

А. С. МОСТОВОЙ, Э. И. МИНОРАНСКИЙ, А. А. ЧУРАКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

подавляющее большинство испытаний проводятся в настоящее время с образцами. Поведение конструкций при динамическом нагружении и, в особенности, при действии случайной нагрузки мало изучено. В частности большой интерес представляют низкочастотные нагрузки ($f=0-20$ гц), имеющие место при полёте в спокойном воздухе, взлёте и посадке и других видах нагружения.

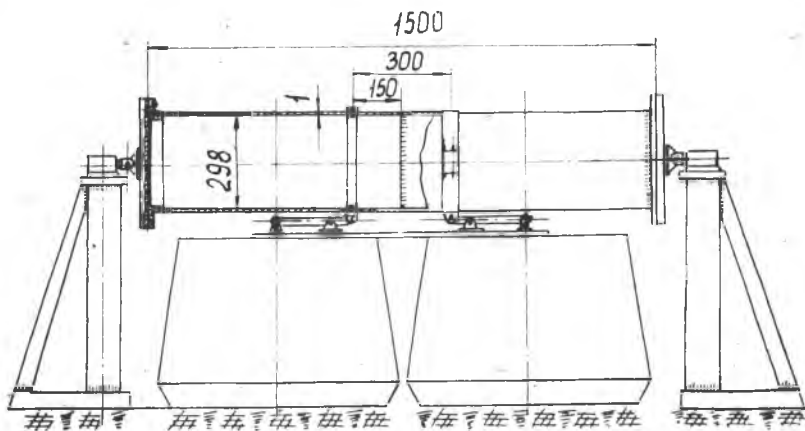
На кафедре прочности летательных аппаратов Куйбышевского авиационного института были проведены испытания с целью получения кривых усталости для простой конструкции-оболочки при гармоническом и случайном нагружении в инфранизком диапазоне частот. Кроме того, имелось в виду установление связи между этими кривыми, позволяющей приближенно оценить долговечность при случайном нагружении по известной долговечности при гармоническом нагружении.

Исследуемая оболочка (фиг. 1) изготовлена из листового материала АМГ, толщиной 1 мм, закатанного в цилиндр. Продольный сварной шов располагается на нейтральной оси. Две обечайки, из которых состоит оболочка, соединяются по окружности посредством автоматической сварки.

Экспериментальная установка состоит из двух электродинамических вибраторов (ЭДВ), воспроизводящих случайный сигнал, сформированный в моделирующем устройстве. Их описание изложено в работе [5].

Нагрузка на оболочку передаётся через хомуты. В месте приложения нагрузки обечайка подкреплена шпангоутами из листового материала АМГ толщиной 2 мм, приваренными к оболочке точечной сваркой. Оболочка шарнирно оперта так, что шарниры обладают свободой перемещения вдоль оси, что исключает возможность возникновения осевых сил.

Схема размещения оболочки на стендах показана на фиг. 1. Перемещению оболочки $\Delta=1$ мм в месте приложения силы соответствует наибольшее номинальное напряжение $\sigma_{\max} =$



Фиг. 1.

5,15 кг/мм². Эксперимент проводился при трёх уровнях напряжений (см. таблицу 1).

Таблица 1

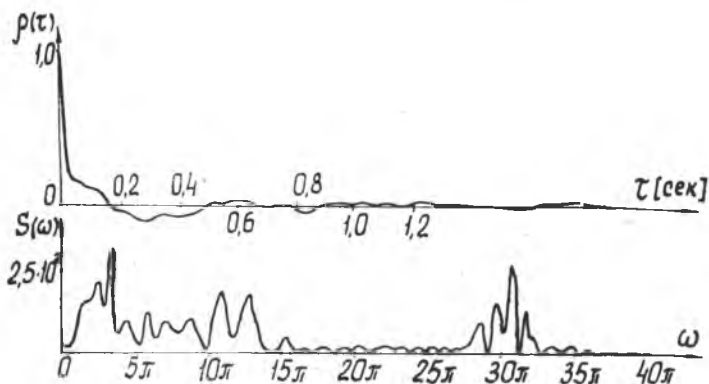
№ уровня	Гармоническая нагрузка		Случайная нагрузка
	$\sigma_{\text{ном}}$, кг/мм ²	Δ , мм	$\bar{\sigma}$ (с. к. о.), кг/мм ²
1	6,2	1,2	2,82
2	852	1,6	3,56
3	10,3	2,0	4,12

На каждом уровне испытывалось не менее двух оболочек. Для гармонической нагрузки была выбрана частота 10 герц. Цикл гармонического нагружения — симметричный ($\sigma_m = 0$), случайный процесс — стационарный, эргодический, диапазон частот 0 ÷ 20 гц. Корреляционная функция и спектральная плотность процесса показаны на фиг. 2.

При проведении эксперимента фиксировался момент появления трещины и осуществлялся непрерывный визуальный контроль за её развитием. С помощью двух тензодатчиков, наклеенных на оболочку вдоль образующей (по оси x) и перпендикулярно к ней (по оси y), периодически производилась запись деформаций, которые затем переводились в напряжения по формуле:

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \mu_x^2} (\epsilon_x + \mu \epsilon_y). \quad (1)$$

Датчики были наклеены вдоль верхней и нижней образующих оболочки на расстояниях 45 мм и 350 мм от сварного шва. Испытания при гармоническом нагружении проводились в условиях фиксированных значений амплитуды перемещения стола ЭДВ. При случайном нагружении поддерживалась постоянная дисперсия перемещения стола ЭДВ. В связи с этим по мере роста тре-



Фиг. 2.

шины и падения жёсткости оболочки уменьшалась сила, приложенная к ней. Оценка изменения силы в зависимости от длины трещины проводилась по методике, изложенной в работе [6].

Замеряя с помощью датчиков напряжения σ в неповреждённом сечении оболочки в начале эксперимента ($t=0$) и в текущий момент времени t , а также замеряя в эти же моменты времени напряжения σ_p в контрольной балочке, получаем значения γ :

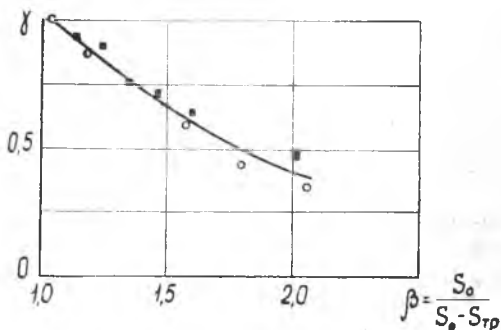
$$\gamma = \frac{(\sigma/\sigma_p)_t}{(\sigma/\sigma_p)_0} = \frac{P_t}{P_0}. \quad (2)$$

Величина γ характеризует падение силы $P_t = \gamma P_0$ в процессе испытаний.

Зависимость γ от $\beta = \frac{S_0}{S_0 - S_{тр}}$ показана на фиг. 3.

Здесь S_0 , $S_{тр}$ — периметр оболочки и длина трещины соответственно.

Следует отметить значительный разброс времени появления трещины и долговечности для номинально идентичных



Фиг. 3.

оболочек, изготовленных по одной технологии. Это можно объяснить следующими причинами:

1) Наличием ручной подварки сварного шва (после автоматической сварки) в связи с прожогами из-за малой толщины листа.

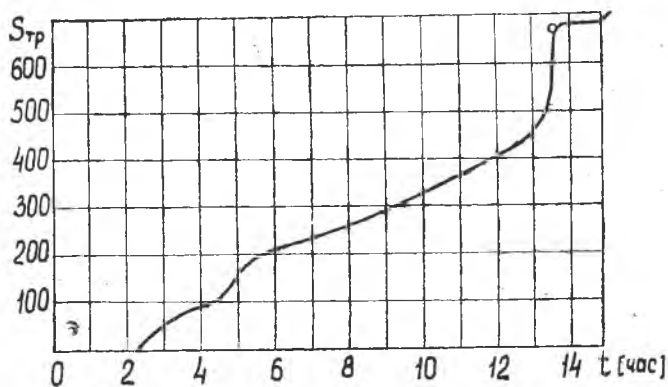
2) Наличием различных переходов от шва к листу (из-за ручной подварки), что, как известно, сильно влияет на коэффициент концентрации.

3) Наличием остаточных напряжений, возникающих вследствие сварки, а также при подгонке двух обечаек для сварки.

4) Наличием ступенчатых участков шва из-за разных диаметров свариваемых обечаек.

5) Высокой чувствительностью материала АМГ к тепловым воздействиям, имеющим место во время сварки.

Кривая роста трещины для оболочки при случайном нагружении ($\bar{\sigma} = 4,12 \text{ кг/мм}^2$) изображена на фиг. 4. Обращает на себя внимание характерное для всех оболочек (за исключением двух, испытанных при высоком уровне напряжений $\bar{\sigma} = 10,3 \text{ кг/мм}^2$) замедление и даже прекращение роста трещины.



Фиг. 4.

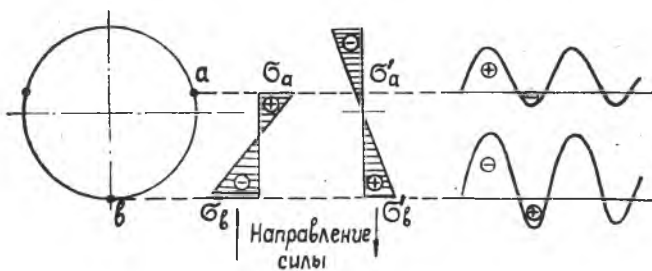
Здесь сказываются следующие факторы:

1) В условиях испытаний при фиксированных прогибах оболочки происходит непрерывное падение внешней силы по мере развития трещины, что снижает скорость её развития.

2) Несимметричное развитие трещины, обусловленное неоднородностью сварного шва, приводит к изменению геометрии сечения, в результате чего могут уменьшаться наибольшие напряжения и может замедляться рост трещины.

3) Как при симметричном, так и при несимметричном росте трещины в результате смыкания краёв трещины в сжатой зоне

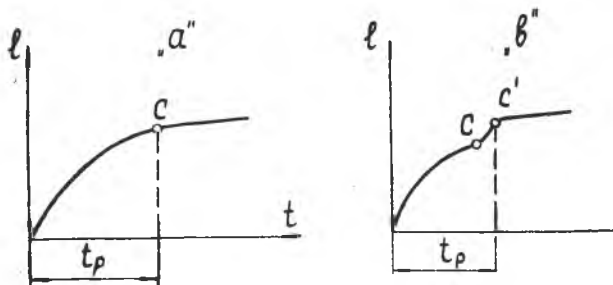
имеют место несимметричные циклы нагружения (фиг. 5). Такое нагружение, по сравнению с симметричными циклами с амплитудами σ_a и σ_b приводит к уменьшению скорости распространения трещины.



Фиг. 5.

4) При значительной длине трещины возможна местная потеря устойчивости оболочки, что приводит к изменению напряжённого состояния оболочки.

Указанные факторы проявляются при достаточно большой трещине. Если при этом в точке c (фиг. 6) кривой $S_{тр}(t)$ не наступил быстрый рост трещины (что имеет место при малых уровнях напряжений), то кривая $S_{тр}(t)$ имеет вид, изображённый на фиг. 6а. Если же в точке c имеет место быстрый рост трещины, то



Фиг. 6.

эти факторы проявляются по достижении трещиной некоторой величины и замедление роста трещины наступает в точке c' (фиг. 6в). В связи с этим за время разрушения оболочки принято было время до начала участка стабилизации трещины (t_p).

Кривые усталости (зависимости $\sigma - \lg T$) были построены на основе метода наименьших квадратов. В двойных логарифмических координатах кривые усталости для гармонической нагрузки (фиг. 7) описываются линейными уравнениями:

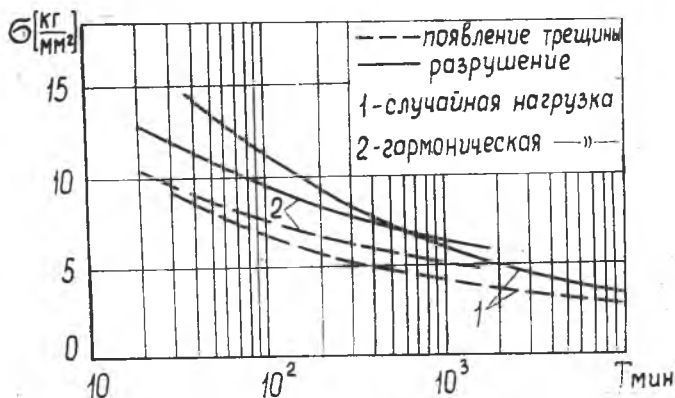
для кривой усталости по трещине

$$\lg T_{тр} = 5,642 - 4,26 \lg \sigma, \quad (3)$$

для кривой усталости по разрушению

$$\lg T_p = 7,632 - 5,73 \lg \sigma. \quad (4)$$

Здесь σ — амплитудное напряжение.



Фиг. 7.

Кривые усталости для случайной нагрузки (фиг. 7) построены в координатах $\sigma_{сл} - \lg T$, где $\sigma_{сл} = \sigma\sqrt{2}$. В двойных логарифмических координатах они описываются уравнениями:

для кривой усталости по трещине

$$\lg T_{тр} = 5,93 - 4,66 \lg \sigma_{сл}; \quad (5)$$

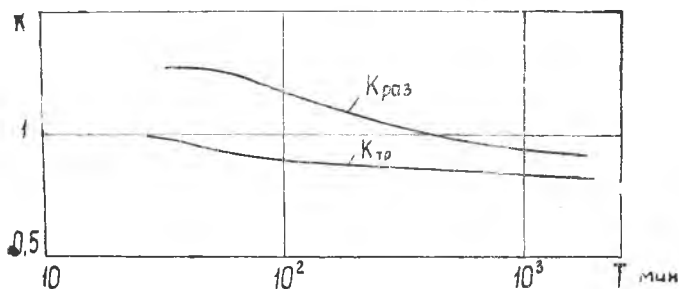
для кривой усталости по разрушению

$$\lg T_p = 5,926 - 3,78 \lg \sigma_{сл}. \quad (6)$$

Из сопоставления кривых усталости для случайной и гармонической нагрузок следует, что для кривых усталости, построенных по моменту появления макротрещины, отношение $\frac{T_{сл}}{T_{гарм}}$ при одинаковых значениях σ и $\sigma_{сл} = \sigma\sqrt{2}$ возрастает с увеличением уровня нагрузки, оставаясь меньше единицы. Для кривых усталости по разрушению аналогичное отношение также возрастает с возрастанием уровня нагрузки, однако, при этом оно может быть как больше единицы (для больших уровней нагрузки), так и меньше единицы (для малых уровней).

Таким образом, при сопоставимых уровнях напряжений трещина раньше возникает при случайном нагружении, однако она развивается более медленно.

Сравнивая напряжения σ и $\sigma_{сл}$, взятые соответственно по кривым усталости для гармонического и случайного нагружения при одинаковых значениях долговечности T , получаем коэффициент эквивалентности $K = \frac{\sigma_{сл}}{\sigma} [I]$. Зависимости коэффициентов $K_{тр} = f(T_{тр})$ для кривой усталости по трещине и $K_p = f(T_p)$ для кривой усталости по разрушению показаны на фиг. 8.



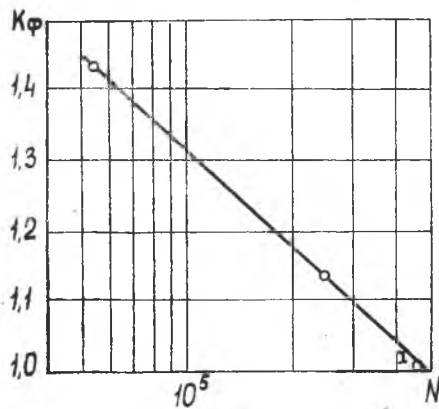
Фиг. 8.

Имея значения коэффициента эквивалентности K можно, проведя усталостные испытания конструкции типа сварной цилиндрической оболочки при гармоническом нагружении, приближённо построить кривую усталости этой же конструкции при случайном нагружении.

Для образцов из АМГ по данным испытаний, проведенных на кафедре прочности летательных аппаратов Куйбышевского авиационного института, коэффициент эквивалентности обладает известной стабильностью и находится в пределах 0,7—1,25 для широкого диапазона долговечности. Можно высказать предположение что для конструкций также может иметь место узкий диапазон изменения коэффициента K_p .

С целью определения возможности форсирования испытаний оболочек при случайном нагружении были проведены испытания их при программном нагружении. Сущность использованного метода форсированных испытаний изложена в работе [4] и сводится к следующему.

На основании статистической обработки записи случайной нагрузки низкого уровня составляется блок про-



Фиг. 9.

граммной нагрузки, эквивалентной заданной случайной. Для этого блока принимаем $K_{\Phi} = 1$. Коэффициент форсирования K_{Φ} представляет собой отношение амплитуд напряжений при форсированных режимах нагружения — σ_i^{Φ} к соответствующим уровням исходной программы — σ_i^0 .

$$K_{\Phi} = \frac{\sigma_i^{\Phi}}{\sigma_i^0}. \quad (7)$$

Значения нагрузок каждой ступени блока увеличиваются в K_{Φ} раз, а число циклов на соответствующих ступенях остаётся неизменным.

Испытания проводятся при коэффициентах форсирования $K_{\Phi} > 1$, поэтому разрушение происходит, естественно, раньше, чем при испытании по исходной программе ($K_{\Phi} = 1,0$).

На основе результатов этих испытаний строится график $K_{\Phi} = f(N)$ в полупологарифмической системе координат (фиг. 9). При испытании нескольких идентичных образцов (конструкций) график строится по 50% значениям вероятности. Зависимость между K_{Φ} и $\lg N$ примерно линейная. Экстраполируя полученную функцию $K_{\Phi} = f(\lg N)$ до значения $K_{\Phi} = 1$, получаем долговечность образца (элемента конструкции), соответствующую исходной программе нагружения.

За исходную нами была принята программа с максимальной амплитудой $A_{\max} = 3,8$ мм. Как следует из фиг. 9, совпадение экспериментального значения долговечности при случайной нагрузке (точка *a*), соответствующей исходной программной нагрузке, и значения долговечности, полученной экстраполированием прямой $K_{\Phi}(\lg N)$, хорошее.

Следует отметить, что этот метод дает значение долговечности с некоторым запасом, т. е. фактическая долговечность оказывается несколько выше расчетной.

ВЫВОДЫ

1. Отмечено значительное различие значений долговечности и времени появления трещины для номинально идентичных оболочек, что связано в значительной мере с качеством сварного шва.

2. Отмеченное при испытаниях замедление (иногда прекращение) роста трещины может быть объяснено падением внешней нагрузки по мере роста трещины, несимметричным развитием ее и появлением несимметричных циклов нагружения.

3. При сопоставимых уровнях нагрузки трещина в оболочке при гармоническом нагружении появляется позже, чем при случайном нагружении, но развивается быстрее.

4. В первом приближении долговечность конструкции типа

сварной цилиндрической оболочки при случайной нагрузке может быть определена по результатам испытаний ее при гармонической нагрузке с помощью коэффициента эквивалентности $K = \frac{\sigma_{сл}}{\sigma}$.

5. Форсированные программные испытания оболочек достаточно надежно обеспечивают определение их долговечности для случайных нагрузок низкого уровня.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Исаев. Экспериментальные исследования усталости при случайном нагружении. Труды МАТИ, вып. 61, 1964.
 2. В. П. Коганов. Методы статистической обработки результатов усталостных испытаний, «Заводская лаборатория», № 5, 1957.
 3. Я. Б. Фридман. Испытание деталей машин на прочность, Машгиз, 1960.
 4. Ю. С. Урбанский. Метод форсирования усталостных испытаний при программном нагружении, Труды КИИГВФ, вып. 2, Киев, 1965.
 5. Х. С. Хазанов, Б. А. Лавров, В. И. Иванченко, М. А. Петровичев. Исследование влияния формы спектральной плотности стационарной случайной нагрузки на усталостную прочность образцов сплава Д16АТ и стали 30ХГСА. Труды КуАИ, вып. 29, 1967.
 6. А. С. Мостовой, Б. А. Лавров. Влияние усталостной трещины на изгибную жесткость образца, Труды, КуАИ, вып. 29, 1967.
-