

В. И. МАЛЫЙ

ОБ УСКОРЕННЫХ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ КОНСТРУКЦИЙ

Натурные усталостные испытания в настоящее время являются единственно достоверным способом определения усталостной прочности изделий машиностроения, так как в них воспроизводятся без искажений все разнообразные факторы, существенно влияющие на выносливость. Серьезные трудности при расширении объема таких испытаний возникают в связи с их технической сложностью и большой продолжительностью, которая часто соизмерима с ожидаемым временем эксплуатации создаваемой конструкции, что заметно обесценивает получаемую информацию. Поэтому большие усилия направлены на создание надежных ускоренных методов испытаний [1—3]. Однако необходимо иметь в виду, что эти методы создавались и отработывались применительно к испытаниям лабораторных образцов материалов, и поэтому при формальном применении их к испытаниям конструкций, как будет показано ниже, могут возникать как принципиальные, так и технические трудности.

Но прежде, чем приступить к их анализу, введем некоторые понятия.

Большинство ускоренных методов основано на использовании информации об усталостном разрушении, получаемой при более высоких амплитудах нагрузок, чем в нормальном режиме. Если в нормальном режиме в точках $\rho = 1, 2, \dots$ конструкции создаются циклические усилия или перемещения с амплитудами A_{ρ}^0 , то режим нагружения будем называть пропорциональным, когда в точках ρ конструкции соответствующие амплитуды имеют значения $A_{\rho} = f A_{\rho}^0$. Функция $f(N)$, определяющая параметр пропорциональности f в зависимости от долговечности N в пропорциональном режиме, является естественным при многокомпонентном нагружении конструкции обобщенном кривой Велера.

Параметр f в случае, когда $f > 1$, будем называть параметром форсирования, так как соответствующее ему значение долговечности N всегда оказывается ниже долговечности N_0 в нормальном режиме при $f = 1$. Соответственно, пропорциональный режим нагружения при $f > 1$ будем называть пропорционально форсированным.

Об особенностях формы кривой Велера $f(N)$ конструкции, в сравнении с кривыми Велера лабораторных образцов материалов, можно сделать достаточно определенные для целей дальнейшего анализа выводы, если ограничиться рассмотрением конструкций, обладающих двумя свойствами.

Они должны быть, во-первых, линейными в том смысле, что при пропорциональном изменении режима циклического нагружения амплитуды напряжений во всех элементах конструкции должны изменяться пропорцио-

пально параметру f , а во-вторых, простыми в том смысле, что и в нормальном, и в пропорциональном режимах не возникает других видов разрушения конструкции, кроме усталостного.

Основными видами нелинейности являются физическая нелинейность и геометрическая. Заметная физическая нелинейность в металлических конструкциях связана с появлением пластических деформаций. Существенно поэтому отметить, что упругость, как правило, с достаточной точностью, соблюдается, когда есть потребность в использовании ускоренных методов, то есть когда длительность испытания в нормальном режиме превышает одну рабочую смену. Действительно, так как типичные частоты испытаний обычно превышают $5 \Gamma_{ц}$, в этом случае долговечность конструкции как в нормальном режиме, так и в форсированном режиме должна быть больше 10^4 циклов.

В то же время известно, что при появлении заметных циклических пластических деформаций долговечность во всех случаях меньше 10^3 — 10^4 циклов.

Геометрическая нелинейность обычно связана с проявлением больших прогибов, потери устойчивости или контактных явлений, когда при изменении нагрузки заметно изменяются размеры областей контакта, и даже вообще исчезают старые и появляются новые контакты.

Наличие или отсутствие геометрической нелинейности, как правило, легко установить визуальным осмотром, по характерному звуку при появлении новых контактов или другими видами контроля смещений и деформаций за значительно более короткое время, чем длительность усталостного испытания в нормальном режиме.

Выполнение законов упругости в ускоренных испытаниях и при параметре форсирования $f > 1$ проверяется в ходе самого ускоренного испытания, если долговечность N_f в пропорционально форсированном режиме окажется не меньше 10^4 циклов.

Поэтому проверка условия линейности не является обременительной при проведении ускоренных испытаний.

Необходимо отметить, что класс линейных и простых конструкций достаточно интересен с точки зрения практики, так как сюда входят, например, конструкции типа ферм, корпуса кораблей, фюзеляжи и крылья самолетов, конструкции радиоэлектронной аппаратуры, газгольдеры и т. д.

Пусть в нормальном режиме распределение амплитуд напряжений по конструкции есть $\sigma_{ij}^0(\mathbf{r})$ с интенсивностью $\sigma^0(\mathbf{r})$.

Усталостное разрушение в каждой точке \mathbf{r} конструкции описывается некоторой кривой Велера

$$\sigma^0(\mathbf{r}) = \sigma_r^*(N)$$

где функция $\sigma_r^*(N)$, естественно, зависит от вида тензора амплитуд $\sigma_{ij}^0(\mathbf{r})$ и статического напряженного состояния и от других факторов, влияющих на разрушение, таких, например, как неоднородность напряженного состояния в точке \mathbf{r} , состояние поверхности материала, условия фреттинга и т. п.

По определению кривой Велера $f(N)$ конструкции можно утверждать, что для линейной и простой конструкции

$$f = f(N) = \min_r \frac{\sigma_r^*(N)}{\sigma^0(r)} \quad (1.1)$$

и разрушение происходит именно в той точке r , где при данном N достигается минимум. Очевидно, в общем случае кривая Велера $f(N)$ конструкции, в отличие от кривых Велера лабораторных образцов материалов, не может описываться единым гладким аналитическим выражением, а является кусочно-гладкой функцией, при этом точки излома $f(N)$ соответствуют тем значениям параметра f , при которых происходит изменение локализации разрушения.

Для конструкций нелинейных или непростых на простейших примерах легко показать, что вид кривой Велера может существенно зависеть от индивидуальных особенностей перераспределения напряжений при $f \neq 1$ из-за нелинейности или от закономерностей появляющихся при $f \neq 1$ видов разрушения, отличных от усталостного. Поэтому для таких конструкций излагаемые ниже общие соображения явно недостаточны и, по-видимому, вообще не может быть общих методик ускоренных испытаний рассматриваемых ниже видов.

Во многих ускоренных методах используются предположения о представимости кривой Велера в виде некоторых конкретных аналитических выражений. Оказалось, что при использовании одной только общей структуры (1.1) кривых Велера конструкций уже возможна определенная оценка применимости таких методов к испытаниям линейных и простых конструкций. Действительно, каждый из группы ускоренных методов экстраполяционного типа [4—7] основывается на единственном предположении, что аналитическое выражение кривых Велера $\sigma^*(N)$ имеет одну из следующих форм:

$$\sigma^* = \sigma_r + K(N + N_0)^{-m} \quad (1.2)$$

$$\sigma^* = \sigma_r + KN^{-m} \quad (1.3)$$

$$\sigma^* = a - b \lg N \quad (1.4)$$

$$\sigma^* = KN^{-m} \quad (1.5)$$

$$\sigma^* = \frac{\sigma_r N + \sigma_e K}{N + K} \quad (1.6)$$

где σ_r — предел усталости, σ_e — предел текучести, N_0 , K и m — эмпирические константы.

Экономия времени здесь достигается за счет того, что экспериментальные константы в (1.2 — 1.6) определяются в сравнительно кратковременных экспериментах при больших амплитудах σ , после чего значения больших долговечностей получаются экстраполяцией по формулам (1.2 — 1.6) к малым амплитудам σ .

Но кривая Велера конструкции (1.1), в общем случае, не описывается единым аналитическим выражением. Как следует из (1.1), в диапазоне значений f , при которых разрушение происходит в точке x , кривая Велера $f(N)$ описывается простым выражением

$$f(N) = \frac{\sigma_x^*(N)}{\sigma^0(x)} \quad (1.7)$$

Если же при $f < f_1$ разрушение переходит в другую точку y , то при $f < f_1$, согласно (1.1), имеем

$$f(N) = \frac{\sigma_y^*(N)}{\sigma^0(y)} < \frac{\sigma_x^*(N)}{\sigma^0(x)}$$

В таком случае определяемая экспериментально в области $f > f_1$ кривая Велера конструкции (1.7) при экстраполировании в область $f < f_1$ приводит к опасному завышению усталостной прочности. Описанная здесь теоретически возможность, по-видимому, наблюдалась [8] при испытаниях заклепочных соединений с раззенкованными отверстиями. Кривая Велера имела обычный вид при малых долговечностях, но при больших долговечностях имела крутой падающий участок. В такой ситуации, экстраполируя $\sigma^*(N)$ из области малых в область больших долговечностей, по любой из формул (1.2—1.6), получим опасное завышение ожидаемой долговечности по отношению к реальной.

Таким образом, ни один из ускоренных методов экстраполяционного типа [4—7] в применении к испытаниям конструкций не может давать надежных результатов, хотя и имеются удачные примеры их использования [9].

Большая группа ускоренных методов [10—14] для определения предела усталости лабораторных образцов предполагает проведение испытаний при линейно или ступенчато возрастающих амплитудах. Не будем останавливаться на анализе возможностей этих методов в применении к испытаниям конструкций, так как они не дают информации об ограниченной долговечности, когда предела усталости вообще не существует (например, при использовании в конструкции легких сплавов), или при амплитудах, превышающих предел усталости, в тех случаях, когда он существует.

В методе Кордонского [15] для определения долговечности $N(\sigma_n)$ при амплитуде σ_n предлагается: 1) определить долговечность $N(\sigma_k)$ при более высоких амплитудах σ_k , так что $N(\sigma_k) \ll N(\sigma_n)$, 2) осуществить две одноступенчатые программы циклических нагружений, в которых образец подвергается действию различного числа N_n циклов при амплитуде σ_n и доводится до разрушения при σ_k с определением средней длины \bar{N}_k второго блока программы, 3) обработать результаты с помощью некоторого соотношения, которое нам удобнее преобразовать к виду

$$\bar{N}_k = \mu(\sigma_n, \sigma_k) N_n \left[N(\sigma_k) N_n^{-\frac{\lg N(\sigma_k)}{\lg N(\sigma_n)}} - 1 \right] \quad (1.8)$$

Однако экспериментальная проверка [3, 16] показала, что коэффициент $\mu(\sigma_n, \sigma_k)$ нельзя считать независимым от N_n , то есть экспериментально определенная зависимость $\bar{N}_k = \bar{N}_k(\sigma_n, \sigma_k, N_n)$ не описывается выражением вида (1.8).

Что это действительно так, видно и из самых общих соображений, так как величина $\bar{N}_k(\sigma_n, \sigma_k, N_n)$, по ее определению, должна при уменьшении N_n стремиться к $N(\sigma_k)$, а не к нулю, как это получается для (1.8). Но применению этого метода в испытаниях конструкций мешает еще одно не менее существенное обстоятельство, которое не было помехой при испытаниях лабораторных образцов: при определении одного значения $N(\sigma_n)$ необходимо довести до разрушения большое количество образцов [16], тогда как в практике испытаний конструкции часто приходится иметь дело с единственным опытным экземпляром создаваемой конструкции.

В таких областях техники, как автомобилестроение, тракторостроение и т. п., где тип конструкции, используемые материалы и уровень технологии мало изменяются при переходе к новой серии изделий, используется методика форсированных испытаний [1], по которой определяют долговечность N_1 изделия в форсированном режиме и пересчитывают ее в долговечность N для нормального режима по эмпирическим зависимостям, основанным на опыте эксплуатации и испытаний предыдущих серий изделий такого типа. Более широкому использованию этой методики препятствует отсутствие рекомендаций по следующим вопросам:

1. В каких пределах можно выбирать параметр форсирования?
2. По каким соотношениям можно определять долговечность N в нормальном режиме, если известна долговечность N_1 для параметра форсирования f ?
3. Как интерпретировать результаты форсированных испытаний при малом числе и, в особенности, при одном экземпляре испытываемых изделий с учетом того, что из-за большого статистического разброса долговечность N_1 в форсированном режиме нередко может оказываться даже превышающей среднюю долговечность \bar{N} в нормальном режиме?

Ниже предлагается общая методика, дающая ответы на эти вопросы и позволяющая, в случае положительного результата форсированных испытаний, гарантировать, что долговечность конструкции в нормальном режиме будет не ниже заданного числа N циклов.

Будем считать допустимыми значения параметра форсирования f , при которых поведение конструкции остается линейным. Выполнение этого условия, как указывалось выше, может быть проверено в ходе самого ускоренного испытания. Этим условие линейности принципиально отличается от считавшегося необходимым требования неизменяемости при форсировании места локализации в конструкции усталостного разрушения [1], так как место разрушения в нормальном режиме, в общем случае, не может быть установлено в ходе испытаний в форсированных режимах или из каких-либо соображений.

Независимо от специфики распределения напряжений $\sigma^0(r)$ и усталостной прочности материалов $\sigma_r^*(N)$ по элементам линейной конструкции из определения (1.1) получаем оценку

$$f(N_1) = \min_r \frac{\sigma_r^*(N_1)}{\sigma_r^*(N)} \frac{\sigma_r^*(N)}{\sigma^0(r)} \leq f(N) \max_r \frac{\sigma_r^*(N_1)}{\sigma_r^*(N)} \leq f(N) F(N_1, N) \quad (1.9)$$

$$F(N_1, N) = \max_q k_q(N_1, N)$$

$$k_q(N_1, N) = \frac{\sigma_q^*(N_1)}{\sigma_q^*(N)}$$

Здесь корреляционное отношение $k_q(N_1, N)$ характеризует крутизну кривой Велера $\sigma^*(N)$ на интервале $[N_1, N]$, а значение максимума определяется для набора кривых Велера $\sigma_q^*(N)$, $q=1, 2, \dots$, достаточно полного, чтобы охарактеризовать все ожидаемые случаи усталостного разрушения в элементах испытываемых конструкций, например, в стержнях, пластинах, болтовых, клепаных и сварных соединениях и т. п.

Практически, функция $F(N_1, N)$ должна определяться при обработке, согласно соотношениям (1.9), известных литературных данных о всевозможных кривых Велера $\sigma_q^*(N)$.

Существенно, что в общем случае линейной конструкции неравенство (1.9) нельзя усилить, так как знак равенства в нем реализуется в случае конструкции, разрушающейся при обоих значениях параметра форсирования $\dot{f}(N_1)$ и $\dot{f}(N)$ в одном и том же месте x , где материал и условия его работы таковы, что корреляционное отношение $k_x(N_1, N)$ кривой Велера $\sigma_x^*(N)$ совпадает с максимально возможным значением $F(N_1, N)$.

Теперь можно утверждать, что если долговечность конструкции при испытании в форсированном режиме с параметром $\dot{f} = F(N_1, N)$ окажется не ниже N_1 , то ее долговечность в нормальном режиме $\dot{f} = 1$ будет не ниже N . В этом убеждаемся, исходя из того, что при $F(N_1, N) \leq \dot{f}(N_1)$ из (1.9) следует оценка $1 \leq \dot{f}(N)$.

С учетом статистического разброса усталостная прочность в точках r конструкции описывается семейством кривых $\sigma_r^*(N, P)$ равной вероятности разрушения P .

Для набора всевозможных кривых равной вероятности разрушения $\sigma_q^*(N, P)$, включающего, конечно, и кривые $\sigma_r^*(N, P)$, определим корреляционные отношения $k_q(N_1, N, P)$ и функцию $F(N_1, N)$ согласно соотношениям:

$$k_q(N_1, N, P) = \frac{\sigma_q^*(N_1, P)}{\sigma_q^*(N, P)}$$

$$F(N_1, N) = \max_{q, P} k_q(N_1, N, P)$$

Тогда можно утверждать, что если в форсированном режиме с параметром $\dot{f} = F(N_1, N)$ разрушение в какой-либо точке r конструкции происходит

с вероятностью P_1 при N_1 циклах, то при $f = 1$ в нормальном режиме вероятность разрушения P в точке r при N циклах будет меньше P_1 . Справедливость этого утверждения вытекает из того, что при

$$F(N_1, N) \sigma^0(r) = \sigma_r^*(N_1, P_1)$$

выполняется неравенство

$$\sigma^0(r) = \left[\max_{q, P} \frac{\sigma_q^*(N_1, P)}{\sigma_q^*(N, P)} \right]^{-1} \sigma_r^*(N_1, P_1) \leq \sigma_r^*(N, P_1)$$

В указанном смысле и необходимо понимать результаты форсированных испытаний при малом числе n , в особенности, при одном экземпляре испытываемых изделий.

Прямых данных об усталостных испытаниях конструкций имеется весьма мало и их в настоящее время недостаточно для установления каких-либо надежных количественных закономерностей, позволяющих разработать общие методики ускоренных натуральных испытаний.

В данной работе сформулирована и обоснована простая и достаточно общая методика ускоренных натуральных испытаний, для которой необходимую количественную информацию об усталостной прочности конструкций можно получить, проанализировав по указанной методике имеющиеся в достаточном количестве литературные данные об усталостной прочности различных материалов в разнообразных условиях их эксплуатации, а также отдельных узлов и элементов конструкции.

Автор выражает благодарность О. М. Кочину за полезные дискуссии.

Всесоюзный научно-исследовательский институт
Физико-технических и радиотехнических измерений

Поступила 12 XII 1977

Վ. Ի. ՄԱԼՅԱ

ԿՈՆՍՏՐՈՒԿՏԻՎՆԵՐԻ ԱՐԱԳԱՅՎԱԾ ՀՈԳՆԱԾԱՅԻՆ
ՓՈՐՁԱՐԿՈՒՄՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

Ա մ ֆ ո փ ո լ մ

Առաջարկվում է տրված բեռնազորման լալնույթի ժամանակ կոնստրուկցիաների դոլաակուիլյան հոսակի զեհհատման համար արագացված փորձարկումների մեթոդը

Ցույց է տրվում, որ այդ մեթոդի համար շահագործման զանազան պայմաններում գտնվող տարրեր նյութերի հոդնածալին ամրուիլյան մասին անհրաժեշտ քանակական ինֆորմացիա կարելի է ստանալ գրականուիլյան մեղ բովականաղափ քանակուիլյամբ ունեցած տվյալներից:

ON ACCELERATED FATIGUE CONSTRUCTION TESTS

V. I. MALY

S u m m a r y

A reliable method of the forced test for the construction durability estimation under specified load amplitudes has been suggested. It has been proved that the necessary quantitative information for this method can be obtained from a large number of publications on fatigue strength of various materials under different operating conditions.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куйель Р. В. Долговечность автомобилей. М., «Машгиз», 1961.
2. Методы ускоренных испытаний на надежность и долговечность деталей, узлов машин. М., НИИМАШ, 1967.
3. Ускоренные испытания изделий машиностроения на надежность, вып. 2, М., Изд-во стандартов, 1969.
4. Вейбрал В. Усталостные испытания и анализ их результатов. М., «Машгиз», 1964.
5. Одинг И. А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. М., «Машгиз», 1962.
6. Иванова В. С. Структурно-энергетическая теория усталости металлов. Сб. «Циклическая прочность металлов», М., Изд-во АН СССР, 1962.
7. Муратов А. В. Аналитическое выражение кривой усталости. Сб. «Научн. тр. Куйбышевского индустриального ин-та», 1958, вып. VII.
8. Локачи А. Дискуссия по сообщению Дж. Шайве «Выносливость заклепочных соединений». Сб. «Усталостная прочность и долговечность самолетных конструкций. М., «Машиностроение», 1965.
9. Трофимов О. Ф. О применении ускоренных методов испытаний деталей машин на выносливость. Вестник машиностроения. 1965, № 2.
10. Prot M. L'essai de fatigue sous charge progressive une nouvelle technique d'essai des matériaux. Revue de metallurgie, 1948, YLV, No. 12.
11. Corten H. T., Dtmoff T., Dolan M. J. An appraisal of the Prot method of fatigue testing. Proc. Amer. Soc. Test Mat., 1954, 54.
12. Hijab W. A. A Statistical Appraisal of the Prot Method for Determination of Fatigue Endurance Limit. J. Appl. Mech., 1957, 24, No. 2.
13. Enomoto N. A Method for determining the fatigue limit of metals by means of stepwise load increas test. Proc. Amer. Soc. Test Mater., 1959, 59.
14. Locati L. Le prove di fatica come ausilio alla progettazione ed alla produzione. La metallurgia italiana, 1955, No. 9.
15. Кордонский Х. Б., Корсаков Б. Е., Парамонов Ю. М. Приложение логарифмически-нормального распределения к расчетам и испытаниям усталостной долговечности. Изв. ВУЗов, «Авиационная техника», 1964, № 1.
16. Соболев В. А., Евстратова С. П. Экспериментальная оценка точности некоторых методов ускоренных испытаний на усталость. Заводская лаборатория, 1968, № 7.