асимметричном растяжении–сжатии, как правило, увеличивается с ростом  $\sigma_m$  или может находиться примерно на одном уровне. Для алюминиевых сплавов наличие надреза ( $\alpha_\sigma = 3,4$ ) приводит к

Т а б л и ц а 5

Эффективные коэффициенты концентрации напряжений  $K_\sigma$ ,  $K_\tau$ 

Материал, условия нагружения	Статическая компонента цикла напряжений, МПа					
	0	100	200	300	400	500
	Асимметричное растяжение–сжатие					
Сталь ст. 2	1,62	1,90	2,06	2,18	2,29	2,37
Сталь St-37	1,74	1,50	1,45	1,42	–	–
Сталь St-52	1,49	1,53	1,55	1,57	1,58	1,59
Сталь Э16	2,15	2,15	2,13	2,09	2,05	2,00
Сплав 14S-T6, $\alpha_\sigma = 2,4$ , $n^0 = 10^7$ цикл	1,77	1,99	1,97	1,87	1,63	–
Сплав 14S-T6, $\alpha_\sigma = 3,4$ , $n^0 = 10^7$ цикл	2,38	3,06	3,13	3,09	2,87	–
Сплав 75S-T6, $\alpha_\sigma = 3,4$ , $n^0 = 10^4$ цикл	2,10	2,56	2,59	2,57	2,47	2,15
Сплав 75S-T6, $\alpha_\sigma = 3,4$ , $n^0 = 10^7$ цикл	2,11	1,76	1,70	1,65	1,56	–
	Асимметричный изгиб					
Хромоникелевая сталь	1,87	1,97	2,05	2,11	2,17	2,21
	Асимметричное кручение					
Хромоникелевая сталь	1,48	1,48	1,50	1,53	1,58	1,64

повышению коэффициента  $K_\sigma$  с увеличением статической компоненты, причем в этом случае проявляется также влияние долговечности.

При испытаниях хромоникелевой стали в условиях асимметричного изгиба установлено повышение коэффициента  $K_\sigma$  с увеличением степени асимметрии. Аналогичная закономерность получена при испытаниях этой стали при асимметричном кручении, хотя наблюдается меньшее увеличение  $K_\sigma$ .

Результаты выполненных расчетов свидетельствуют о возможности применения разработанного подхода к расчету диаграмм предельных амплитуд образцов с концентратором напряжений и к оценке влияния последнего на сопротивление усталости при асимметричном цикле в широком диапазоне изменения статической составляющей цикла напряжений.

Обнаруженные особенности влияния концентрации напряжений на сопротивление усталости сталей и сплавов подтверждают необходимость их учета в расчетах на прочность элементов конструкций, подвергающихся в процессе эксплуатации асимметричным режимам нагружения.

Результаты расчетов эффективного коэффициента концентрации напряжений  $K_\sigma$  ( $K_\tau$ ) – табл. 5 с использованием зависимостей, описывающих предельное состояние исследованных материалов, коррелируют с данными экспериментов и расчетами, приведенными в [1]. Это открывает возможность

оценки влияния концентрации напряжений на сопротивление усталости конструкционных материалов при асимметричном нагружении в широком диапазоне изменения статической компоненты цикла, при этом существенно сокращается объем трудоемких экспериментальных исследований.

Таким образом, с использованием предложенного подхода можно достаточно надежно рассчитать влияние концентрации напряжений на предельное состояние в широком диапазоне изменения асимметрии нагружения.

## Выводы

1. Анализ рассчитанных диаграмм предельных амплитуд цикла напряжений показал, что разработанный подход и предложенные модели позволяют достаточно достоверно описывать предельное состояние как гладких образцов, так и образцов с концентраторами напряжений в условиях многоциклового асимметричного нагружения растяжением–сжатием, изгибом и кручением. Это, в свою очередь, открывает возможность оценки влияния концентрации напряжений на сопротивление усталости исследуемых материалов при асимметричном нагружении в широком диапазоне изменения статической компоненты цикла нагружения.

2. Описанный подход к решению задачи по оценке предельного состояния конструкционных материалов в условиях многоциклового асимметричного нагружения с учетом концентрации напряжений базируется на предложенных моделях. Получено удовлетворительное согласование расчета с известными экспериментальными данными.

## Резюме

Виконано розрахунково-експериментальну оцінку чутливості конструкційних матеріалів до концентрації напружень за умов багатоциклового асиметричного навантаження розтягом–стиском, згином та крученням. Розв'язок базується на використанні запропонованої моделі граничного стану. Отримано задовільне узгодження результатів розрахунку з експериментальними даними.

1. Подзоллов И. В. Расчет допускаемых напряжений для черных металлов в машиностроении. Действительный запас прочности. – М.: Оборонгиз, 1947. – 486 с.
2. Расчеты на прочность в машиностроении / Под ред. С. Д. Пономарева. – М.: Машгиз, 1959. – Т. 3. – 1120 с.
3. Михайлов-Михеев П. Б. Справочник по металлическим материалам турбино- и моторостроения. – М.; Л.: Машгиз, 1961. – 838 с.
4. Одинг И. А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. – М.: Машгиз, 1962. – 260 с.
5. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов / Пер. с англ. под ред. С. В. Серенсена. – М.: Машиностроение, 1964. – 276 с.
6. Форрест П. Усталость металлов / Пер. с англ. под ред. С. В. Серенсена. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.



7. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. Руководство и справочное пособие. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
8. Троценко В. Т., Красовский А. Я., Покровский В. В. и др. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие. – Киев: Наук. думка, 1994. – Ч. 2. – 704 с.
9. Smith J. O. The Effect of Range of Stress on the Fatigue Strength of Metals // University of Illinois, Engineering Experiment Station, Urbana, IL, Bulletin No. 334, Feb. 1942.
10. Gunn K. Effect of yielding on the fatigue properties of test pieces containing stress concentrations // Aeronaut. Quarterly. – 1955. – 6. – P. 277 – 294.
11. Ужик Г. В. Определение запаса прочности при несимметричных циклах изменения напряжений в деталях машин // Вест. машиностроения. – 1944. – № 5. – С. 3 – 17.
12. Голуб В. П., Крижановский В. И., Погребняк А. Д. Метод расчета усталостной прочности металлических и композитных материалов при асимметричном многоцикловом нагружении // Прикл. механика. – 2004. – 40, № 11. – С. 106 – 115.
13. Голуб В. П., Крижановский В. И., Погребняк А. Д., Кочеткова Е. С. Усталостная прочность металлических и композитных материалов при асимметричном растяжении–сжатии // Там же. – 2006. – 42, № 1. – С. 48 – 58.
14. Ужик Г. В. Прочность сталей при одновременном действии постоянных и переменных нагрузок // Изв. АН СССР. Отд-ние техн. наук. – 1949. – № 5. – С. 657 – 665.
15. Grover H. J., Bishop S. M., and Jackson L. R. Fatigue Strengths of Aircraft Materials Axial-Load Fatigue Tests on Notched Sheet Specimens of 24S-T3 and 75S-T6 Aluminum Alloys and of SAE 4130 Steel with Stress Concentration Factors of 2.0 and 4.0 // NACA Technical Note 2389, June, 1951.
16. Lazan B. J. and Blatherwick A. A. Strength properties of rolled aluminum alloys under various combinations of alternating and mean axial fatigue stresses // Proc. ASTM. – 1953. – 53. – P. 856 – 870.

Поступила 28. 05. 2012