2. П а н о в к о Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. - М.: Гос.изд-во физико-математической литературы,1960. - 196 с.

3. М а т в е е в В.В. Демпфирование колебаний деформированных тел. - Киев: Наукова думка, 1985. - 264 с.

4. П и с а р е н к о Г.С. Обобщенная нелинейная модель учета рассеяния энергии при колебаниях. - Киев: Наукова думка, 1985. - 237 с.

5. И в а н о в В.П. Колебания рабочих колес турбомашин. - М.: Машиностроение, 1983. - 224 с.

УДК 620.178.362

В.К.С е м е н ы ч е в

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРИВОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ ЧЕРЕЗ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При построении кривой выносливости образца или конструкции в координатах "напряжение σ_a - число циклов до разрушения N_p " одной из основных проблем остается ускорение прочностных испытаний и сокращение числа разрушаемых образцов (конструкций) /1, 2/.

В последнее время появилось довольно много работ, авторы которых связывают состояние механической системы (МС) с измеряемыми физико-механическими параметрами - деформацией, резонансной частотой, декрементом колебаний или добротностью, коэффициентом вариации динамического сигнала от конструкции или его огибающей, шириной петли механического гистерезиса, сдвигом фазы между напряжением и деформацией и т.п. /1-4/. Эти параметры обладают большой чувствительностью к поврежденному состоянию МС, а величина долговечности, определяемая на их основе, имеет меньший разброс, чем та же самая величина, рассчитанная на основе усредненного разрушающего числа циклов N_p . К тому же обычно критическая величина физико-механических параметров, в отличие от числа циклов, не зависит от истории нагружения, которая влияет только на скорость накопления повреждений /1, 3, 5/. При этом именно динамические измерения, в силу близости условий нагружения и измерений, в отличие, например, от метода статической петли гистерезиса позволяют рассчитывать на сопоставимость результатов с характеристиками, имеющими место непосредственно в процессе испытаний на усталость.

Сформулируем и оценим возможное решение данной задачи, используя для количественных расчетов результаты работы /3/ по характеру изменения меры неупругости образцов из сталей 45 и 15 КП, за которую принята ширина $\Delta\ell$ динамической петли гистерезиса, соответствующая стадии стабилизации состояния материала, и первичный экспериментальный материал по динамике $\Delta\ell$ для 96 образцов.

Запишем уравнение наклонной ветви кривой выносливости в виде

$$\lg N_p = D - B\sigma_a , \tag{I}$$

где B, D – параметры наклонной ветви.

При том же напряжении σ_a зависимость между шириной петли гистерезиса на стадии стабилизации и числом циклов до разрушения представим, как это предложено сделать в работе /3/, в форме

$$\lg N_p = M - L\lg\Delta\ell , \tag{2}$$

где M, L – параметры наклонной ветви кривой выносливости в логарифмических координатах $\lg N_p$, $\lg\Delta\ell$.

Определим уравнения (I) и (2) при некоторых двух различных значениях напряжения σ_1 и σ_2, больших предполагаемого предела выносливости σ_{-1}, и при напряжении σ_{-1}. После преобразований системы шести уравнений выразим из нее искомые параметры кривой выносливости:

$$\sigma_{-1} = \frac{\lg\Delta\ell_1\sigma_2 - \lg\Delta\ell_2\sigma_1 - \lg\Delta\ell_0(\sigma_2 - \sigma_1)}{\lg\Delta\ell_1 - \lg\Delta\ell_2} , \tag{3}$$

$$B = \frac{L(\lg\Delta\ell_1 - \lg\Delta\ell_2)}{\sigma_1 - \sigma_2} , \tag{4}$$

где $\lg\Delta\ell_i$ – значение логарифма меры неупругости на стадии стабилизации при напряжении σ_i (i = I,2);

$\lg\Delta\ell_0$ – значение логарифма той же меры неупругости при напряжении σ_{-1}, которая может быть принята постоянной для каждого конкретного вида стали и сплава при различных видах нагружения /I, 3/.

Использование формул (3) и (4) при прочностных испытаниях партий МС, имеющих объемы n_1 и n_2, приведет к необходимости определения средних значений $\overline{\lg \Delta \ell_i}$ измеряемой физико-механической характеристики $\Delta \ell$ на каждом из уровней напряжения σ_1 и σ_2, а также коэффициента линейной регрессии (2) $\bar{L}$ между логарифмами $\Delta \ell$ и числом циклов до разрушения N_p в партиях при указанных напряжениях.

Заметим, что существенно упрощающим фактором при проведении прочностных испытаний по определению только коэффициента B может оказаться отсутствие в соотношении (4) постоянной $\Delta \ell_0$.

Обработка по известной методике /I, 2/ экспериментальных данных по сталям 45 и I5 КП подтвердила с доверительной вероятностью β = 99% гипотезу о равенстве угловых коэффициентов линейной регрессии при двух и более значениях σ_a для каждой стали. Таким образом, при расчете $\bar{L}$ можно объединять выборки $\{\lg \Delta \ell, \lg N_p\}$, получаемые при различных значениях напряжения.

В силу того что высока коррелированность $\lg \Delta \ell$ и $\lg N_p$ (диапазон зарегистрированного значения коэффициента корреляции r -0,7507...-0,9033), а коэффициент вариации $\lg \Delta \ell_i$ мал (в 2,6...I5,7 раз меньше коэффициента вариации соответствующего числа циклов до разрушения N_p в известном подходе), следует ожидать высокой точности оценки углового коэффициента B кривой выносливости по формуле (4).

Количественное подтверждение этого дадим в предположении, что B одновременно рассчитывают по двум усредненным долговечностям $\bar{N}_{p1}(\sigma_a = \sigma_1)$ и $\bar{N}_{p2}(\sigma_a = \sigma_2)$ в соответствии с известной методикой /I, 2/ и по соотношению (4).

Относительные погрешности измерения коэффициента B δ_1' и δ_1 соответственно известным и предлагаемым подходами определим как отношение длин доверительных интервалов при доверительных вероятностях β_1, β_2 и среднеквадратических отклонениях, соответствующих косвенным измерениям, к самим значениях B /5/:

$$\delta_1' = \frac{S_{Np_1} \, t_{\beta 1}}{(\bar{N}_{p1} - \bar{N}_{p2})} \sqrt{\frac{2}{n_1}}; \qquad (5)$$

$$\delta_1 = t_{\beta 2} \sqrt{\frac{S^2_{\lg N_p \, \lg \Delta \ell}}{S^2_{\lg \Delta \ell} (2n_1 - 1) L^2} + \frac{2 S^2_{\lg \Delta \ell_1}}{(\overline{\lg \Delta \ell_1} - \overline{\lg \Delta \ell_2})^2 n_1}}, \qquad (6)$$

где $S^2_{lgN_p.lg\Delta l}$ – дисперсия предсказания N_p при заданном $lg\Delta l$ и напряжении σ_a ;

$t_{\beta i}$ – аргумент, соответствующий значению функции распределения Гаусса (или Стьюдента для малых выборок) при доверительной вероятности β_i ;

n_1 – число испытываемых МС на каждом уровне напряжения, принимаемое для простоты одинаковым, как и выборочные дисперсии $S^2_{lg\Delta l_1}, S^2_{Np1}$ для обоих уравнений.

Через отношение δ_1' и δ_1 можно определить выигрыш в точности. Проведя попарное сравнение для двух из пяти установленных в экспериментах уровней напряжения и назначив любые, но равные доверительные вероятности, получили для сталей 45 и I5 КП это отношение в диапазоне I,26...I,54.

Из соотношений (5) и (6) можно выразить число испытываемых МС на каждом уровне напряжения функцией относительной погрешности,доверительной вероятности и статических характеристик. При одинаковых точностных свойствах измерений выигрыш в уменьшении числа испытываемых МС на двух уровнях напряжения по предлагаемому подходу оказался на нашем экспериментальном материале от 3,22 до 4,78.

Для иллюстрации проведен расчет точности измерения B по формуле (4) при доверительной вероятности β = 50% в функции числа испытываемых МС на одном уровне нагружения. Так, для стали 45 при σ_1 = 275 МПа, σ_2 = 295 МПа, считая $lg\Delta l_i, S_{lgNp}, S_{lg\Delta l.lgNp}$ статистиками генеральной совокупности и $\bar{Z}$ = 0,4389, получим при n_1 = 3 δ_1 = 36%, при n_1 = 5 δ_1 = 27%, при n_1 = I0 δ_1 = 8%.

Из выражения (5) для δ_1 с учетом соотношения $S^2_{lg\Delta l.lgNp} = S^2_{lg\Delta l}(1-z^2)\dfrac{2n_1-1}{2n_1-2}$ /5/ следует, что точность измерения коэффициента B может быть улучшена увеличением разности $(\overline{lg\Delta l_1}-\overline{lg\Delta l_2})$, которое достигается большим различием устанавливаемых σ_1 и σ_2 , повышением точности измерения $lg\Delta l$ и ростом n_1 . Установление максимального различия напряжений ограничено, с одной стороны,материалом и возможностью нагружающих устройств, а с другой – самим используемым методом измерения меры неупругости. Так, в области малых и больших значений напряжения материала существенно ухудшается точность измерения ширины динамической петли гистерезиса,меняется ее форма и нарушаются тем самым энергетические соотношения, положенные в основу подхода /I, 3/. Чувствительность предлагаемого подхода или минимально допустимая разность σ_1 и σ_2 обусловлена статистически значимым различием $\overline{\lg\Delta l_1}$ и $\overline{\lg\Delta l_2}$. Как показала проверка гипотезы о равенстве средних значений при расхождении σ_1 и σ_2 на 3...4% с доверительной вероятностью 99%, на нашем статистическом материале различие уже наблюдалось.

Заметим, что в соотношение (3) входят лишь усредненные динамические параметры стадии стабилизации $\overline{\lg\Delta l_i}$, достижение которой составляет по продолжительности обычно 5...10% от числа циклов до разрушения /I, 3/. Тогда при решении специализированной задачи определения только предела выносливости σ_{-1} при знании $\lg\Delta l_0$ можно ограничиться числом циклов нагружения, на порядок меньшим разрушающего, и проводить 100%-ный контроль изделий.

Рассчитанные для подтверждения соотношения (3) пределы выносливости σ_{-1} отличаются от результатов расчетов для тех же самых образцов, приведенных в работе /3/, не более чем на $\pm(2...3)\%$. Отличие состоит в том, что нет необходимости осуществлять программное нагружение МС, доводя ее до разрушения, строить зависимость Δl на стадии стабилизации в функции амплитуды нагружения и проводить последующие графоаналитические исследования.

Предложенное определение σ_{-1} дает выигрыш в точности (в сокращении числа испытываемых МС) за счет отмеченной выше меньшей вариации $\lg\Delta l_i$. Определим количественно относительную погрешность δ_2 косвенного измерения σ_{-1} по формуле (3), предполагая равенство статистических характеристик и объемов выборок при различных напряжениях и точное знание $\lg\Delta l_0$:

$$\delta_2 = \frac{2t_\beta S_{\lg\Delta l_1}}{\sqrt{n_1}\,(\overline{\lg\Delta l_1} - \overline{\lg\Delta l_2})} \,. \qquad (7)$$

Для условий рассмотренного выше примера при β = 0,50% будем иметь: при $n_1 = 3$ δ_2 = 22,9%; при $n_1 = 5$ δ_2 = 10,1%; при $n_1 = 10$ δ_2 = 5,1%. Точность оценки σ_{-1} по формуле (3) может регулироваться, как видно из соотношения (7), выбором n_1, σ_1 и σ_2, а также точностью первичных измерений Δl_i. Погрешности измерений более сложной реализации подхода, связанной с измерением Δl и описанной в работе /3/, могут быть оценены примерно той же величиной, а при известном использовании усредненных долговечностей, в силу значительной вариации $\bar{N}_{pi}$, - почти на порядок больше /I-3/.

Итак, сформулирован подход к оценке параметров кривой выносливости, альтернативный известному по точности, быстродействию и количеству испытываемых МС; определены его основные характеристики и условия реализации; даны результаты проверки. Пользуясь известными соотношениями связи $\Delta\ell$ со сдвигом фазы между напряжением и деформацией, добротностью и особенно декрементом колебания МС /I/, комбинируя и совершенствуя методы измерения этих характеристик /6/, можно увеличить измеряемый диапазон разности мер неупругости, уменьшить саму дисперсию их измерений, сделав подход еще более эффективным.

Библиографический список

I. Т р о щ е н к о В.Т. Усталость и неупругость металлов. - Киев: Наукова думка, I97I. - 267 с.

2. Вибрационные испытания на усталость. Методические материалы. - М.: НИАТ, I975. - 56 с.

3. Т р о щ е н к о В.Т., М и т ч е н к о Е.И. Прогнозирование долговечности при программном циклическом нагружении с учетом рассеяния свойств //Проблемы прочности. - I984. - № IO. - С. 3-8.

4. М а г е р о в А.И. Оценка ресурса лопаток газовых турбин на основе анализа неупругости материалов:Автореф. дис.... канд. техн. наук. - Рига, I985. - 25 с.

5. З а к с Л. Статистическое оценивание. - М.: Статистика, I976. - 538 с.

6. М а к л а к о в В.Н., С е м е н ы ч е в В.К. К расчету прочности при циклическом нагружении с учетом рассеяния свойств // Тез.докл. II Всесоюз. конф. "Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов". - Куйбышев, I986. - С.I02-I03.