

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ ИЗ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ ПРИ ПРОГРАММНОМ НАГРУЖЕНИИ

В. И. Драган

В процессе эксплуатации многие строительные конструкции и детали машин подвергаются нестационарным циклическим нагрузкам. При этом на сопротивление усталости оказывают влияние различные конструкционные и технологические факторы. В частности, долговечность заклепочных и болтовых соединений определяется действием таких факторов, как концентрация напряжений и фреттинг-коррозия.

Усталостные испытания проводили на плоских образцах из сплавов 2 мм и 3 мм. Нагружение циклическим растяжением-сжатием осуществлялось в мягком режиме с частотой 43 Гц. Концентратором напряжений служило круглое отверстие по оси рабочей части образца диаметром 2,5 мм для образцов из сплава Д16АТ ( $\alpha_\sigma=2,73$ ) и 8 мм - из сплава АМг6 ( $\alpha_\sigma=2,3$ ).

Программное нагружение реализовалось в виде двухступенчатых блоков с постоянным коэффициентом асимметрии цикла нагружения. Характеристики ступеней блока программного нагружения - максимальные напряжения цикла  $\sigma_{max}^I$  и  $\sigma_{max}^{II}$ , отношение этих напряжений к пределу выносливости  $\sigma_R$ , а также количество циклов  $n_I$  и  $n_{II}$  - представлены в таблице 1.

Долговечность образцов и элементов конструкций, подвергаемых в процессе эксплуатации программному нагружению, прогнозируется с помощью кривых усталости при регулярном нагружении. Расчеты долговечности при программном нагружении осуществляются с привлечением той или иной гипотезы накопления повреждений. Чаще всего применяется наиболее простая и наглядная из них - линейная гипотеза накопления повреждения:

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

где -  $n_i$  количество циклов нагружения на  $i$ -й ступени программного нагружения;  $N_i$  - долговечность при регулярном нагружении напряжением, равным напряжению на  $i$ -й ступени;  $k$  - количество ступеней до образования трещины или разрушения. Используется также модификация этой гипотезы, когда вместо единицы в правой части уравнения стоит экспериментально определяемая константа  $a$ .

Характеристики блоков и результаты испытаний гладких образцов из сплавов Д16АТ, АМг6 при программном нагружении представлены в таблице 1. Как по образованию трещины длиной 0,05...0,15 мм, так и по

разрушению величина  $a$  практически не зависит от уровней напряжений на ступенях блока программного нагружения. Интервалы изменения сумм относительных долговечностей  $a$  по образованию трещины и по разрушению практически совпадают.

**Накопление повреждений в гладких образцах с концентраторами напряжений при программном нагружении.**

Таблица 1

№ блока	Материал	Коэффициент асимметрии цикла	Характеристика блока нагружения						Экспериментальные интервалы изменения $a$	
			$\sigma_{max}^I$ , МПа	$\frac{\sigma_{max}^I}{\sigma_R}$	$\sigma_{max}^{II}$ , МПа	$\frac{\sigma_{max}^{II}}{\sigma_R}$	$n_I \cdot 10^{-3}$ цикл	$n_{II} \cdot 10^{-3}$ цикл	по образованию трещины	по разрушению
Результаты испытания гладких образцов										
1	Д16АТ	-1	130	1,2	175	1,6	20	8	-	0,81÷1,61
2		0	96	0,6	256	1,6	56	8	-	0,61÷1,22
3			170	1,0	226	1,4	45	28	0,61÷1,62	0,64÷1,37
4			192	1,2	256	1,6	20	9	0,72÷1,25	0,62÷1,27
5			215	1,3	283	1,6	8	3	0,63÷1,56	0,59÷1,40
6			240	1,5	315	2,0	3	2	0,64÷1,33	0,80÷1,42
7	АМг6	0	200	1,2	230	1,4	25	5		0,32÷0,71
Результаты испытания образцов с концентраторами напряжений										
8	Д16АТ	-1	60	0,8	120	1,6	70	10	-	0,65÷1,72
9			100	1,3	120	1,6	18	8	0,81÷1,88	0,68÷1,73
10		0	0	0	160	1,6	20мин	14	0,72÷1,38	0,80÷1,62
11			60	0,6	160	1,6	98	14	0,70÷1,46	0,82÷1,54
12			120	1,2	160	1,6	22	10	1,38÷2,49	1,26÷2,69
13			130	1,3	180	1,8	50	10	1,46÷3,15	1,34÷2,98
14		0,5	160	1,2	210	1,6	10	4	-	1,32÷2,14
15	АМг6	0	100	0,9	140	1,3	70	10	-	0,33÷0,78
16			110	1,1	140	1,3	30	8	0,64÷1,38	0,55÷1,45
17			140	1,3	170	1,5	20	6	0,70÷1,35	0,59÷1,50

Не зависит величина  $a$  и от среднего количества блоков до разрушения, которое изменялось от 8 до 28, а также от соотношения относительных долговечностей на высокой  $n_I/N_{II}$  и низкой  $n_{II}/N_{II}$  ступенях блока программного нагружения при его изменении от 2,2 до 6,3. При этом значения  $a$  для сплавов Д16АТ близки к единице, в то же время для сплава АМг6  $a$  меньше единицы.

Чтобы выявить роль остаточных напряжений, возникающих у концентратора, в накоплении повреждений при программном нагружении, было проведено исследование в условиях регулярного нагружения. Методика определения остаточных напряжений и данных эксперимента представлены ранее [1]. Установлено, что в условиях

отнулевого растяжения образцов с концентратором из сплава АМгб при увеличении номинальных напряжений от 120 до 140 МПа остаточные сжимающие напряжения возрастают с 30 до 50 МПа.

В результате исследования кинетики остаточных напряжений у концентратора в условиях программного нагружения отнулевым растяжением установлено, что величина остаточных сжимающих напряжений у концентратора определяется нагружением на ступени с максимальным напряжением в блоке и равна остаточным напряжениям, которые образуются при регулярном нагружении с тем же уровнем нагрузки. Эти напряжения остаются практически постоянными, поскольку периодически восстанавливаются при нагружении высокой ступенью. Таким образом, при программном нагружении постоянно действующие остаточные сжимающие напряжения изменяют коэффициент асимметрии цикла действительных напряжений у концентратора на низкой ступени блока по сравнению с его значением при регулярном нагружении.

Схема изменения асимметрии цикла действительных напряжений у концентратора при программном нагружении отнулевыми циклами показана на рис 1а. Если блок программного нагружения начинается с низкой ступени, то при нагружении первым блоком на этой ступени образуются остаточные напряжения  $\sigma_{ocm}^J$ , а на второй ступени - напряжения  $\sigma_{ocm}^{II}$ , равные по величине остаточным, возникающим при регулярном нагружении с соответствующими уровнями напряжений. Остаточные напряжения у концентратора при дальнейшем нагружении стабилизируются на уровне  $\sigma_{ocm}^{II}$ . Следовательно, в случае программного нагружения происходит изменение асимметрии действительных напряжений у концентратора на низкой ступени блока по сравнению с таковыми при регулярном нагружении:

$$\Delta R = R_n - R_p = \frac{\sigma_{ocm}^{II}}{\sigma_{max}^n} - \frac{\sigma_{ocm}^J}{\sigma_{max}^p} \quad (2)$$

Долговечности при регулярном нагружении, используемые в расчетах по линейной гипотезе, определяются по кривой усталости образцов с концентратором напряжений, которая строится в номинальных напряжениях.

Сравнение действительных и номинальных циклических напряжений показано на рис.1.

Изменение коэффициента асимметрии цикла номинальных напряжений на низкой ступени блока при программном нагружении определяется изменением уровня остаточных напряжений у концентратора по сравнению с регулярным напряжением:  $\sigma_{ocm}^{II} - \sigma_{ocm}^J$ .

Поскольку уровень остаточных напряжений не превышает предел текучести, минимальное номинальное напряжение цикла на низкой ступени при программном нагружении (рис.1,б)

$$\sigma_{min,n}^n = (\sigma_{ост}^{II} - \sigma_{ост}^I) / \alpha_{\sigma} \quad (3)$$

Учитывая, что амплитудные значения номинальных напряжений на низкой ступени блока одинаковы как при регулярном, так и при программном нагружении, получим:

$$\sigma_{max,n}^n = \sigma_{max,n}^p + (\sigma_{ост}^{II} - \sigma_{ост}^I) / \alpha_{\sigma} \quad (4)$$

Тогда коэффициент асимметрии цикла номинальных напряжений по низкой ступени при программном нагружении:

$$R_n^n = \frac{\sigma_{min,n}^n}{\sigma_{max,n}^n} = \frac{(\sigma_{ост}^{II} - \sigma_{ост}^I) / \alpha_{\sigma}}{\sigma_{max,n}^p + (\sigma_{ост}^{II} - \sigma_{ост}^I) / \alpha_{\sigma}} \quad (5)$$

Таким образом, влияние кинетики остаточных напряжений на суммирование повреждений при программном нагружении заключается в том, что на низкой ступени второго и последующих блоков в расчетах по линейной гипотезе долговечность при регулярном нагружении следует оценивать не по исходной кривой усталости с  $R=0$ , а по кривой со значением  $R$ , вычисленным по (5).

Проанализируем результаты исследования кинетики остаточных напряжений у концентратора при программном нагружении (табл.1). На рис.2 показано влияние концентрации напряжений на накопление повреждений в сплавах Д16АТ и АМгб при различных асимметриях цикла.

В условиях симметричных циклов нагружения интервалы изменения сумм относительных долговечностей образцов с концентратором напряжений и гладких образцов отличаются незначительно. Так как при симметричных циклах нагружения в полцикле растяжения у концентратора образуются остаточные напряжения сжатия, а в полцикле сжатия остаточные напряжения растяжения, то их суммарная величина за цикл равна нулю. Показано [2], что величина остаточных напряжений, возникающих при симметричных циклах нагружения, незначительна. В этом случае влияние кинетики остаточных напряжений на накопление повреждений отсутствует.

При отнулевом нагружении блоками, у которых только одна ступень выше предела выносливости, интервалы изменения  $a$  для образцов с концентратором и для гладких образцов также практически совпадают, поскольку низкая ступень при вычислении  $a$  по линейной гипотезе не учитываются.

При отнулевом нагружении блоками, обе ступени которых выше предела выносливости, наблюдается резкое увеличение значений  $a$  для образцов с концентраторами напряжений по сравнению с гладкими образцами. Это связано с уменьшением интенсивности накопления

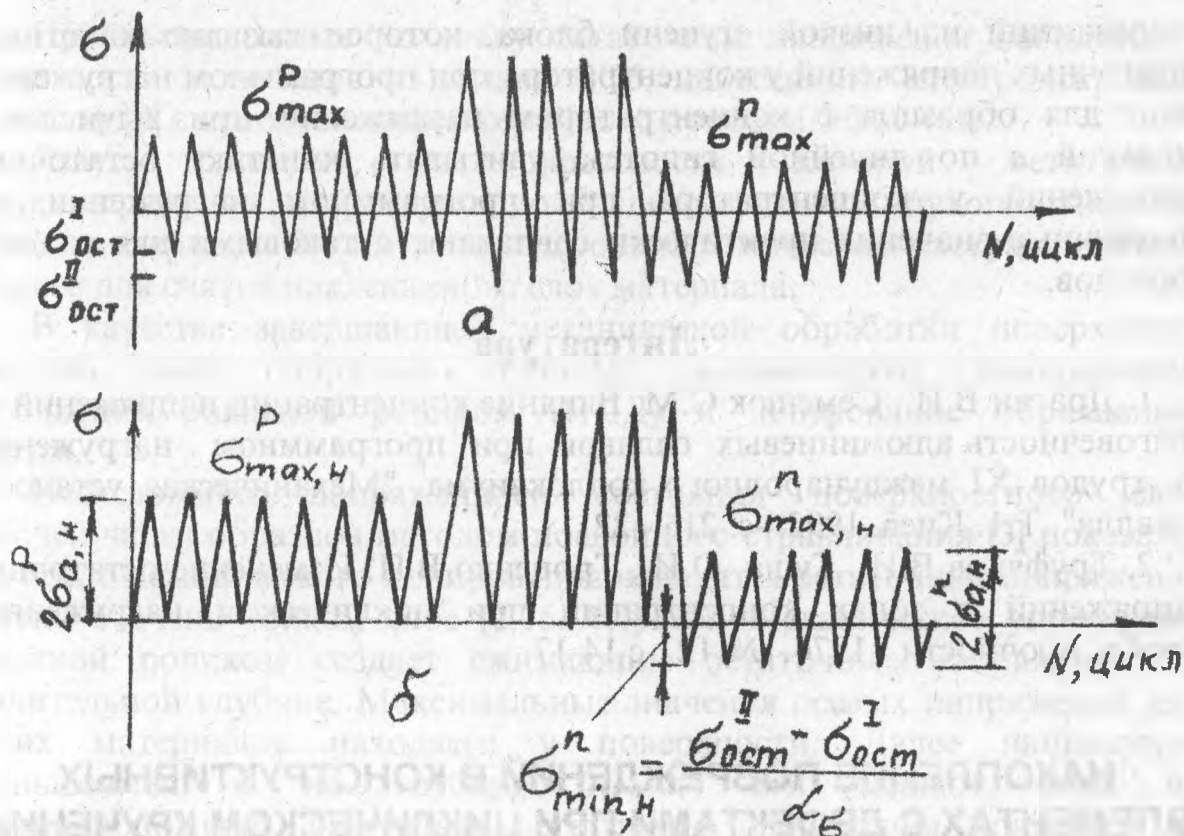


Рис. 1 Параметры циклов действительных напряжений у концентратора при программном нагружении (а) и соответствующие им параметры циклов номинальных напряжений (б)

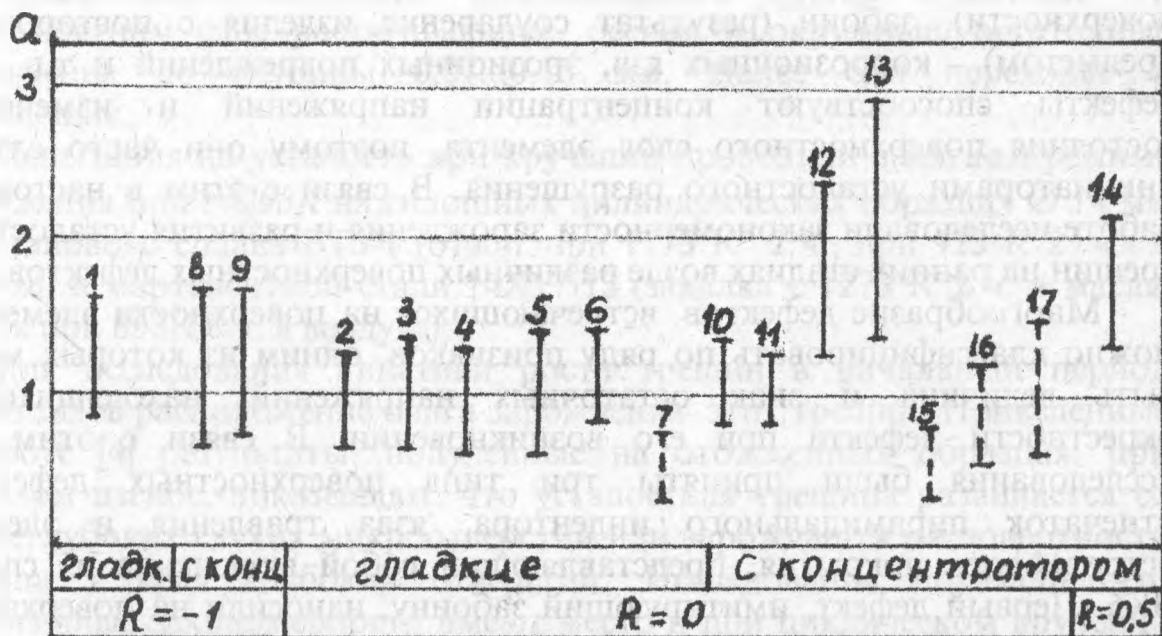


Рис. 2 Влияние концентрации напряжений на накопление повреждений в сплавах Д16АТ (сплошные линии) и АМг6 (штриховые линии) при программном нагружении (цифры - номера блоков в табл. 1)

повреждений на низкой ступени блока, которое вызвано кинетикой остаточных напряжений у концентратора при программном нагружении. Если для образцов с концентратором напряжений при вычислении значений  $a$  по линейной гипотезе учитывать кинетику остаточных напряжений у концентратора при программном нагружении, то полученные значения практически совпадают с таковыми для гладких образцов.

### Литература

1. Драган В.И., Семенюк С.М. Влияние концентрации напряжений на долговечность алюминиевых сплавов при программном нагружении: сб. трудов XI международного коллоквиума. "Механическая усталость металла", Т.1. Киев, 1992. -с. 216 - 221.

2. Труфяков В.И., Гуца О.И., Троценко В.П. Изменение остаточных напряжений в зонах концентрации при циклическом нагружении// Пробл. прочности. -1976. -№ 12. -с 14-17.

## НАКОПЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ С ДЕФЕКТАМИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ КРУЧЕНИИ

С. М. Ляликов

При изготовлении и эксплуатации элементов конструкции может произойти повреждение поверхностного слоя в виде рисок (следов от обрабатывающего инструмента), прижогов (при шлифовании поверхности), забоин (результат соударения изделия с посторонним предметом), коррозионных язв, эрозионных повреждений и т.п. Эти дефекты способствуют концентрации напряжений и изменению состояния поверхностного слоя элемента, поэтому они часто служат инициаторами усталостного разрушения. В связи с этим в настоящей работе исследовали закономерности зарождения и развития усталостных трещин на ранних стадиях возле различных поверхностных дефектов.

Многообразие дефектов, встречающихся на поверхности элементов можно классифицировать по ряду признаков, одним из которых могут быть величина и знак остаточных напряжений, находящихся в окрестности дефекта при его возникновении. В связи с этим для исследования были приняты три типа поверхностных дефектов: отпечаток пирамидального индентора, язва травления и элемент островкового покрытия, представляющий собой включение из сплава ВК6. Первый дефект, имитирующий забоину, наносили на поверхность образца вдавливанием индентора в виде четырехгранной пирамиды с углом в вершине  $\sim 90^\circ$ . Нагрузка на индентор составляла  $F=300, 600, 700$  Н. Возле такого дефекта появляются сжимающие остаточные напряжения [1].