

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

**И С С Л Е Д О В А Н И Е
НЕУПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
В РЕЖИМЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ**

У т в е р ж д е н о
редакционно-издательским
советом института
в качестве
методических указаний
к лабораторно-практическим
занятиям
для студентов

КУЙБЫШЕВ 1990

Составитель А. Г. Саноян

УДК 621.38 : 539.43

Исследование неупругой деформации конструкционных материалов в режиме циклического нагружения: Метод, указания /Сост. А. Г. Саноян, Куйбышев, авиац. ин-т; Куйбышев, 1990. 8 с.

Изучаются эффекты неупругой деформации конструкционных материалов в режиме гармонического (многоциклового) нагружения. Рассмотрены теоретические основы усталостной прочности материалов и экспериментальные методы исследования явления неупругости. Показана возможность прогнозирования срока службы элементов конструкций в режиме циклического нагружения.

Предназначены для студентов, обучающихся по спец. 2303.

Рецензенты: канд. физ.-мат. наук Е. Г. Гусева,
канд. техн. наук П. И. Гадалин

Составитель Саноян Ашот Геворкович

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В РЕЖИМЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Редактор Е. Д. Антонова
Техн. редактор Н. М. Калениук
Корректор Н. С. Куприянова

Сдано в набор 17.01.90 г. Подписано в печать 29.03.90 г.
Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная белая.
Гарнитура литературная. Высокая печать.
Усл.п.л. 0,46. Усл.кр.-отт. 0,5. Уч.-изд.л. 0,4.
Тираж 300 экз. Заказ 62. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С. П. Королёва,
443086, Куйбышев, Московское шоссе, 34.

Тип. ЭОЗ Куйбышевского авиационного института.
443001, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.

Цель работы: исследование явления неупругой деформации конструкционных материалов в режиме циклического (гармонического) нагружения.

Задания:

1. Изучить физические основы явления неупругой деформации материалов.
2. Построить зависимость неупругой деформации от приложенного к материалу напряжения.
3. Определить энергию неупругой деформации (за один цикл) материала.
4. Определить предельное (до разрушения) число циклов нагружения материала.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

КВАЗИСТАТИЧЕСКОЕ НАГРУЖЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

При статическом нагружении взаимосвязь между относительным удлинением материалов ε и нагрузкой σ определяется законом Гука

$$\varepsilon = \alpha \sigma, \quad (1)$$

где α — коэффициент сжимаемости, равный $\alpha = E^{-1}$; E — модуль Юнга материала.

В случае нелинейного нагружения, для которого характерно наличие остаточных (необратимых) деформаций, принято величину ε представлять в виде суммы

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_d, \quad (2)$$

где ε_y — упругая составляющая удлинения материала; ε_d — диссипативная составляющая, характеризующая необратимые эффекты деформирования материала.

Представление деформации материала в форме (2) в ряде случаев малоэффективно. В частности, при гармоническом нагружении составляющую ε_d должны характеризовать потери энергии за один цикл нагружения. Однако определить однозначную зависимость между ε_d и мощностью потерь энергии P непосредственным образом не представляется возможным, поэтому выражение (2) следует рассматривать в качестве первого (упрощенного) приближения рассмотрения вопроса.

ГАРМОНИЧЕСКИЙ РЕЖИМ НАГРУЖЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

В случае одноосного гармонического нагружения с частотой ω

$$\sigma = \sigma_0 \cos \omega t, \quad (3)$$

При $t \gg \tau$ (где τ — время механической релаксации системы) в материале установится стационарное состояние, для которого справедливо выражение [1]

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad (4)$$

где φ — величина фазового сдвига между ε и σ (очевидно, что значение φ в рассматриваемом случае отрицательно). Выражения (3) и (4) отражают тот факт, что процесс деформации в определенной мере отстает от нагрузки, что и определяет суть нелинейных эффектов при деформации материалов.

Выражение (4) можно представить в виде

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \cos \omega t + \varepsilon_2 \sin \omega t, \quad (5)$$

где

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 \cos \varphi; \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_0 \sin \varphi$$

Полагая в первом приближении линейный характер зависимости ε_1 и ε_2 от σ_0 , примем

$$\varepsilon_1 = \alpha_1 \sigma_0; \quad \varepsilon_2 = \alpha_2 \sigma_0,$$

и с учетом принятого допущения получим

$$\varepsilon = \sigma_0 (\alpha_1 \cos \omega t + \alpha_2 \sin \omega t), \quad (6)$$

Выражение (6) является аналогом закона Гука для динамического режима нагружения. Нетрудно видеть, что при $\omega \rightarrow 0$ (последнее соответствует статическому режиму нагружения) выражения (4) и (6) становятся тождественными. Действительно, в этом случае $\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon$, а следовательно $\alpha_1 \rightarrow \alpha = E^{-1}$ и $\alpha_2 \rightarrow 0$. Таким образом, α_1 характеризует упругую составляющую деформации, а α_2 — неупругую, связанную с диссипативной (рассеивающейся) и реактивной мощностями.

Выражение (6) можно представить в более компактном виде, представляя ε и σ в комплексном виде:

$$\alpha = \alpha_1 + i \alpha_2, \quad (7a)$$

$$\dot{\sigma} = \sigma_0 e^{-i \omega t}, \quad (7b)$$

В этом случае вещественная часть выражения

$$\varepsilon = \bar{\alpha} \dot{\sigma} \quad (7в)$$

совпадает с выражением (6) и имеет тождественный выражению (1) вид.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Для упрощения примем, что температура материала в процессе гармонического нагружения поддерживается на постоянном

уровне. Тогда в стационарном режиме нагружения среднее за период колебаний значение внутренней энергии U остается постоянным. Следовательно, согласно первому началу термодинамики имеем

$$dU = dQ + dA = 0, \quad (8)$$

где dQ — выделение тепла за время dt ; dA — механическая работа, затраченная на необратимое разрушение материала. Согласно выражению (8) энергия рассеивания материала за один цикл нагружения Q_1 составит

$$Q_1 = \int_0^T dQ = - \int_0^T dA, \quad (9)$$

где T — период колебаний, равный $T = 2\pi/\omega$.

Поскольку элементарная работа деформации единицы объема составляет $dA = \sigma d\varepsilon$, с учетом выражения (9) имеем

$$Q_1 = - \int_0^T \sigma (d\varepsilon/dt) dt = - \int_0^{2\pi/\omega} \sigma_0 \cos \omega t [d(\varepsilon_1 \cos \omega t + \varepsilon_2 \sin \omega t)/dt] dt. \quad (10)$$

После интегрирования выражения (10) получаем

$$Q_1 = - \sigma_0 \varepsilon_2 \pi. \quad (11)$$

Для потери энергии в единицу времени

$$P = \left| \frac{m}{2\pi} Q_1 \right| = \frac{\omega \sigma_0 \varepsilon_2}{2}. \quad (12)$$

Из выражения (12) следует, что необратимую потерю энергии в системе характеризует параметр ε_2 , а параметр ε_1 , следовательно, характеризует обратимые (упругие) процессы в системе.

Введем в рассмотрение параметр

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}, \quad (13)$$

являющийся по своему смыслу удельной характеристикой диссипационных процессов. (Его аналогом в электрической теории диэлектриков является тангенс угла диэлектрических потерь). Тогда

$$P = \frac{\omega \sigma_0 \varepsilon_1}{2} \operatorname{tg} \varphi. \quad (14)$$

Из формулы (14) следует, что для случая гармонического нагружения $\operatorname{tg} \varphi$ действительно можно рассматривать в качестве показателя энергетических потерь в материале. Полученные энергетические характеристики неупругой деформации удобно предста-

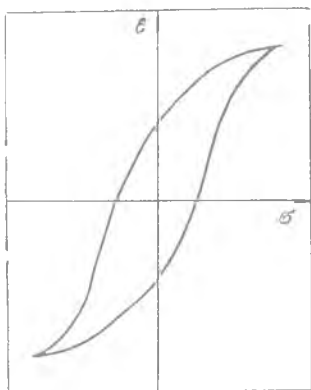


Рис. 1. Гистерезисная характеристика неупругой деформации

для алгебраические преобразования, получаем для комплексного (динамического) модуля Юнга выражение

$$E = E_1 + i E_2, \quad (16)$$

где

$$E_1 = [\alpha_1 (1 - \alpha_2^2/\alpha_1^2)]^{-1},$$

$$E_2 = -\alpha_2 [\alpha_1^{-3} (1 + \alpha_2^2/\alpha_1^2)]^{-1}.$$

Последние выражения существенно упрощаются в случае квазиупругого нагружения, для которого характерно выполнение условия $\alpha_1 \gg \alpha_2$. В этом случае для упругой E_1 и неупругой E_2 составляющих модуля Юнга имеем

$$E_1 = \alpha_1^{-1}; E_2 = -\alpha_2/\alpha_1^2. \quad (17)$$

Для реальных механических конструкций наибольший практический интерес представляет низкочастотное нагружение. Полагая, что $\omega \rightarrow 0$, получаем $E_1 = E$; $E_2 = -E \operatorname{tg} \varphi$. Поэтому для низкочастотных режимов нагружения $\dot{E} = E (1 - i \operatorname{tg} \varphi)$.

Интересно отметить, что $\operatorname{tg} \varphi$ можно представить в виде отношения $-E_2/E_1$.

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Общие сведения и терминология. Под деформационными и энергетическими критериями разрушения материалов подразумеваются критерии, согласно которым предельное состояние мате-

лить в графическом виде (рис. 1). Площадь, ограниченная гистерезисной кривой, характеризует энергию неупругой деформации, рассеиваемую за один цикл нагружения.

ДИНАМИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ ЮНГА

Поскольку α в выражении (7) является аналогом параметра α в выражении (1), определим комплексный модуль Юнга в виде:

$$\dot{E} = \alpha^{-1}. \quad (15)$$

Рассматривая в совокупности выражения (7а) и (15) и проводя

риала определяется критической величиной деформации (полной или ее неупругой составляющей) или необратимо рассеянной энергии. Деформационные и энергетические критерии усталостного разрушения основаны на проявлении одного и того же явления неупругости деформации материалов [1].

Деформационные критерии. Деформационные критерии усталостного разрушения устанавливают связь между амплитудой деформации ϵ или неупругой деформации за цикл $\Delta \epsilon_n$ и предельным числом циклов нагружения N_p . Для случая малоциклового нагружения удовлетворительным приближением является

$$\Delta \epsilon_n N_p^{0,5} = \epsilon_c, \quad (18)$$

где ϵ_c — предельное удлинение материала при статическом нагружении.

Применительно к области многоциклового усталости (количество циклов более $10^2 - 10^6$) уравнение (18) преобразуется к виду

$$\Delta \epsilon_n N_p^a = C_1, \quad (19)$$

где a и C_1 — экспериментально определяемые параметры конкретного материала.

С помощью выражения (19) можно решить прямую и обратную задачи выбора режима нагружения. В первом случае заданной величиной является N_p и из выражения (19) определяется предельно допустимое значение $\Delta \epsilon_n$. Далее для полученного значения $\Delta \epsilon_n$ экспериментально определяется предельное значение нагрузки σ . Во втором случае задается величина σ и требуется определить значение N_p .

Энергетические критерии. Физическая основа энергетических критериев базируется на предположении, что энергия деформированного материала в процессе циклического нагружения увеличивается вплоть до некоторого предельно допустимого значения C_2 (в ряде случаев эту энергию отождествляют со скрытой теплотой плавления материала).

В рамках сформулированной гипотезы справедливо выражение

$$Q_1 N_p^\beta = C_2, \quad (20)$$

где β и C_2 — экспериментально определяемые параметры конкретного материала; Q_1 — энергия рассеяния (деформации) за один цикл нагружения.

Для широкого круга материалов величина Q_1 не является постоянной, а зависит от количества предшествующих циклов нагружения. В этом случае выражение (20) следует представить в виде

$$\sum_1^{N_p} Q_1 = C_2. \quad (21)$$

Выражение (21) позволяет предположить, что вся рассеянная энергия связана с усталостными повреждениями. Однако часть энергии рассеивания может быть вынесена из материала в виде тепловой составляющей и в связи с этим являться «неопасной», поэтому более корректной формулой энергетического критерия разрушения материалов является

$$\sum_1^{N_p} (Q_1 - Q_2) = C_2, \quad (22)$$

где Q_2 — энергия, выводимая из системы (материала) за один цикл нагружения.

С помощью выражения (22) можно решить прямую и обратную задачи выбора режима нагружения материала. Методологические аспекты выбора режима нагружения рассмотрены в работе [1].

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Принципиальная схема установки для исследования неупругой деформации материалов представлена на рис. 2. В качестве датчиков относительной деформации ϵ использованы тензометрические сопротивления, представляющие собой проволочные или фольговые резисторы, меняющие свой номинал при деформации. Метрологический характер тензодатчика определяет коэффициент тензочув-

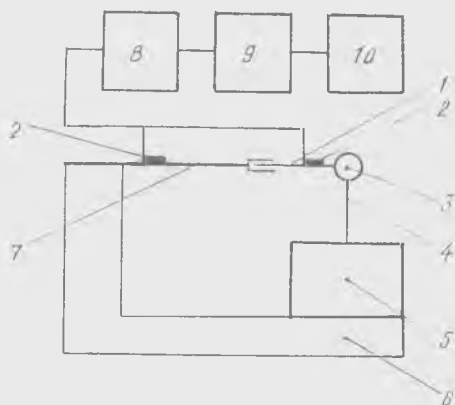


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 — образец, 2 — тензодатчики, 3 — карданный подвес, 4 — тяга вибратора, 5 — вибратор, 6 — основание, 7 — динамометр, 8 — усилитель, 9 — фазовращатель, 10 — осциллограф

ствительности

$$K = (\Delta R/R_0) / (\Delta l/l_0) = \Delta R / (R_0 \varepsilon),$$

где ΔR и Δl — абсолютное изменение резистивного сопротивления и длины датчика; R_0 и l_0 — начальное сопротивление и длина датчика. Коэффициент тензочувствительности равен 1—2 для металлических и 100 для полупроводниковых тензодатчиков.

Одна группа датчиков 2 наклеивается на образец 1, а другая группа на упругий динамометр 7, деформация которого пропорциональна прилагаемому к образцу усилию. Сигнал с датчиков на образце через усилитель 8 и фазовращатель 9 поступает на горизонтальный канал осциллографа 10 и вызывает отклонение электронного луча по горизонтали, пропорциональное деформации образца. Сигнал с датчиков на динамометре также через усилитель и фазовращатель поступает на вертикальный канал осциллографа и вызывает отклонение электронного луча по вертикали, пропорциональное усилию. Нагружение материала (образца) осуществляется с помощью электромагнитного вибратора 5 с частотой 25 Гц.

Если деформация образца происходит упругим образом, то на экране осциллографа получается наклонная линия, характеризующая связь между напряжением и деформацией. В случае неупругой деформации образца на экране осциллографа получается наклонная петля гистерезиса в координатах, пропорциональных усилию и деформации образца.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы отличия между полной, упругой и неупругой деформациями?
2. Какова связь между ε и σ для случаев статической и динамической деформаций?
3. Что характеризует величина неупругой деформации?
4. Каков физический смысл площади, ограниченной петлей гистерезиса?
5. В каком случае петля гистерезиса вырождается в прямую линию?
6. Какова взаимосвязь между усталостной прочностью и неупругой деформацией материалов?

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с теоретической частью работы.
2. Ознакомиться с лабораторной установкой.
3. Вывести регулятор уровня возбуждения вибратора в крайнее левое положение.

4. Включить лабораторную установку в сеть.
5. Получить на экране осциллографа гистерезисные кривые, соответствующие четырем уровням нагружения. Уровень нагружения меняется с помощью изменения уровня возбуждения вибратора.
6. Полученные кривые зарисовать на масштабной бумаге и определить для всех случаев площадь петли гистерезиса.
7. С помощью графических материалов определить $\Delta \epsilon_n$ и Q_1 для четырех уровней нагружения.
8. Построить зависимость Q_1 от σ .

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель лабораторной работы.
2. Структурная схема лабораторной установки.
3. Масштабное изображение гистерезисных кривых.
4. Результаты расчета Q_1 и $\Delta \epsilon_n$.
5. Зависимости $Q_1 \cong f(\sigma)$ и $\Delta \epsilon_n \cong f(\sigma)$.
6. Выводы о влиянии σ на параметры Q_1 и $\Delta \epsilon_n$.
7. Расчет многоциклового усталостной прочности.
8. Общие выводы о результатах работы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ОТЧЕТА ПО РАБОТЕ

1. В чем отличие с физической точки зрения статической прочности материалов от динамической?
2. Приведите примеры использования представления об усталостной прочности применительно к РЭА.
3. Какой случай нагружения следует считать квазистатическим?
4. Что следует помнить под усталостной прочностью материалов?
5. Какова взаимосвязь между комплексным и статическим модулями Юнга?
6. Сформулировать деформационный и энергетический критерии усталостного разрушения материалов.
7. Для какой цели используются фазовращатели в схеме, представленной на рис. 2?
8. Объяснить физическую природу тензочувствительности резистивных материалов.
9. Рассмотреть аналогию рассматриваемых явлений с явлением диэлектрических потерь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Постников В. С. Внутреннее трение в металлах. М.: Металлургия, 1969. 330 с.