

Вячеслав Драган  
Сергей Семенюк  
Сергей Дяликов  
Брестский политехнический  
институт

### НАКОПЛЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ НАГРУЖЕНИИ В КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

Процесс разрушения в основном состоит из двух этапов: накопление собственно усталостных повреждений и рост усталостных трещин до опасных размеров. В соответствии с этим расчет элементов конструкций при переменных нагрузках подразделяют на получение оценок усталостной долговечности по моменту появления заметных усталостных трещин и оценок живучести конструкций, уже имеющих начальные трещины.

Особое значение имеют расчеты конструкций при случайных воздействиях, поскольку модели таких воздействий наиболее полно отражают их реальную нагруженность в эксплуатации. Вопрос о влиянии концентрации напряжений на процесс накопления усталостных повреждений при нестационарных режимах циклического нагружения слабо освещен в литературе, причем результаты опубликованных работ не всегда согласуются между собой. Поэтому целью настоящей работы было исследование особенностей, вносимых концентрацией напряжений в процесс накопления повреждений по сравнению с накоплением повреждений в гладких образцах.

Усталостные испытания проводились на плоских образцах из сплавов Д16АТ, АМг6, ВТ14 при циклическом растяжении-сжатии с частотой 43 Гц. Концентратором напряжений служило круглое отверстие, расположенное по оси рабочей части образца. Программное нагружение реализовывалось в виде двухступенчатых блоков с постоянным коэффициентом асимметрии цикла. Характеристики ступеней блока программного нагружения, а именно: максимальные напряжения цикла  $(\sigma_{max}^I \text{ и } \sigma_{max}^{II})$ , отношение этих напряжений к пределу выносливости  $\sigma_c$ , а также количество циклов на ступенях блока  $(n_1 \text{ и } n_2)$ , представлены в табл. I.

Прогнозирование долговечности образцов при программном нагружении осуществлялось на использовании кривых усталости при регулярном нагружении [1]. Для определения суммы относительной

долговечности применялась модифицированная гипотеза накопления повреждений

$$\sum_{i=1}^K \frac{n_i}{N_i} = a, \quad (1)$$

где  $n_i$  - количество циклов нагружения на  $i$ -й ступени программного нагружения;

$N_i$  - долговечность при регулярном нагружении при напряжении, равном напряжению на  $i$ -й ступени;

$K$  - количество ступеней до образования усталостной трещины размером 0,05-0,15мм или до окончательного разрушения.

Характеристики блоков и результаты испытаний гладких образцов при программном испытании представлены в табл. I.

Исследовалось влияние уровня напряжений на ступенях блока программного нагружения на величину сумм относительных долговечностей  $a$  как по образованию усталостной трещины размером 0,05-0,15мм, так и по окончательному разрушению. Величина  $a$  для гладких образцов, практически, не зависит от изменения уровней напряжений на ступенях блока программного нагружения. Интервалы изменения сумм относительных долговечностей  $a$  по образованию трещины и по разрушению, практически, совпадают. Не зависят значения  $a$  от количества блоков до разрушения, если  $K > 8$ , а также от соотношения относительных долговечностей на высокой и низкой ступенях программного нагружения  $n_i/N_i$  и  $n_{i-1}/N_{i-1}$ .

Влияние концентрации напряжений на накопление усталостных повреждений исследованных сплавов в зависимости от вида блока нагружения может быть обусловлено наличием или отсутствием остаточных напряжений. Что бы выявить роль остаточных напряжений, образующихся у концентратора, было проведено их исследование при регулярном нагружении. Методика определения остаточных напряжений и экспериментальные результаты представлены в [2]. Установлено, что при отнулевом растяжении образцов с концентратором из сплава АМгб с увеличением номинальных напряжений от 120 до 140МПа остаточные сжимающие напряжения увеличиваются от 30 до 50 МПа.

В результате исследования кинетики остаточных напряжений у концентратора в условиях программного нагружения отнулевым растяжением установлено, что величина остаточных сжимающих напряжений определяется нагружением на ступени с максимальным напряжением в блоке и равна по величине остаточным напряжениям, которые

Накопление повреждений при программном нагружении

Табл. I.

№ п/п	Материал, тип образца	Коэффициент асимметрии цикла R	Характеристики блоков программного нагружения				Экспериментальные интервалы изменения $\alpha$	
			$\sigma_{max}^I$ , МПа	$\frac{\sigma_{max}^I}{\sigma_c}$	$\sigma_{max}^2$ , МПа	$\frac{\sigma_{max}^2}{\sigma_c}$	по образцов. трещины	по разрушению
1	ЛІБЛТ, гладкие образцы	-1	130	1,2	175	1,6	-	0,81...1,61
2		0	170	1,0	226	1,4	0,61...1,20	0,64...1,37
3			192	1,2	256	1,6	0,72...1,25	0,62...1,27
4			215	1,3	283	1,8	0,63...1,56	0,59...1,40
5			240	1,5	315	2,0	0,64...1,33	0,80...1,42
6	ВТІА, гладкие образцы	0	510	1,1	560	1,2	-	0,71...1,72
7			640	1,4	700	1,5	-	0,81...1,42
8			820	1,7	900	1,9	-	0,76...1,39
9	АМГб, гладкие образцы	0	200	1,2	230	1,4	-	0,32...0,71
10	ЛІБЛТ, образцы с концентратором напряжений	-1	100	1,3	120	1,6	0,81...1,88	0,63...1,73
11		0	120	1,2	160	1,6	1,38...2,49	1,26...2,69
12			130	1,3	180	1,8	1,46...3,15	1,34...2,98
13			0,5	160	1,2	210	1,6	-
14	АМГб, образцы с концентратором напряжений	0	110	1,1	140	1,3	0,64...1,38	0,55...1,45
15			140	1,3	170	1,5	0,70...1,35	0,59...1,50

образуются при регулярном нагружении с тем же уровнем нагрузки. Уровень остаточных напряжений, образовавшихся на высокой ступени блока, в процессе программного нагружения остается, практически, постоянным, так как периодически восстанавливается нагружением высокой ступенью. Таким образом, при программном нагружении постоянно действующие сжимающие остаточные напряжения изменяют коэффициент асимметрии цикла действительных напряжений у концентратора на низкой ступени блока по сравнению с его изменением при регулярном нагружении.

Схема изменения асимметрии цикла действительных напряжений у концентратора при программном нагружении отнулевыми циклами представлена на рис. 1. Если блок программного нагружения начинается с низкой ступени, то при нагружении первым блоком на этой ступени возникают остаточные напряжения  $\sigma_{ост}^I$ , а на второй ступени  $\sigma_{ост}^II$ , равные по величине остаточным напряжениям, возникающим при регулярном нагружении с соответствующими уровнями напряжений. Остаточные напряжения у концентратора при дальнейшем нагружении стабилизируются на уровне  $\sigma_{ост}^II$ .

Долговечности при регулярном нагружении, используемые в расчетах по линейной гипотезе, определяются по кривой усталости образцов с концентраторами напряжений, построенной в номинальных напряжениях. Зная параметры цикла действительных напряжений у концентратора можно определить соответствующие параметры цикла номинальных напряжений. Коэффициент асимметрии цикла номинальных напряжений на низкой ступени программного нагружения будет:

$$R_H^2 = \frac{(\sigma_{ост}^{II} - \sigma_{ост}^I) / \alpha_s}{\sigma_{max,н}^I + (\sigma_{ост}^{II} - \sigma_{ост}^I) / \alpha_s} \quad (2)$$

где  $\alpha_s$  — теоретический коэффициент концентрации напряжений;  $\sigma_{max,н}^I$  — максимальное номинальное напряжение при регулярном нагружении, соответствующее напряжению на низкой ступени программного нагружения.

Таким образом, влияние кинетики остаточных напряжений при программном нагружении заключается в том, что для низкой ступени второго и последующего блоков при расчетах с использованием линейной гипотезы долговечность при регулярном нагружении необходимо определять не по исходной кривой усталости с  $R = 0$ , а по другой кривой со значением  $R$ , вычисленным по приведенному выражению 2.

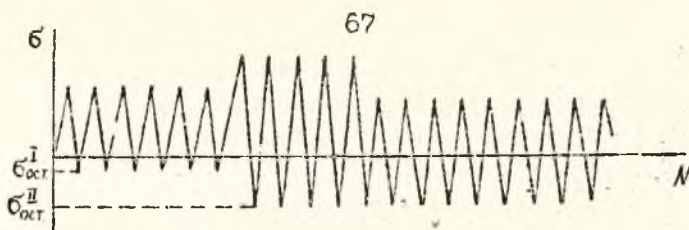


Рис. 1. Изменение асимметрии цикла действительных напряжений у концентратора при программном нагружении отнулевыми циклами.

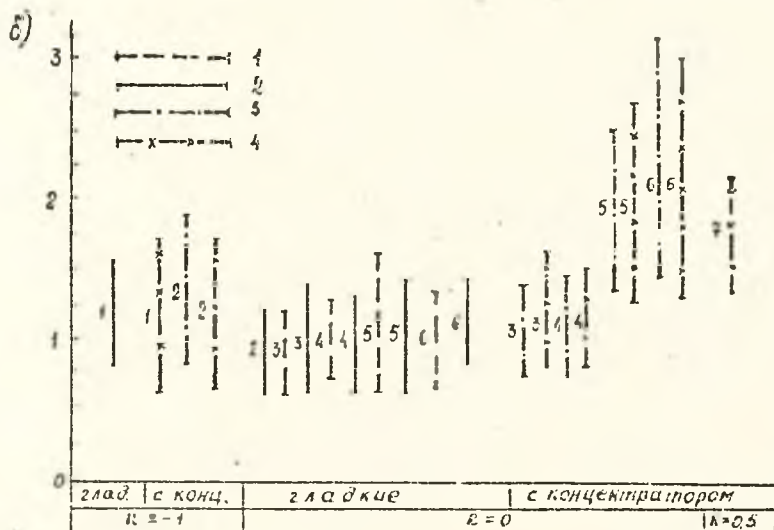
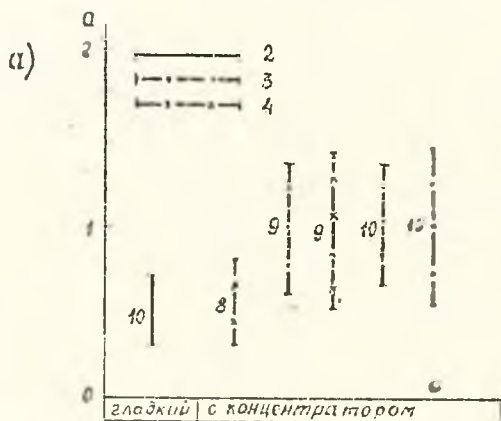


Рис. 2. Влияние концентрации напряжений на накопление повреждений при программном нагружении сплавов AMg6 (а) и Li6Al7 (б): 1, 3 - по образованию трещины; 2, 4 - по разрушению (цифрами показаны номера блоков в табл. I)

В таблице I и на рис.2 показано влияние концентрации напряжений на накопление повреждений в исследуемых сплавах при различных асимметриях цикла. При симметричных циклах нагружения интервалы изменения сумм относительных долговечностей  $\alpha$  по линейной гипотезе для образцов с концентраторами напряжений и для гладких образцов совпадают. Это объясняется тем, что величина остаточных напряжений, возникающих при симметричных циклах нагружения, незначительна. При отнулевом нагружении наблюдается резкое увеличение значений  $\alpha$  по сравнению с гладкими образцами. Это связано с уменьшением интенсивности накопления повреждений на низкой ступени блока, которое связано с кинетикой остаточных напряжений у концентратора при программном нагружении. Определение значений  $\alpha$  с учетом влияния кинетики остаточных напряжений приводит к равенству значений сумм относительных долговечностей для гладких образцов и образцов с концентраторами напряжений.

#### Список литературы

1. Драган В.И., Семенюк С.М., Митченко Е.И., Меркулов В.О. Влияние асимметрии цикла нагружения, концентрации напряжений и фреттинг-коррозии на сопротивление усталости сплава Д16АТ // Проблемы прочности.- 1990.- №5.-С.47 - 51.
2. Драган В.И., Семенюк С.М. Определение остаточных напряжений в образцах с концентраторами напряжений при циклических нагрузках // Известия ВУЗов. Машиностроение.- 1989.- №12.- С.22 - 26.
3. Драган В.И., Семенюк С.М. Накопление усталостных повреждений в элементах с концентраторами напряжений при программном нагружении // Механическая усталость металлов: Тез.докл. XI Международного коллоквиума. - Киев: Наук. думка, 1991. - С.47-48.