

Н.И.Гриненко, Л.А.Шефер, К.Т.Шулёпов

СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ СПЛАВА АМг-6 ПРИ АСИММЕТРИЧНОМ ЦИКЛЕ С ПОСТОЯННОЙ И ПЕРЕМЕННОЙ АМПЛИТУДАМИ НАГРУЖЕНИЯ

Циклическое нагружение конструкции в процессе эксплуатации довольно часто несимметрично за счет действия статической составляющей напряжения. Оценка долговечности подобных конструкций должна проводиться с учетом асимметрии цикла или процесса по соответствующим диаграммам. Существующие литературные данные по влиянию асимметрии нагружения на долговечность весьма ограничены, а для программного нагружения, эквивалентного случайному, практически отсутствуют.

В настоящей статье предлагается методика и приводятся результаты исследования поведения материала АМг-6 при программном и одноступенчатом нагружениях. В качестве объекта исследований использовались плоские образцы с концентратором в виде круглого отверстия (рис. 1). В работе использовалась установка на базе электродинамического вибрационного стенда с большим тяговым усилием. Образцы закреплялись в специальном приспособлении (рис. 2), обеспечивающем дискретную регулировку степени статического смещения процесса по диапазонам за счет перемещения зажимного устройства 2 вдоль вертикальной стойки 1.

Контроль статического прогиба образца осуществлялся с помощью микроскопа типа БПМ-2, а в динамическом режиме с помощью дифференциального индуктивного датчика 7, стыкующей аппаратуры и катодного осциллографа. В случае длительных испытаний датчик может

быть подключен к системе автоматического поддержания уровня на-
грузок.

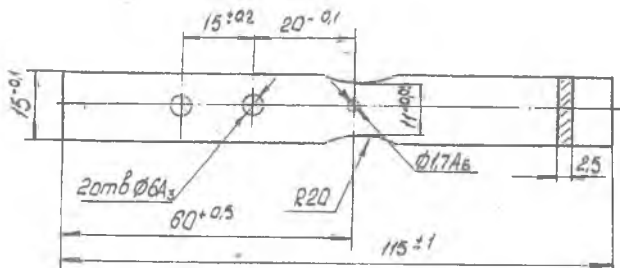


Рис. 1.

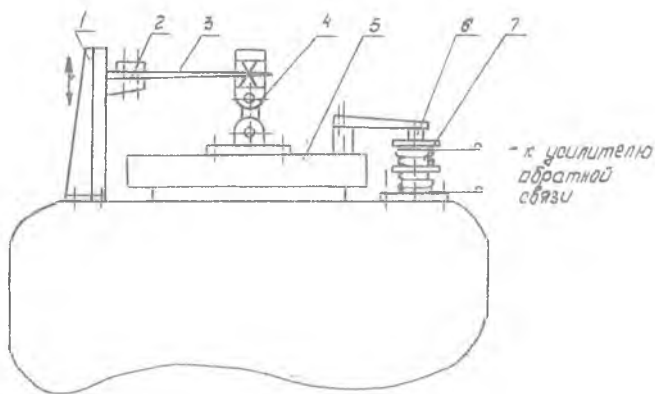


Рис. 2.

Программное нагружение при знакопеременном изгибе осуществля-
лось с помощью специального блока, позволяющего реализовать гар-
монические сигналы с дискретным изменением амплитуды, причем из-
менение амплитуд может подчиняться заданному закону распределе-
ния [1].

Функция распределения амплитуд в виде плотности вероятности напряжений $f(\sigma_a)$ может быть получена на основе определенной информации о случайном процессе нагружения конструкции: закона распределения мгновенных значений напряжений, математического ожидания $\langle \sigma \rangle$ и спектральной плотности $S_\sigma(\omega)$. При этом в зависимости от метода приведения случайного процесса к детерминированному программному функция $f(\sigma_a)$ может быть записана как распределение максимумов, размахов, полных циклов. В настоящей работе $f(\sigma_a)$ рассматривалась как распределение максимумов процесса - $f_{\max}(\sigma_a)$, которая может быть записана в виде обобщенного распределения Райса [2]:

$$f_{\max}(\sigma_a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \beta \sqrt{\langle \sigma^2 \rangle}} \left\{ \sqrt{\beta^2 - 1} \exp\left[-\frac{\beta^2 \sigma^2}{2(\beta^2 - 1)\langle \sigma^2 \rangle}\right] + \sqrt{2\pi} \frac{\sigma}{\sqrt{\langle \sigma^2 \rangle}} \exp\left(-\frac{\sigma^2}{2\langle \sigma^2 \rangle}\right) \Phi\left(\frac{\sigma}{\sqrt{\beta^2 - 1}\sqrt{\langle \sigma^2 \rangle}}\right) \right\}, \quad (I)$$

где $\langle \sigma^2 \rangle = \int_0^\infty S(\omega) d\omega$ - дисперсия процесса;

$\beta = \frac{n_3}{n_0}$ - мера сложности процесса;

$n_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\int_0^\infty \omega^2 S_\sigma(\omega) d\omega}{\int_0^\infty S_\sigma(\omega) d\omega} \right]^{1/2}$ - среднее число пересечений нулевого уровня в единицу времени с заданным знаком производной;

$n_3 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\int_0^\infty \omega^4 S_\sigma(\omega) d\omega}{\int_0^\infty \omega^2 S_\sigma(\omega) d\omega} \right]^{1/2}$ - среднее число экстремумов процесса в единицу времени.

В зависимости от сочетания числа экстремумов и нулей процесса параметр β находится в интервале $(1 + \infty)$, что приводит к изменению закона распределения максимумов, принимаемых за амплитуды, от Релея до нормального.

Эксперименты проводились для значений $\beta > 4$, когда распределение $f_{\max}(\sigma_a)$ близко к нормальному [2].

Составление программ проводилось в соответствии с принципами, изложенными в работах [3, 4]. Нагружение образцов производилось с частотой 30 гц. В качестве переменных параметров процесса были приняты математическое ожидание напряжений - $\langle \sigma \rangle = (0; 3; 5; 7)$ кг/мм², среднее квадратичное отклонение на-

пряжений (СКО) - $\sqrt{\langle \sigma^2 \rangle} = (4; 5; 6; 7)$ кг/мм², которые соответственно характеризуют статическое смещение процесса в целом и степень разброса амплитуд.

Необходимо отметить, что параметр асимметрии цикла $\gamma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ для программного и случайного нагружения неприменим, поскольку внутри процесса величина γ может меняться в широком диапазоне значений от -1 до $+1$, и основным показателем смещения процесса в какую-либо сторону является $\langle \sigma \rangle$. На различных уровнях СКО и математического ожидания до полной поломки было испытано 6-7 образцов. Результаты испытаний статистически обрабатывались по общепринятым методикам, учитывающим ограниченность выборки, и были представлены в виде семейства кривых усталости (рис.3А). Предел выносливости материала при программном нагружении был вычислен аналитически по методике, предложенной в работе [5]. При этом под пределом выносливости материала при программном нагружении понимается минимальное значение СКО напряжений процесса нагружения, при котором некапливается принятая мера повреждения материала образца и нарабатывается базовое число циклов.

В результате расчетов для предела выносливости были получены значения $\sqrt{\langle \sigma^2 \rangle}_{-1A} = (3,3; 2,9; 2,75; 2,25)$ кг/мм² при соответствующих смещениях процесса $\langle \sigma \rangle = (0; 3; 5; 7)$ кг/мм².

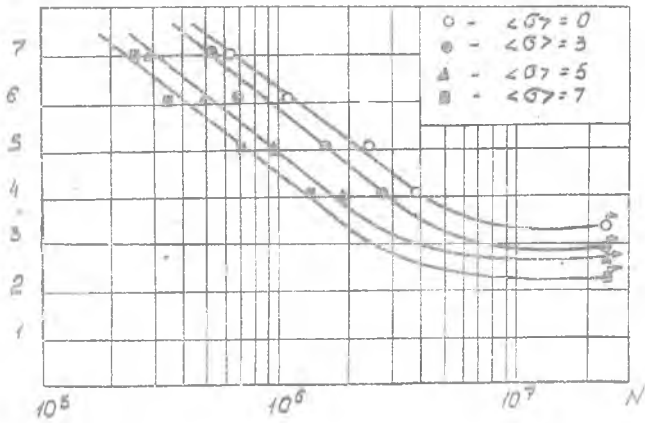
На основании кривых усталости для каждого уровня статического смещения процесса (рис.3А) были построены в относительных координатах: зависимость $\frac{\sqrt{\langle \sigma^2 \rangle}_{-1A}}{\sqrt{\langle \sigma^2 \rangle_{-1}}} = f\left(\frac{\langle \sigma \rangle}{\sigma_B}\right)$ и зависимость $\frac{\sqrt{\langle \sigma^2 \rangle}_{-1A}}{\sqrt{\langle \sigma^2 \rangle_{-1}}} = f\left(\frac{\langle \sigma \rangle}{\sigma_B}\right)$ для различных долговечностей (рис.3В). Здесь σ_B - предел прочности.

Экспериментальные точки получены для относительных смещений $\frac{\langle \sigma \rangle}{\sigma_B} \leq 0,3$, так как при больших смещениях максимальные напряжения в программах заходили в область предела текучести. На основании полученных кривых предлагается аналитическая зависимость, позволяющая приводить смещенный процесс к процессу симметричному, для которого $\langle \sigma \rangle = 0$:

$$\sqrt{\langle \sigma^2 \rangle}_{-1A} = \sqrt{\langle \sigma^2 \rangle}_{-1} \left(1 - \frac{\langle \sigma \rangle}{\sigma_B}\right)^2 \quad (2)$$

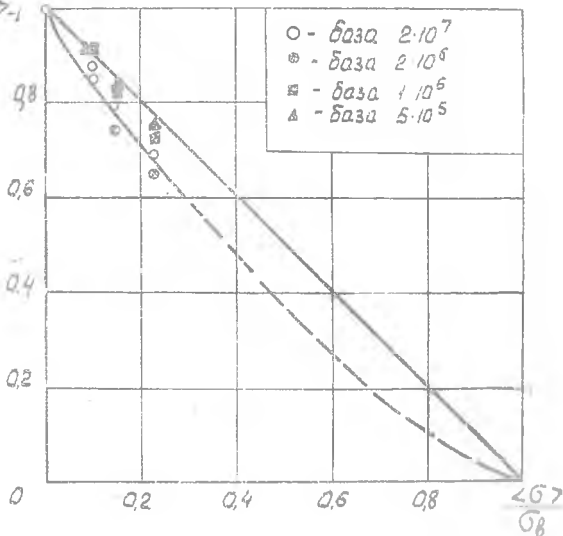
Для сравнения поведения материала в условиях несимметричных процессов с $\langle \sigma \rangle \neq 0$ при программных испытаниях и процессов нагружения с постоянной амплитудой были проведены усталостные

$\sqrt{\langle \sigma^2 \rangle}$ кг/мм²



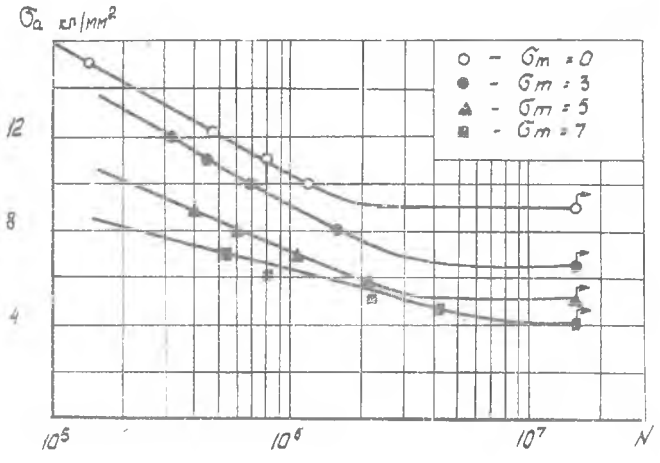
A

$\frac{\sqrt{\langle \sigma^2 \rangle \cdot 1A}}{\sqrt{\langle \sigma^2 \rangle - 1}}$

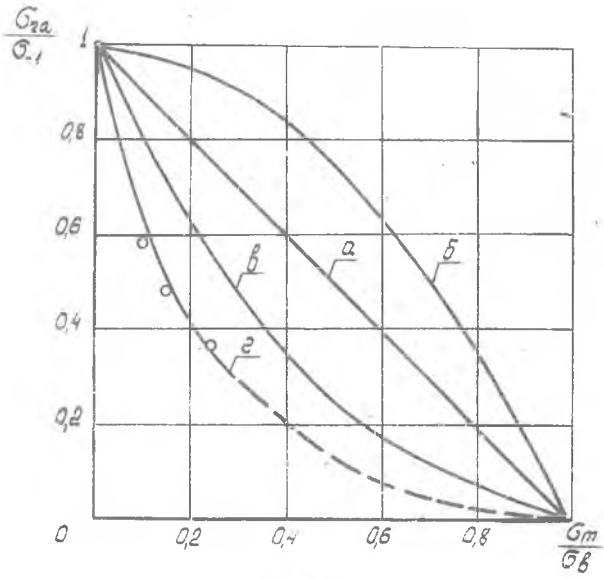


B

Рис. 3



A



B

испытания образцов на описанной выше установке с амплитудами напряжений $\sigma_a = (15; 12; 11; 10)$ кг/мм² при асимметрии $\sigma_m = 0$;

$\sigma_a = (12; 11; 10; 8)$ кг/мм² при асимметрии $\sigma_m = 3$ кг/мм²;

$\sigma_a = (9; 8; 7; 6)$ кг/мм² при асимметрии $\sigma_m = 5$ кг/мм² и $\sigma_a = (7; 6,5; 6,5)$ кг/мм² при асимметрии $\sigma_m = 7$ кг/мм². На каждом

уровне амплитуд напряжений и статических смещений было испытано 6-7 образцов. Результаты испытаний статистически обрабатывались по существующим методикам, учитывающим ограниченность выборки.

Пределы усталости материала σ_{-1} при нагружении с постоянной амплитудой также вычислялись аналитически и были равны $\sigma_{\sigma a} = (9; 6,3; 5,3; 4)$ кг/мм² для смещений $\sigma_m = (0; 3; 5; 7)$ кг/мм².

На основе полученных данных были построены кривые усталости (рис. 4а), по которым в свою очередь получена зависимость $\frac{\sigma_{\sigma a}}{\sigma_{-1}} = f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right)$ (рис. 4в), где коэффициент асимметрии лежал в диапазоне $r = (-1 - 0)$. Для сравнения приведены зависимости, рекомендуемые Гудманом (кривая а рис. 4в), -

$$\sigma_{\sigma a} = \sigma_{-1} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right), \quad (3)$$

Гербергом (4в, б) -

$$\sigma_{\sigma a} = \sigma_{-1} \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right)^2\right] \quad (4)$$

и (4в, в), предлагаемые в работах [6, 7]:

$$\sigma_{\sigma a} = \sigma_{-1} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right)^2. \quad (5)$$

Сравнение кривых указывает, что ни одна из приведенных зависимостей (а), (б), (в) не обеспечивает удовлетворительного совпадения расчета с экспериментом. В результате аппроксимации кривой (4в, г) для сплава АМГ-6 предлагается более точная зависимость.

$$\sigma_{\sigma a} = \sigma_{-1} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right)^4. \quad (6)$$

В выражениях (2), (6) значения коэффициентов получены на основе аппроксимаций по методу наименьших квадратов.

Л и т е р а т у р а

1. Гриненко Н.И., Шефер Л.А., Амелин В.И., Шулепов Ю.Т. Реализация программных испытаний на долговечность. Сб. "Статистические методы расчетов на прочность", вып. 4, г. Свердловск, 1970.
2. Болотин В.В. Применение методов теории вероятности и теории надежности в расчетах сооружений. М., Стройиздат, 1971.
3. Грингауз Г.Д. О программировании усталостных испытаний. "Заводская лаборатория" № 10, 1961.
4. Амелин В.И., Гриненко Н.И., Шефер Л.А. И исследование некоторых вопросов программированных усталостных испытаний. "Заводская лаборатория" № 10, 1972.
5. Гриненко Н.И., Шефер Л.А., Шулепов Ю.Т. Аналитическое определение предела выносливости материалов по кривой усталости при случайном нагружении. Сб. "Статистические методы расчетов на прочность", г. Свердловск, 1972.
6. Форрест. Усталость металлов. М., "Машиностроение", 1968.
7. Редковец Н.Ф. Исследование усталостной прочности самолетных деталей типа сварных соединений. Сб. "Прочность и долговечность авиационных конструкций", вып. 3, Киев, 1969.