

МАШИНОСТРОЕНИЕ

А. В. КОНОВАЛОВ, С. А. ГАСПАРЯН

ОБ ОЦЕНКЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ПРИ  
 НЕСТАЦИОНАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

В последнее время стали получать распространение расчетные методы оценки долговечности при сложных условиях изменения амплитуды напряжения, которые базируются на скорректированной гипотезе линейного суммирования повреждений. Аналитическое описание этой гипотезы при непрерывном изменении амплитуд напряжений в общем виде может быть представлено [1] зависимостью:

$$\lambda \int_0^a \frac{dn}{N} = a, \quad (1)$$

где  $a$  — мера суммарного накопления повреждения в механическом представлении, учитывающая упрочнение и разупрочнение металла в процессе усталостных испытаний (величина  $a$  является интегральной результирующей характеристикой, отражающей конечный итог взаимодействия различных процессов, происходящих в металле при нестационарном переменном нагружении [2]);

$\lambda$  и  $n$  — предельное и текущее числа циклов изменения напряжений, соответствующие уровню  $\sigma$ ;

$n_0$  и  $l$  — число циклов изменения напряжений в одном блоке и число блоков соответственно.

При  $a = 1$  выражение (1) соответствует простой линейной гипотезе суммирования повреждений, предложенной в [3] на основе представления о равномерно возрастающем накоплении усталости. При этом не учитывалось влияние различных факторов, связанных как с особенностями конструкции детали, так и собственно режима нагружения и интенсивности этого процесса. Отклонение от простой линейности суммирования в пределах  $0,5 \leq a < 2$ , полученное в ряде исследований, трактовалось как появления статистической природы усталости. Однако, указанные результаты обычно соответствуют мягким режимам нагружения, когда амплитуда напряжений варьируется в сравнительно узких пределах.

При плавном изменении напряжений можно получить значения  $\alpha$  и больше 2 (до 4–5), но даже широкое варьирование параметров режима (4) не приводит к минимальным значениям  $\alpha$ , меньшим 0,5–0,7. Эта количественная оценка может быть дополнена анализом пространственной изменчивости  $\alpha$  в зависимости от параметров нагружения (см. рис. 1), когда удается показать закономерный характер изменения величины меры накопления повреждений.

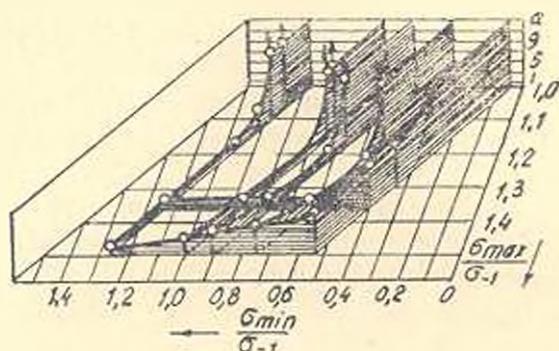


Рис. 1. Пространственная диаграмма изменения величины  $\alpha$  для стали 45.

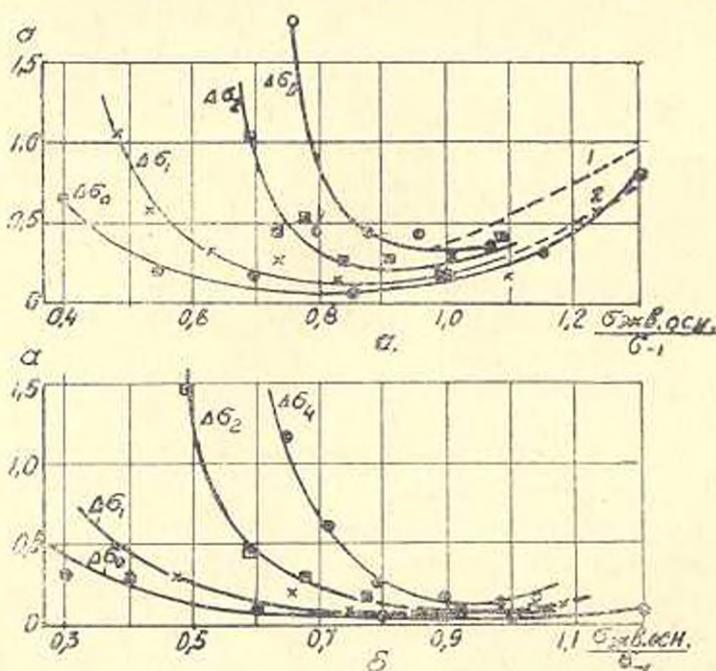


Рис. 2. Зависимость  $\alpha$  от  $\sigma_{2, экв. осн} / \sigma_{-1}$ : а) для стали 45; б) для стали 40X.

Расширение полосы нагружения, как, например, при спектрах с пиковыми кратковременными перегрузками, приводит к значениям  $\alpha = 0,1 - 0,2$  и менее, что тем более не может быть объяснено лишь одной статистической природой усталости. На рис. 2 показана

зависимая связь величины  $a$  с условиями нагружения в случае приложения пиковых перегрузок на основной спектр. В то же время приведенные данные не противоречат статистической природе усталости, вызванной структурной неоднородностью материала, наличием различных фаз и включений, искажениями кристаллической решетки и др. Они позволяют рассматривать накопленное повреждение в более широком смысле, как состоящее из двух составляющих: случайной и детерминированной, что помогает устранить кажущиеся противоречия о различной природе  $a$  и обоснованно подходить к оценке гипотезы суммирования повреждений. Следует лишь иметь в виду, что представление о случайной составляющей меры накопленного повреждения существенно зависит от вероятностной модели, выбранной или построенной для отражения свойств случайного процесса усталости. Аналитические поиски в этом направлении в ряде случаев приближаются к данным экспериментальных исследований, не объясняя, однако, некоторых результатов, важных и для практических приложений.

Преимущество же экспериментальных методов проявляется не только применительно к практическим задачам исследования. Эти методы, несмотря на большую трудоемкость, позволяют выявлять результирующие эффекты сопротивления усталости. Основываясь на экспериментальных данных о зависимости величины среднего квадратичного отклонения логарифма долговечности  $S(\lg n)$  от самого логарифма  $\lg n$ , обработанных в [5] для конструкционных сталей, и, используя предложенный в [5] метод, можно получить нижнюю оценку дисперсии величины  $a$ .

В предположении справедливости линейной гипотезы, когда среднее значение  $\bar{a} = 1$  и  $\lg \bar{a} = 0$ , при экспериментальном определении величины  $\bar{a}$  ( $n = 20$  образцов на вариант) интеграл возможных случайных колебаний  $\bar{a}$  вследствие рассеяния величин долговечности составит  $0,8 < \bar{a} < 1,6$  для значений  $S(\lg n) = 0,1 + 0,2$ , чаще всего встречающихся при испытании образцов из конструкционных сталей.

По обширным экспериментальным данным [6], обработанным в [5] для стальных образцов, значения  $a_{\text{эсп}} = 0,75 - 1,19$ , что вполне соответствует сделанной оценке случайных колебаний  $\bar{a}$  и позволяет величину  $a$ , превышающие приведенные, отнести к детерминированным отклонениям. Таким образом, экспериментально подтверждается целесообразность рассмотрения суммы накопленного повреждения в виде двух составляющих: случайной и детерминированной. Уточнение расчетных значений величины  $a$  требует изучения каждой из этих составляющих.

Изучение детерминированной составляющей меры накопленного повреждения позволяет оценить влияние параметров режимов нагружения на сопротивление усталости. В связи с этим одной из важнейших задач по изучению сопротивления усталости следует считать накопле-

ние данных о реальной нагруженности оборудования в течение длительного времени.

Как известно, эксплуатационные режимы нагружения машины отличаются неограниченным многообразием, вследствие чего и экспериментальные исследования на усталость при нестационарных режимах нагружения приводятся по программам, составленным на основе аппроксимации законов изменения амплитуд напряжений во времени. При разнообразии реальных условий нагружения составление усталостных характеристик металлов, полученных при нестационарных нагрузках, существенно затруднено. Вследствие этого целесообразно систематизировать данные о режимах нагружения на основе количественной оценки какого-либо интегрального параметра, характеризующего нестационарность нагружения и позволяющего разработать унификацию (или типизацию) режимов нагружения. Одним из параметров, который может быть использован для этого, является безразмерная величина  $S$ , выражающая площадь фигуры под кривой изменения амплитуды напряжения в относительных координатах, предельное значение которой при стационарном режиме нагружения принимается равным единице. Расчетным параметром для той же цели может служить коэффициент переменной нагружения  $k_Q$ , позволяющий предложить унифицированную систему режимов нагружения. В литературе нашло отражение использование  $S$  и  $k_Q$  для целей расчетной практики. Однако, как следует из рекомендаций [8], использование  $S$  ограничено при больших отношениях максимальных и минимальных напряжений, что подтверждает нелинейный характер связи между  $a$  и  $S$  [4, 7]. Применение в качестве интегрального параметра режима нагружения величины  $k_Q$  при расчетах на долговечность не ограничено формой спектра и позволяет корректировать нелинейность суммирования повреждений с помощью коэффициента  $k = 1/\alpha$ . Следует отметить также и возможность количественной оценки влияния условий нагружения на сопротивление усталости в вероятностном аспекте.

Обычно результаты усталостных испытаний аппроксимируются в виде предельной кривой усталости, отвечающей простейшему степенному уравнению

$$\sigma^m N = \text{const.}$$

Результаты испытания при нестационарном нагружении отображаются так называемыми вторичными кривыми усталости, отнесенными к максимальным (или минимальным) напряжениям действующего спектра.

Учитывая, что для стационарного режима

$$\sigma_{\min}^m N_0 = \sigma^m N = \sigma_{\max}^m N_1,$$

при подставке в зависимость (1) выражений для  $N_1$ :

$$dn = n_0 \psi(x), \quad N_0 = 1/n_0, \quad \sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad \text{и} \quad x = \frac{\sigma}{\sigma_{\max}}.$$

получим общую расчетную формулу для определения  $a$ :

$$a = \frac{N_0}{N_1} \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} x^m \Phi'(x) dx, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$  — максимальная и минимальная амплитуды напряжения в программном блоке;  $\sigma_0$  — предел усталости, соответствующий числу циклов принятому за базовое;  $\Phi'(x)$  — функция плотности распределения действующих напряжений  $\sigma$  при заданном законе их изменения в блоке  $\Phi(x)$ ;  $N_0$ ,  $N_1$  — числа циклов до разрушения при заданном уровне перенапряжения  $\sigma_{\max}$  по исходной и вторичной кривым усталости;  $m$  — показатель степени исходной кривой усталости.

Благодаря введению в (2) значений  $N_0$  и  $N_1$ , определение величины  $a$  оказывается возможным не только в зависимости от заданного уровня напряжения, но и от вероятности неразрушения  $P(N)$ .

Существенное значение имеет также определение с помощью вторичных кривых усталости и величины вторичного предела усталости, являющегося основной механической характеристикой при расчете на длительную долговечность.

Ереванский политехнический институт  
им. К. Маркса

Поступило 1<sup>о</sup> VI.1970.

Վ. Վ. ԿՈՆՍՏԱՆՏԻՆՈՎ, Ս. Ա. ԿՈՍՏՈՎՅԱՆ

ՈՉ-ՈՍԱՅՅՈՆՆԱԻ ԲԵՐՆԱՎՈՐՄԱՆ ԳԵՊԳՐՈՒՄ ԸՌԿԱՆՍՈՒԹՅԱՆ  
ԳԻՄՆԱԿՐՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՄԱՆ ՎԵՐԱԲԵՐՄԱԸ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. մ.

Հողիանում շարադրված են հողիանության դիմադրության վրա ոչ-ստա-  
դիոնար բեռնավորման ազդեցության ճշմարտ հարցերը: Քննարկվում է հող-  
իանության դիմադրության օրինաչափությունների նկատմամբ ուսումնասիրու-  
թյան նախադրությունը, հենվելով մեխանիկական փորձարկումների մեթոդ-  
ների դարդացման վրա՝ հողիանության նեոկանոնով անալիզից թուրքում-  
նքի կոտակման դուամրալին շափի օրոշանիական ու վրձակադրական բա-  
ցանալուման և մեքենաների մասերի բեռնավորման առանձնահատկություննե-  
րի հաշվանամար:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Соренсен С. В. и др. Несущая способность и расчеты деталей машин на проч-  
ность. Машгиз, 1964.
2. Решетов Д. И. Расчет деталей станков на прочность. Сб. «Прочность при неуста-  
новившихся режимах переменных напряжений», изд. АН СССР, 1954.

3. *Palmgren A.* Endurance of Ball-Bearings. „Z. Ver. Dtsch. Ing.“, 68 (1924), 339.
4. Коновалов Л. В. Рациональное нагружение металлов при обеспечении длительной долговечности. „Вестник машиностроения“, № 1, 1967.
5. Котисв В. П. Усталость и несущая способность узлов и деталей машин при стационарном и нестационарном переменном нагружении. НТО Машипром, М., 1966.
6. *Corten H. T., Dolan T. J.* Cumulative fatigue damage. Inst. Conf. on Fatigue of Metals, London, 1956.
7. Гаспарян С. А., Овсянник Н. В., Жиг С. А. Об оценке режима нагружения при усталостных испытаниях. Сб. „Детали машин и ПТМ“, вып. 8, 1968.
8. Серенсен С. В., Котисв В. П. Долговечность деталей машин с учетом вероятности разрушения при нестационарном переменном нагружении. „Вестник машиностроения“, № 1, 1966.