

А. С. МОСТОВОЙ, Л. К. ФРОЛОВА, Н. И. ГАДАЛИН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КРУГЛЫХ ОБРАЗЦОВ, РАБОТАЮЩИХ НА ИЗГИБ И НА КРУЧЕНИЕ ПРИ ПРОГРАММНОЙ НАГРУЗКЕ

Рассмотрим вопрос об определении долговечности круглых сплошных образцов из стали 30ХГСА (рис. 1) при программном нагружении*.

В основу принятого метода расчета положим представления о механизме усталостного разрушения, изложенные в работе [1].

Заменяя случайный процесс изменения напряжений эквивалентным в смысле долговечности программным процессом и рассматривая его как совокупность чередующихся гармонических нагрузок различных уровней, можем для определения долговечности при программной нагрузке использовать методику, изложенную в [2].

Блок программной нагрузки формируется по характеристикам случайного процесса, полученным методом положительных макси-

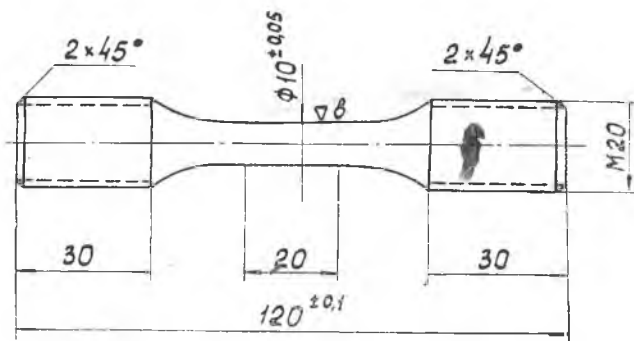


Рис. 1.

* Расчет долговечности таких образцов при гармоническом нагружении помещен в междувузовском сборнике трудов «Вопросы расчета прочности летательных аппаратов».

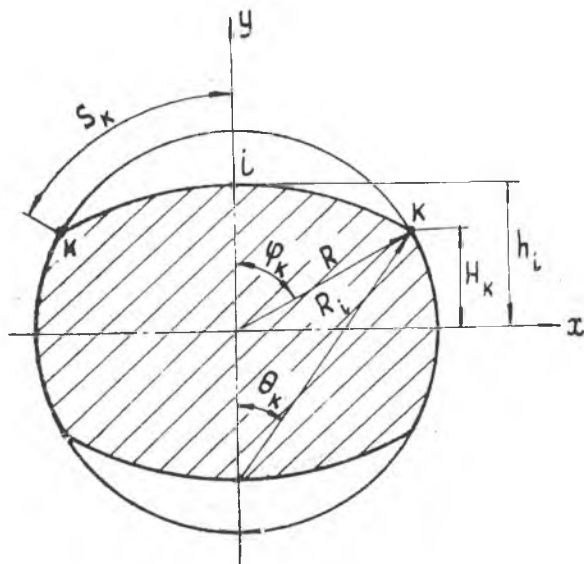


Рис. 2.

мумов [3]. В работе [2] приведены формулы для определения величин $\frac{dt}{ds}$ и $\frac{dt}{dh}$, обратных скоростям распространения трещины вдоль координат s_k и h_i (рис. 2):

$$\left(\frac{dt}{ds}\right)_k = -\frac{1}{\Delta s_k e^{x_{(k+1)\bar{\nu}}}} \left[\sum_{\nu=1}^{\nu_{t_0}} t_{\nu} (e^{x_{(k+1)\nu}^0} - e^{x_{k\nu}^0}) + \sum_{n=1}^k \left(\frac{dt}{ds}\right)_{n-1} (e^{x_{(k+1)\bar{\nu}}^n} - e^{x_{k\nu}^n}) \Delta s_{n-1} \right]; \quad (1)$$

$$\left(\frac{dt}{dh}\right)_i = -\frac{1}{\Delta h_i e^{x_{(i+1)\bar{\nu}}}} \left[\sum_{\nu=1}^{\nu_{t_0}} t_{\nu} (e^{x_{(i+1)\nu}^0} - e^{x_{i\nu}^0}) + \sum_{n=1}^i \left(\frac{dt}{dh}\right)_{n-1} (e^{x_{(i+1)\bar{\nu}}^n} - e^{x_{i\nu}^n}) \Delta h_{n-1} \right]. \quad (2)$$

Здесь ν и $\bar{\nu}$ — порядковый номер уровня нагружения соответственно до и после появления трещины, отсчитанный от начала нагружения;

$$x_{k\nu}^n = b\sigma_{k\nu}^n - a, \quad x_{i\nu}^n = b\sigma_{i\nu}^n - a;$$

$\sigma_{k\nu}^n, \sigma_{i\nu}^n$ — напряжение в волокнах $k(i)$ в момент разрушения волокна n ; t_0 — время до разрушения первого волокна (до появления трещины).

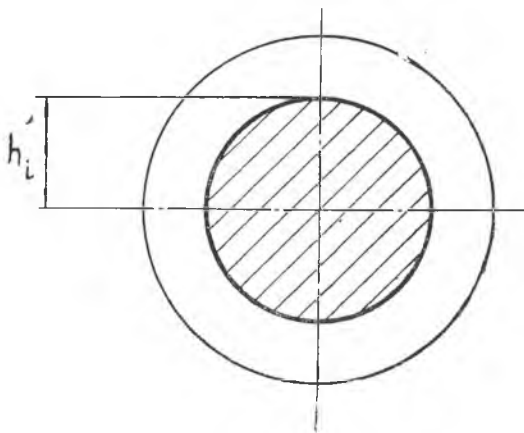


Рис. 3.

Для изгиба линия фронта распространения трещины представлена на рис. 2. Производные $\left(\frac{dt}{ds}\right)_R$ и $\left(\frac{dt}{dh}\right)_i$ определяются по формулам (1) и (2). Вид поврежденного сечения при кручении изображен на рис. 3. Здесь линия фронта трещины определяется одной координатой h_i . Величина, обратная скорости распространения трещины $\left(\frac{dt}{dh}\right)_i$, определяется в этом случае по формуле (2).

Время до разрушения волокна $i(k)$:

$$t_i = \int_R^{h_i} \left(\frac{dt}{dh}\right)_i dh_i \quad (3)$$

$$t_k = \int_0^{s_k} \left(\frac{dt}{ds}\right)_R ds_k \quad (4)$$

Время распространения трещины t_p до разрушения образца определится из выражения (3) или (4) при $h_i = h_p$ или $s_k = s_p$ в зависимости от того, в каком волокне i или k раньше появится разрушающее напряжение — истинное временное сопротивление $\sigma_{вист}$.

Долговечность образца

$$T = t_0 + t_p \quad (5)$$

Расчет долговечности образцов при программной нагрузке по формулам (1), (2) требует вычисления большого числа производных, так как они определяются для каждой ступени блока программной нагрузки, продолжительность которой может быть равна нескольким секундам.

Учитывая линейное накопление повреждения для волокна, время появления трещины t_0 определим из выражений:

$$t_0 = \frac{1}{D_8} t_8, \quad (6)$$

$$D_8 = \sum_1^v \frac{n_v}{N_v}, \quad (7)$$

где D_8 — повреждение за один блок (рассматривается период времени до появления трещины); n_v — число циклов v -й ступени блока; N_v — разрушающее число циклов при напряжениях σ_v ; t_8 — продолжительность программного блока.

Определение долговечности образцов при программной нагрузке может быть упрощено, если блок программной нагрузки заменить эквивалентной гармонической нагрузкой. При этом напряжение симметричного цикла, эквивалентное программной нагрузке, можно определить по времени появления трещины ($\sigma_{\text{ЭКВ}}^0$, $\tau_{\text{ЭКВ}}^0$), по времени распространения трещины ($\sigma_{\text{ЭКВ}}^P$, $\tau_{\text{ЭКВ}}^P$) и по общей долговечности ($\sigma_{\text{ЭКВ}}^T$, $\tau_{\text{ЭКВ}}^T$).

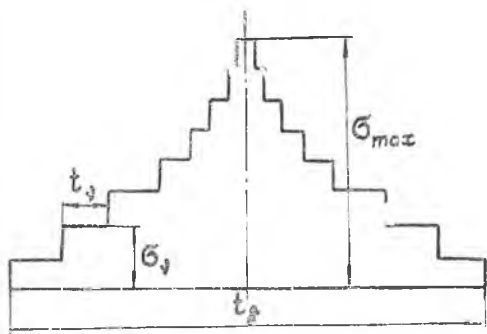
Так как закономерности накопления повреждений на первой и второй стадиях усталости различны, то, очевидно, будет иметь место неравенство упомянутых эквивалентных напряжений

$$\sigma_{\text{ЭКВ}}^0 \neq \sigma_{\text{ЭКВ}}^P \neq \sigma_{\text{ЭКВ}}^T; \quad \tau_{\text{ЭКВ}}^0 \neq \tau_{\text{ЭКВ}}^P \neq \tau_{\text{ЭКВ}}^T.$$

Эквивалентное гармоническое напряжение по времени появления трещины $\sigma_{\text{ЭКВ}}^0$ для изгиба и $\tau_{\text{ЭКВ}}^0$ для кручения находим, пользуясь кривой усталости по трещине, которая представляет собой экспериментально полученную для вероятности $P=0,5$ зависимость числа циклов гармонического нагружения до появления трещины (до разрушения первого волокна) от номинального напряжения*.

Для определения эквивалентного напряжения по времени распространения трещины ($\sigma_{\text{ЭКВ}}^P$ или $\tau_{\text{ЭКВ}}^P$) пользуемся кривыми повреждаемости $\bar{F}_{\Pi}(t) = \frac{F_{\Pi}}{F_0}$ для уровней гармонической нагрузки, соответствующих ступеням блока программной нагрузки [1, 2]. Здесь F_{Π} — поврежденная площадь образца (площадь, занятая трещиной).

Очевидно, что если имеется эквивалентность гармонической и программной нагрузки на интервале времени kt_6 , то она имеется и на интервале одного блока t_6 в силу периодичности блоков программной нагрузки. При этом может быть рассмотрен любой участок кривых повреждаемости, в том числе и начальный.



Симметричный 16-ступен-

Рис. 4.

* Эта кривая может быть дана в истинных напряжениях.

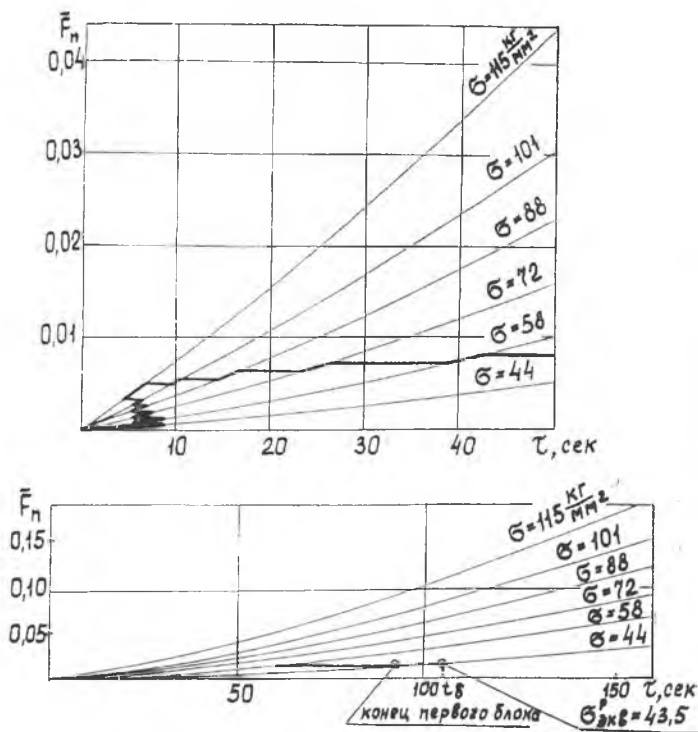


Рис. 5.

чатый блок программной нагрузки изображен на рис. 4.

Начальные участки кривых повреждаемости представлены на рис. 5 для изгиба и рис. 6 — для кручения. Уровни напряжений ниже предела усталости отброшены.

Определение напряжения, эквивалентного по времени распространения трещины, производим в следующем порядке.

На кривых повреждаемости для каждого уровня откладываем продолжительность t_0 соответствующей ступени блока; получаем относительную поврежденную площадь $\Delta \bar{F}_n$. Переход с одного уровня нагружения на другой происходит при постоянной относительной поврежденной площади \bar{F}_n . Затем на новом уровне откладываем значение t_1 для новой ступени и получаем новое значение $\Delta \bar{F}_n$ и т. д.

Найдя таким образом относительную поврежденную площадь $\bar{F}_n = \sum \Delta \bar{F}_n$ за 1 блок, на сетку кривых повреждаемости $\bar{F}_n(t)$ наносим точку с координатами \bar{F}_n, t_0 (рис. 5, ~~6~~). Значение $\sigma_{\text{экв}}$ ($\tau_{\text{экв}}$) определяем интерполяцией.

Время распространения трещины t_0 получим по кривой усталости для найденного уровня гармонической нагрузки $\sigma_{\text{экв}}$ ($\tau_{\text{экв}}$).

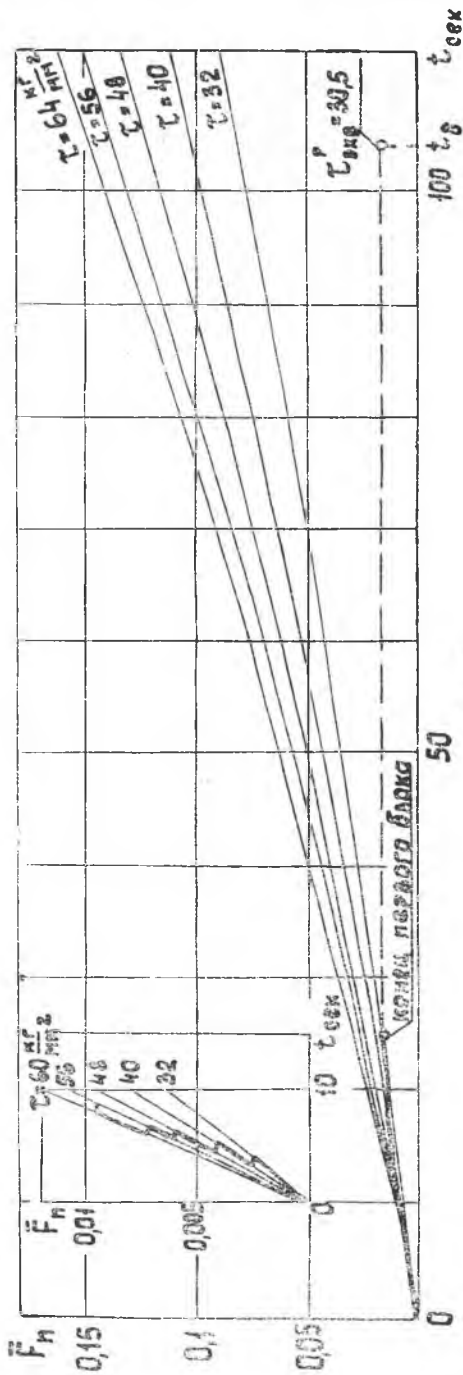


Рис. 6.

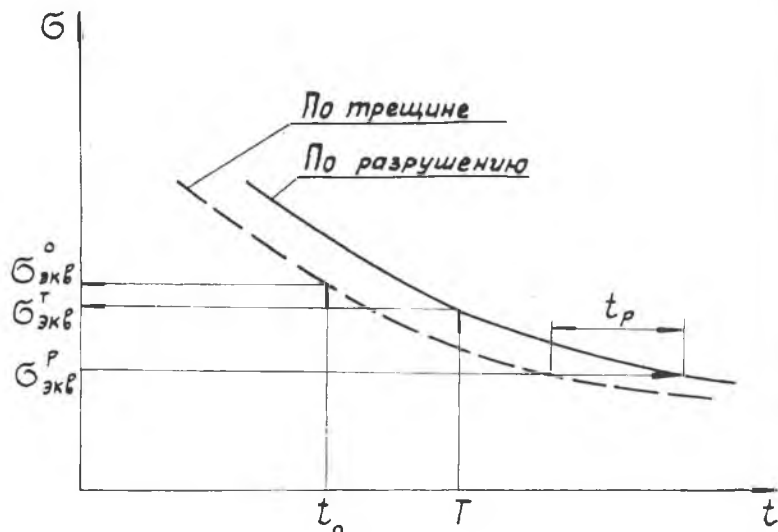


Рис. 7.

Значение эквивалентного по общей долговечности напряжения $\sigma_{\text{экв}}^T$ ($\tau_{\text{экв}}^T$) находим по кривой усталости для времени $T = t_0 + t_p$ и соответствующему ему числу циклов. Схема определения $\sigma_{\text{экв}}^0$, t_p и $\sigma_{\text{экв}}^P$ показана на рис. 7. Аналогично определяются $\tau_{\text{экв}}^0$, t_p , $\tau_{\text{экв}}^P$ для кручения.

Рассмотрим результаты расчетов долговечности при изгибе и кручении образца и сравним их с данными эксперимента.

Изгиб. Параметры 16-ступенчатого симметричного блока для нагружения образца изгибом сведены в табл. 1:

Таблица 1

№ ступени	1	2	3	4	5	6	7	8
$\sigma_{\text{в}} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	16	30	44	58	72	88	101	115
$t_{\text{в}} \text{ сек}$	22	11	9	4	2	2	1	1

Продолжительность блока $t_0 = 104 \text{ сек}$.

Повреждение D_{σ} за один блок программной нагрузки до появления трещины и время t_0 появления трещины определяем по формулам (6) и (7). $D_{\sigma} = 14,417 \cdot 10^{-3}$; $t_0 = 120 \text{ мин}$.

По кривой усталости по трещине (рис. 8, сплошная линия), получим эквивалентное гармоническое напряжение по времени появления трещины $\sigma_{\text{экв}}^0 = 76,5 \text{ кг/мм}^2$.

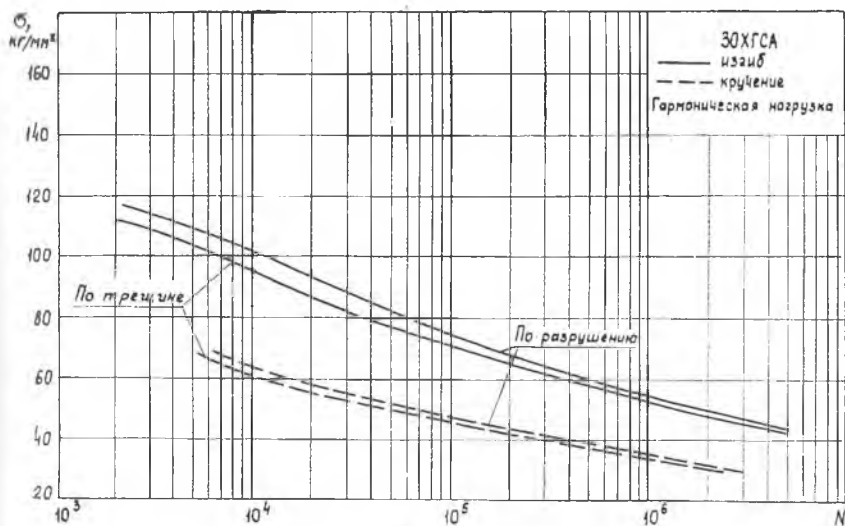


Рис. 8.

Определяя поврежденную площадь \bar{F}_n за один блок программной нагрузки (рис. 5), находим значение $\sigma_{\text{экв}} = 43,5 \text{ кг/мм}^2$. Этому эквивалентному напряжению для гармонической нагрузки соответствует время распространения трещины $t_p = 150 \text{ мин}$ (кривые усталости, рис. 8, сплошная линия). Общей долговечности $T = t_0 + t_p = 270 \text{ мин}$ соответствует напряжение $\sigma_{\text{экв}} = 70 \text{ кг/мм}^2$, полученное по кривой усталости (рис. 8, сплошная линия). В табл. 2 представлены расчетные и экспериментальные данные для рассмотренного блока программной нагрузки (вероятность $P = 0,5$).

Таблица 2

	$t_{0\text{мин}}$	$t_{p\text{мин}}$	$T_{\text{мин}}$
Расчетные значения	120	150	270
Эксперимент	109	104	213

Кручение. Параметры программного блока для испытания образцов на кручение даны в табл. 3.

Продолжительность блока $t_0 = 104 \text{ сек}$.

Повреждение за один блок программной нагрузки и время появления трещины соответственно равны $D_0 = 4,282 \cdot 10^{-3}$, $t_0 = 405 \text{ мин}$.

Значения $\tau_{\text{экв}}^0$, t_p , $\tau_{\text{экв}}^T$ определены с помощью кривых усталости (рис. 8 пунктирные линии).

№ ступени	1	2	3	4	5	6	7	8
$\tau_0, \text{кг/мм}^2$	8	16	24	32	40	48	56	64
$t_0, \text{сек}$	22	11	9	4	2	2	1	1

Эквивалентное гармоническое напряжение по времени появления трещины получилось равным $\tau_{\text{экр}}^0 = 40,6 \text{ кг/мм}^2$. На рис. 6 показано определение эквивалентного гармонического напряжения по времени распространения трещины $\tau_{\text{экр}}^1 = 30,5 \text{ кг/мм}^2$, которому соответствует время $t_p = 50 \text{ мин}$. Общая расчетная долговечность $T = t_0 + t_p = 455 \text{ мин}$. Эквивалентное гармоническое напряжение по общей долговечности $\tau_{\text{экр}}^T = 41,5 \text{ кг/мм}^2$. Расчет проведен для вероятности $P = 0,5$. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных представлено в табл. 4.

Таблица 4

	$t_{\text{оми}}$	$t_{\text{рми}}$	$T_{\text{ми}}$
Расчетные значения	405	50	455
Эксперимент	231	60	291

ВЫВОДЫ

1. Значения долговечности образцов, полученные расчетом с помощью кривых повреждаемости и кривой усталости по трещине (если учесть разброс и пятидесятипроцентную вероятность их определения) удовлетворительно совпали с экспериментом.

2. Эквивалентные гармонические напряжения по времени появления трещины, по времени распространения трещины и по общей долговечности различны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мостовой А. С. Определение долговечности образца на основе некоторых представлений о механизме усталостного разрушения. Труды КуАИ, вып. 39, Куйбышев, 1968.
2. Мостовой А. С. Расчет долговечности образца при программной (случайной) нагрузке. Труды КуАИ, вып. 48, Куйбышев, 1971.
3. Ковалевский Дж. О соотношении между усталостной долговечностью при повторных нагрузках со случайным чередованием амплитуд и при соответствующих программных нагрузках. Сб. «Усталостная прочность и долговечность самолетных конструкций», «Машиностроение», 1965.
4. Одинг И. А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. Машгиз, 1963.