

Контрольный
экземпляр
На правах рукописи

ШЛЕЙХЕР Антон Александрович

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН
ПО ДАННЫМ ОГРАНИЧЕННОГО ЧИСЛА
ИСПЫТАНИЙ

Специальность 01.02.06 –

“Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры”

АВТОРЕФЕРАТ
диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск 1999

Работа выполнена на кафедре "Летательные аппараты" Южно-Уральского государственного университета

Научный руководитель -

доктор технических наук, профессор *Шефер Л.А.*

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор *Дулякин В.М.*,

кандидат технических наук *Борисов Е.М.*

Ведущая организация -

Государственный ракетный центр "КБ им. академика В.П. Макеева"

Защита состоится *29 сентября 1999 г.* в 15 часов, на заседании диссертационного совета Д053.13.01 при Южно-Уральском государственном университете: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЧГТУ

Ваш отзыв в двух экземплярах, скрепленных печатью, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЧГТУ, Ученый совет.
Тел.(3512) 39-91-23.

Авто-эферат: разослан *15 августа 1999 г.*

Ученый секретарь
диссертационного совета

к.т.н., доцент

 *В.М. Кононов*

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Разрушение несущих элементов машиностроительных конструкций, работающих в условиях вибраций, может происходить от действия статических или динамических нагрузок. Причем, разрушение от статических или пиковых динамических нагрузок происходит в основном в результате аварии или из-за ошибочного проектного расчета, что бывает довольно редко. Выход конструкции из строя обычно обусловлен длительным действием динамических нагрузок и, как правило, носит усталостный характер.

Чтобы свести к минимуму вероятность возникновения таких отказов, для проектируемых элементов машиностроительных конструкций необходимо получать экспериментально или прогнозировать характеристики сопротивления усталости, на базе которых производится оценка ресурса и запасов прочности.

Общую задачу определения характеристик сопротивления усталости деталей машин можно представить как совокупность задач расчета нагруженности, экспериментального определения усталостных свойств материала и оценки влияния на эти свойства конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, которые возникают при переходе от лабораторного образца к натуральному элементу конструкции.

Существующие методы статистической динамики и расчета нагруженности, изложенные в работах В.В. Болотина, В.А. Светлицкого, А.А. Силаева, Н.И. Гриненко, Ю.С. Павлюка и др., позволяют при известном случайном воздействии и динамических параметрах системы вычислять статистические характеристики ее выхода в виде спектральных плотностей ускорений, перемещений, напряжений и других параметров случайных процессов.

Результаты исследований усталостных свойств лабораторных образцов материалов и деталей машин и приведены в трудах С.В. Серенсен, В.П. Когалева, В.Т. Трощенко, И.В. Кудрявцева, М.Н. Степнова, Е.В. Гиацинтова, М.Я. Гальперина, А. Кеннеди, Р. Хейвуда, Г. Ниситани, К. Массоне и др.

Различные методы расчета усталостной долговечности машиностроительных конструкций рассмотрены такими учеными, как Н.Н. Афанасьев, В.В. Болотин, С.В. Серенсен, В.П. Когалев, В.Т. Трощенко, М.Н. Степнов, Н.И. Гриненко, В. Вейбулл, Г. Нейбер, Р. Хейвуд, Р. Петерсон и др.

Анализ существующих подходов к оценке ресурса и запасов прочности элементов конструкций в условиях эксплуатационного нагружения показывает, что в настоящее время уже разработаны расчетные методы, позволяющие оценивать влияние на усталостные свойства деталей таких факторов, как концентрация напряжений, масштаб, вид нагружения и некоторых других. В тоже

время, существующие способы оценки технологических и большинства эксплуатационных факторов базируются на проведении большого количества лабораторных испытаний, что является очень неудобным, поскольку требует больших материальных и временных затрат

Между тем, при проектировании или доводке новой конструкции вопрос об изменении технологии производства ряда деталей и узлов встает довольно часто. В связи с этим, *целью данной работы* является разработка вероятностного метода, позволяющего прогнозировать статистические характеристики сопротивления усталости деталей машин по данным ограниченных испытаний.

В данной работе будет рассмотрен вероятностный метод, позволяющий восстанавливать кривую усталости детали или элемента конструкции после изменения технологии их изготовления. Исходной информацией для этого будет служить база данных с результатами усталостных испытаний и результаты испытаний 5...6 образцов или деталей на каком-нибудь одном уровне нагружения.

Основным преимуществом предлагаемого метода перед существующими в настоящее время является минимальное количество экспериментальных данных, необходимое для его применения.

Научная новизна. На основе обобщения экспериментальных данных и информации о влиянии технологических факторов производства на усталостные свойства деталей машин было сделано допущение о постоянстве угла наклона к оси долговечностей кривых усталости деталей, имеющих схожую внутреннюю структуру. На основании этого допущения получены расчетные зависимости для определения статистических параметров кривой усталости по результатам испытаний 5...6 образцов или деталей.

Практическая значимость работы. Практическая ценность диссертационной работы состоит в следующем

разработана методика ускоренной экспериментальной оценки влияния технологических факторов изготовления деталей на их долговечность

– получены аналитические зависимости определения статистических параметров кривой усталости материала.

– для обеспечения простоты использования вероятностного метода в практике инженерных расчетов деталей машин на усталость разработана компьютерная программа USTALOST.

На защиту выносятся метод ускоренной экспериментальной оценки влияния технологических факторов изготовления детали на ее долговечность.

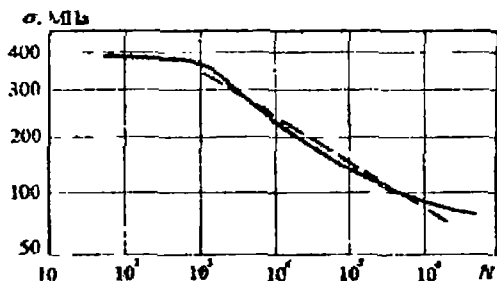
Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 3 печатных работы.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, общих выводов, списка литературы, включающего 41 наименование и приложения. Она изложена на 108 страницах основного текста и содержит 47 рисунка, 7 таблиц.

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой темы, освещены основные положения выносимые на защиту

В первой главе подробно рассмотрены способы, позволяющие оценивать влияние конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на долговечность деталей машин. Отмечается, что для обеспечения необходимой надежности элементов конструкции под воздействием эксплуатационных нагрузок, статистические параметры, характеризующие нагруженность, необходимо сопоставить с предельным состоянием, в качестве которого используется кривая усталости материала или детали. Одна из таких кривых показана на рис. 1 сплошной линией

Рис. 1. Кривая усталости материала



Наибольший интерес представляет средний участок показанной на рисунке кривой от 10³ до 10⁶ циклов, так как сопротивление усталости в этом диапазоне значений усталостной долговечности определяет ресурс большинства конструкций авиационной и ракетной техники, автомобильного и железнодорожного транспорта.

Аналитическое представление этого участка обычно записывают в виде уравнения

$$\sigma_a^m \cdot N = c; \quad (1)$$

где c и m постоянные, зависящие от свойств материала и конструктивно-технологических особенностей, σ_a — амплитуда напряжений, а N — количество циклов до разрушения.

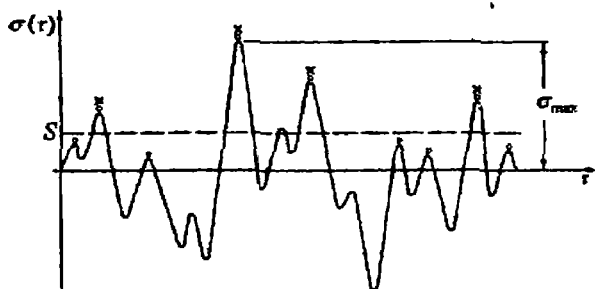
Графически зависимость (1) показана на рис. 1 пунктирной линией

Очевидно, что наибольшую точность при расчете ресурса и запасов прочности в условиях действия эксплуатационных нагрузок можно получить только тогда, когда кривые усталости материала или детали получены в условиях такого же нагружения, какое испытывает конструкция при своей работе, из-за чего такая форма представления кривой усталости, как показана на рис. 1, не будет являться универсальной, а будет подходить только для какого-нибудь одного

конкретного случая эксплуатационного нагружения определенного элемента конструкции.

Любое изменение в процессе нагружения реальной конструкции или в ее форме, или в способе изготовления и т.д. ведет к необходимости повторных испытаний с целью повторного построения кривой усталости, что существенно увеличивает объем предварительных экспериментальных исследований, проводимых на конструктивно подобных образцах или элементах конструкций. Это является очень неудобным, поскольку требует больших материальных и временных затрат.

С целью сокращения затрат времени, повышения достоверности расчетов и экономии средств случайные процессы нагружения с помощью методов схематизации стали приводиться к числовым характеристикам, определяющим интенсивность нагружения и структуру процесса с точки зрения влияния на усталостную долговечность. Из основных работ в этом направлении можно отметить теории Когаева В.П., Степнова М.Н. и ряда других авторов.



σ — наивысшие максимумы; $*$ — повреждающие максимумы.

Рис.2. Структура процесса нагружения

Вследствие того, что эксплуатационные нагрузки, как правило, носят случайный характер, то наиболее подходящей для оценки предельного по усталости состояния элементов конструкции при действии таких нагрузок оказалась теория, разработанная лабораторией вибропрочности кафедры "Летательные аппараты" ЧГУУ. В ней в качестве характеристик процесса нагружения были приняты:

- σ_m — математическое ожидание (среднее значение), характеризующее статистическое смещение напряжений
- S — среднее квадратическое отклонение напряжений (СКО), характеризующее интенсивность нагружения;
- N_0 — число пересечений нулевого уровня центрированным процессом с заданным знаком производной, характеризующий долговечность;

G – критерий, отражающий вероятностную структуру процесса нагружения, который определяется следующей интегральной зависимостью

$$G = \frac{S_{max} \cdot n_s \cdot \sigma_{max}}{S_m \cdot n \cdot S}, \quad (2)$$

где S_m – среднее квадратическое значение положительных максимумов, n – среднее число положительных максимумов процесса, S_{max} – среднее квадратическое значение повреждающих максимумов, n_s – среднее число повреждающих максимумов (под повреждающими понимаются максимумы, лежащие выше предела выносливости S_0), σ_{max} – максимальный выброс процесса, соответствующий заданной вероятности (например, $P = 0.997$).

Пояснение к выражению (2) показано на рис. 2.

Необходимо отметить, что с помощью параметров σ_m , S , G и N_0 удается описать большинство нагрузок, действующих на машиностроительные конструкции в процессе их эксплуатации, и потому аналитически обобщенное уравнение кривых усталости стали записывать в следующем виде

$$\overline{\lg N_{\sigma}} = A_r - B \cdot \lg \left[Q_i^{2/B} (S_i - S_0) \right], \quad (3)$$

где $Q_i = \left(\frac{2.58}{4 - G_i} \right)^{B/\eta}$, A и B – параметры диаграммы, S_0 – предел неограниченной выносливости материала.

Уравнение (3) полученное по результатам статистической обработки данных усталостных испытаний, соответствует математическому ожиданию долговечности (т.е. вероятности разрушения $P = 0.5$) и может использоваться только для центрированных процессов нагружения. Если речь идет о совместном действии статических и динамических нагрузок, необходимо учитывать влияние асимметрии нагружения. Для этого обобщенная диаграмма дополняется комплексом $(1 + \psi_s \cdot \mu_i)$, вводящем в диаграмму асимметрию процесса нагружения

$\mu_i = \frac{\sigma_{mi}}{S_i}$, комплексом $\frac{Q_i}{Q_i \pm iq \cdot v_s}$, учитывающим рассеивание долговечностей, и записывается

$$\overline{\lg N_{\sigma}} = A_r - B \cdot \lg \left[Q_i^{2/B} \left(\frac{Q_i (1 + \psi_s \cdot \mu_i)}{Q_i \pm iq \cdot v_s} S_i - S_0 \right) \right], \quad (4)$$

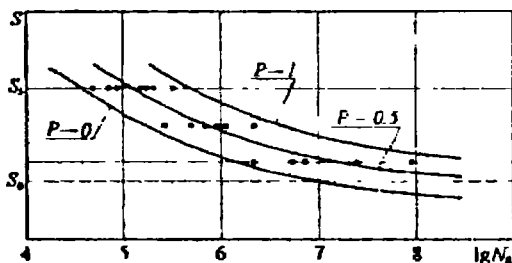
где iq – квантиль распределения Стьюдента, определяемый через требуемую вероятность и число имеющихся экспериментальных данных, v_s – коэффициент вариации пределов ограниченной выносливости.

Зависимость (4) позволяет определить предельное состояние материала при гармоническом, случайном, полигармоническом с близкими частотами и смешанном нагружениях с заданной вероятностью не разрушения, а построенная по моменту возникновения макротрещины для вероятности $P \rightarrow 0$ и соответствующая структуре процесса G , будет представлять нижнюю границу преде-

лов ограниченной выносливости для элементов конструкции, к надежности которых предъявляются наиболее жесткие требования (см. рис. 3)

Проведенный в первой главе обзор работ показал, что существующие на сегодняшний день методы расчетного определения усталостных свойств элементов машиностроительных конструкций позволяют производить пересчет любого случайного процесса нагружения на гармонический и обратно, одного вида нагружения образца на другой (например, изгиб на растяжение - сжатие) в одной формы образца или детали на любую другую, не требуя при этом проведения дополнительных испытаний.

Рис. 3. Обобщенная диаграмма усталости



В тоже время, оценка значимости или не значимости влияния на усталостные свойства элементов конструкций различных технологических факторов производства требует необходимости проведения стандартных усталостных испытаний 50...60 и более лабораторных образцов или деталей. В связи с чем цель диссертационной работы:

- *Разработать вероятностный метод оценки влияния технологических факторов производства детали на статистические характеристики сопротивления усталости*

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. *Разработка метода расчета, позволяющего восстанавливать кривую усталости детали или элемента конструкции после изменения технологии их изготовления по результатам испытаний 5...6 образцов на одном уровне нагружения;*
2. *Разработка алгоритма и вычислительных программ, позволяющих оценивать влияние технологических факторов производства на характеристики сопротивления усталости деталей машин.*

3. Проведение экспериментальных исследований и сравнение результатов расчета при помощи предлагаемого метода с результатами экспериментов.

Во второй главе изложена методика ускоренной экспериментальной оценки влияния технологических факторов изготовления деталей на их долговечность, и приведен пример ее использования при определении статистических характеристик сопротивления усталости алюминиевых образцов.

В основу предлагаемого метода положено следующее свойство кривых усталости.

Как уже было сказано, графическая аппроксимация результатов усталостных испытаний для любого процесса нагружения может быть представлена в виде логарифмической кривой (3). Эта кривая, построенная в логарифмических координатах, представляет собой прямую, уравнение которой

$$Y = A - B \cdot X, \quad (5)$$

где $Y = \lg N_{0.2}$ - долговечность на уровне напряжения S_x , X - комплексный параметр, характеризующий нагруженность, A и B - параметры диаграммы.

Анализ результатов усталостных испытаний с помощью уравнения (5) показывает, что для образцов материала заданной марки и выбранном критерии повреждения (разрушение, трещина) параметр B аппроксимации остается величиной мало изменяющейся, не зависящей от структуры процесса нагружения и степени концентрации напряжений. Имеющиеся экспериментальные точки достаточно хорошо аппроксимируются зависимостью

$$B = \alpha_0 \cdot \operatorname{ctg}(0.0026\sigma_s), \quad (6)$$

где $\alpha_0 = 2.91$ - изгиб по моменту появления трещины, $\alpha_0 = 2.65$ - изгиб по полному разрушению критического сечения образца, $\alpha_0 = 3.18$ - растяжение - сжатие, полное разрушение образца.

График зависимости (6) представлен на рис.4.

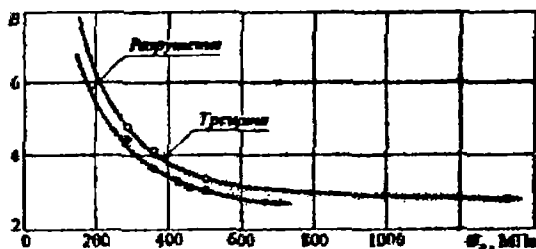


Рис.4. Зависимость параметра B от σ_s материала

Коэффициент B в уравнении (5) определяет угол наклона прямой на плоскости $\lg N_{0.2}$ - $\lg X$, как видно из графика на рис.4, начиная с σ_s материала больше 600 МПа, изменяется всего на 8%.

Такое незначительное его изменение говорит о том, что кривые усталости образцов будут иметь одинаковый угол наклона к оси долговечностей, или иначе, будут проходить практически параллельно друг другу.

Такое свойство кривых усталости может быть использовано при оценке влияния различных технологических факторов производства детали на ее долговечность. Например, различных способов термообработки.

Для пояснения предположим, что мы имеем кривую усталости деталей, у которых $\sigma_s = 800$ МПа, и по какой-то причине необходимо изменить технологию их изготовления. Допустим, в результате изменения режимов термообработки удалось улучшить структуру материала настолько, что предел прочности увеличился до 900 МПа. Такое изменение технологического процесса неизбежно приведет к изменению положения кривой усталости. Из графика, показанного на рис. 4, видно, что при этом кривые усталости (исходная и построенная заново) будут иметь примерно одинаковый угол наклона к оси долговечностей, а это позволяет по одной известной кривой восстановить другую, имея всего одно значение средней долговечности на каком-нибудь одном уровне напряжения. Проще говоря, если мы знаем одну экспериментальную точку прямой и знаем, что прямая пройдет параллельно известной, то не составляет большого труда восстановить всю прямую.

Для этого, принимаем известную кривую усталости в качестве базовой. Теперь положение искомой кривой будет определяться коэффициентами A и S_0 уравнения (3). Чтобы их найти, достаточно испытать на каком-нибудь одном уровне напряжения $S_i^{\text{зад}}$ 5...6 образцов или деталей с целью получения среднего значения долговечности $\overline{\lg N_{\alpha i}^{\text{зад}}}$ и рассеивания усталостных свойств.

Среднее значение долговечности на выбранном уровне можно будет определять по формуле

$$\overline{\lg N_{\alpha}^{\text{зад}}} = \frac{\sum_{i=1}^n \lg N_i}{n};$$

а дисперсию значений

$$s_{\lg N}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\lg N_i - \overline{\lg N_{\alpha}^{\text{зад}}} \right)^2.$$

В связи с тем, что выборочные числовые характеристики усталостных свойств обладают определенным рассеянием, возникает необходимость определения значимости или случайности в расхождениях, полученных выборочных и известных генеральных характеристик усталостных свойств между собой.

В качестве генеральных характеристик можно принять параметры базовой кривой усталости, а данные, полученные в результате проведенных испытаний, будем считать выборочными.

В случае, когда неравны ни средние значения долговечностей, ни дисперсии, положение кривой усталости должно быть уточнено.

Для определения равенства или неравенства дисперсий и средних значений долговечности необходимо использовать методы математической статистики.

Наиболее просто о равенстве выборочной и генеральной дисперсий долговечностей можно судить по выполнению неравенства

$$\frac{s_{lg N}^2}{\sigma_0^2} \leq \frac{\chi_\alpha^2}{n-1},$$

где σ_0^2 — генеральная дисперсия долговечностей, $s_{lg N}^2$ — выборочная дисперсия долговечностей на уровне S_i^{max} , полученная в результате испытаний, n — количество испытанных образцов, χ_α^2 — квантиль распределения, который можно найти по таблицам вероятностей для уровня значимости α и числа степеней свободы $k = n - 1$.

За значение σ_0^2 примем значение дисперсии долговечностей на выбранном уровне СКО напряжений S_i^{max} и будем получать его с помощью базовой кривой усталости

Например, если базовая кривая усталости была получена при гармоническом процессе нагружения (т.е. $Q_i = 1$), то уравнение (3) переписывается

$$\lg N_{oi} = A_r - B \cdot \lg(S_i - S_0),$$

и значение σ_0 можно будет определить по формуле

$$\sigma_0 = \frac{v_s \cdot S_i^{max} \cdot B}{2.3 \cdot (S_i^{max} - S_0)}. \quad (7)$$

Проверку нулевой гипотезы о равенстве средних значений долговечности можно проводить с помощью критерия Фишера F , который предусматривает вычисление статистики:

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2},$$

и сопоставлением ее с критическим значением $F_{1-\alpha}$, для выбранного α , числа партий m и $k = n - 1$, где n — количество испытанных образцов.

Дисперсия s_1^2 характеризует рассеивание между партиями. Дисперсия s_2^2 носит название внутренней или остаточной и характеризует рассеивание связанное с неоднородностью материала, случайными колебаниями условий испытаний и т.д.

Для того чтобы вычислять дисперсии s_1^2 и s_2^2 воспользуемся следующим допущением:

- Будем считать равновесными результаты испытаний и результаты полученные при помощи базовой кривой усталости, т.е. количество испытанных на уровне S_1 образцов n_1 будет соответствовать количеству образцов n_2 , испытанных на этом же уровне при построении базовой кривой усталости.

Тогда общее количество образцов $n = n_1 + n_2 = 2n_1$.

Определим среднее значение долговечности на уровне СКО напряжения S_1^{max}

$$\bar{\lg N}_{cp} = \frac{\lg N_{от}^{max} + \bar{\lg N}_{от}^{6\sigma_1}}{2}.$$

Определим среднюю дисперсию между партиями

$$s_1^2 = n \left[\left(\lg N_{от}^{max} - \bar{\lg N}_{cp} \right)^2 + \left(\lg N_{от}^{6\sigma_1} - \bar{\lg N}_{cp} \right)^2 \right].$$

и найдем среднюю дисперсию внутри партий

$$s_2^2 = s_{lg N}^2 + \sigma_D^2.$$

Если теперь критерий Фишера F окажется меньше табличного $F_{1-\alpha}$, найденного для числа степеней свободы $k_1 = 1$, $k_2 = n - 2$ и уровня значимости α , то все рассматриваемые результаты принадлежат одной генеральной совокупности. Следовательно, нулевая гипотеза о равенстве средних значений долговечности не отклоняется.

Если же критерий Фишера оказывается больше табличного то положение кривой усталости должно быть уточнено

Для этого первоначально вычисляем коэффициент k :

$$k = S_1^{6\sigma_1} - S_1^{max}.$$

$S_1^{6\sigma_1}$ определяется при помощи базовой кривой и соответствует полученной в результате эксперимента величине $\lg N_{от}^{max}$.

Затем определяется значение коэффициента S_0 , который называется пределом неограниченной выносливости материала, выраженным в СКО. Однако, для широкого ряда конструкционных сплавов оказалось, что физического предела выносливости (величины, ниже которой усталостное разрушение не происходит) не существует и можно оценить лишь величину, не превышение которой обеспечивает достаточно большую усталостную долговечность, например 10^7 или 10^9 циклов. И для того, чтобы определить этот предел необходимо задаться базовым числом циклов N_0^* . Обычно, эта величина для сталей составляет 10^7 и 10^8 циклов для алюминиевых сплавов.

Значение $S_1^{6\sigma_1}$ при $\lg N_{от}^{6\sigma_1} = \lg N_0^*$, уменьшенное на коэффициент k будем считать неограниченным пределом выносливости S_0^{max} материала, для которого производим вычисления параметров кривой усталости, т.е.

$$S_0^{\text{экс}} = S_1^{\text{баз}} - k.$$

Последовательность дальнейших вычислений показана на рис. 6.

Предполагая, что получаемая нами кривая будет проходить параллельно базовой в диапазоне долговечностей от 10^4 до $N_0^{\text{баз}}$ зададимся еще 5...6 значениями долговечности и аналогично получим соответствующий им уровень нагружения (см. рис. 6).

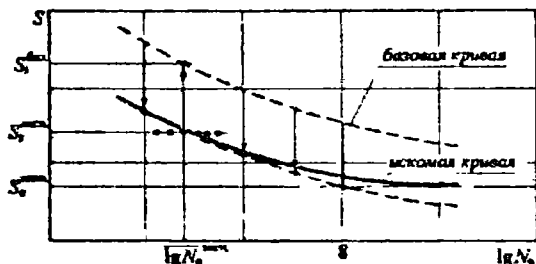


Рис. 6. Последовательность получения кривой усталости

Теперь кривую усталости можно будет получить графически, соединив полученные точки, или аналитически. При аналитическом определении необходимо получить недостающий коэффициент уравнения A . Наиболее просто это можно сделать, используя метод наименьших квадратов.

Выберем в качестве варьируемого параметра коэффициент B , который вначале принимаем равным двум, и вычислим коэффициент A по следующей зависимости:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^l \lg N_{oi} + \sum_{i=1}^l B \cdot \lg \left[Q_i^{2/B} \cdot (S_i - S_0^{\text{экс}}) \right]}{l}.$$

где l — количество выбранных значений долговечности, для которых произвели вычисления соответствующих им значений напряжения

Затем найдем СКО значений математического ожидания логарифмов долговечностей от найденного с помощью уравнения кривой усталости (для вычисленных A и задаваемых B).

$$S_v = \sum_{i=1}^l \left\{ \lg N_{oi} - \left[A - B \cdot \lg \left(Q_i^{2/B} (S_i - S_0^{\text{экс}}) \right) \right] \right\}^2.$$

Определяем минимальное значение параметра S_v . Величины A и B , соответствующие минимуму S_v , принимаем за расчетные.

При расчете конструкции на долговечность, кроме параметров кривой усталости A , B и S_0 , необходимо знать рассеивание результатов усталостных испытаний. В качестве параметра, определяющего рассеивание, принято использовать коэффициент вариации пределов ограниченной выносливости v_p .

Определить значение коэффициента вариации v_s можно будет по зависимости (7), подставив вместо σ_s вычисленное значение дисперсии $s_{\sigma s}$.

Таким образом, полученных в результате проведенных расчетов данных оказывается достаточно для построения обобщенной диаграммы усталости материала (4)

Все это позволило разработать вероятностный метод ускоренной экспериментальной оценки влияния ряда технологических факторов производства деталей на их долговечность, согласно которому была предложена следующая последовательность получения параметров кривой усталости детали или элемента конструкции.

1. Выбор базовой кривой;
2. Выбор уровня нагружения;
3. Экспериментальное определение среднего значения долговечности и дисперсии на выбранном уровне нагружения;
4. Оценка значимости или случайности в расхождении полученных экспериментальных и известных генеральных характеристик между собой;
5. Уточнение положения искомой кривой усталости.

Поскольку, объективную оценку теории или метода можно получить только при сопоставлении результатов расчета с экспериментальными данными, третья глава диссертации и посвящена экспериментальному подтверждению предлагаемого метода. В ней рассмотрена возможность применения этого метода для оценки влияния на усталостные свойства материала таких технологических факторов производства, как качество обработки поверхности, направление вырезки детали из исходной заготовки и наличие в деталях сварного соединения, по данным опубликованным или в книгах или научно-технических отчетах, предоставленных лаборатории вибропрочности кафедры "Летательные аппараты" смежными организациями.

Так, исследования влияния доводочных технологических операций на сопротивление усталости были предприняты Б.В. Бойцовым, и их результаты были опубликованы в его книге "Надежность истребителя". Испытания проводились на лабораторных образцах, изготовленных из горячекатанного прутка стали 30ХГСН2А одной плавки. Чистота рабочей поверхности образцов варьировалась при этом от $R_a = 0,206$ мкм. до $R_a = 0,692$ мкм. В каждом варианте технологического процесса было испытано по 10... 20 образцов. В диапазоне предполагаемых значений предела неограниченной выносливости испытывалось по 4 образца (2 образца не разрушались).

Большое количество испытаний по оценке влияния анизотропии материала на усталостные свойства деталей было проведено в Государственном ракетном центре г. Миасса. Однородные лабораторные образцы вырезались в различных направлениях относительно оси исходной заготовки (например, если исходной заготовкой служила плита, то в продольном и поперечном направлениях). По-

сле чего на изгиб или растяжение-сжатие испытывались 30...60 образцов. Используя полученные результаты, строились кривые усталости образцов, имеющих различное направление волокон материала.

Исследования влияния сварного соединения на усталостные свойства деталей также проводились в Государственном ракетном центре г. Миасса. Для этого исходные алюминиевые заготовки сваривались между собой аргонодуговой или электронно-лучевой сваркой. Ориентация образцов при изготовлении осуществлялась таким образом, чтобы сварной шов проходил поперек критического сечения.

Используя данные, которые удалось найти в литературных источниках, с помощью предлагаемого вероятностного метода расчета, были получены еще одни кривые усталости для тех же самых образцов и в большинстве из рассмотренных случаев удалось добиться хорошего совпадения результатов.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию долговечности алюминиевых сплавов 01420, 01421 и 01570. Испытания проводились также с целью подтверждения возможности применения предлагаемого метода на гладких лабораторных образцах при таких способах их нагружения как изгиб и растяжение-сжатие.

Исследования характеристик сопротивления усталости образцов при растяжении-сжатии осуществлялось на испытательной машине МИР - 8 института механики Украины при частоте нагружения $f = 50$ Гц.

Для испытания на изгиб использовалась электро-механическая установка кафедры "Летательные аппараты".

Исходные заготовки материалов 01420 и 01421, из которых впоследствии изготавливались лабораторные образцы, подвергались различным режимам термической обработки. Для нахождения полученных в результате таких технологических операций характеристик сопротивления усталости проводились испытания 5...10 образцов на 4...6 различных уровнях нагружения.

Испытания проводились согласно ГОСТ 25.502 - 79

В качестве критерия повреждения служило полное разрушение образцов.

По результатам испытаний составлялись таблицы исходных данных, используя которые определяли математическое ожидание логарифмов долговечности и их СКО, соответствующие конкретным значениям амплитуд напряжений. После этого, используя полученные результаты, строили кривые усталости лабораторных образцов, изготовленных из одного материала, но прошедших различные режимы термической обработки.

В дальнейшем из базы данных выбирались подходящая кривая усталости и по результатам испытаний на одном уровне нагружения, используя методику описанную во второй главе, рассчитывались параметры еще одной кривой усталости этих же образцов.

Сравнение при помощи дисперсионного анализа всех полученных расчетом результатов с результатами испытаний показали их полное совпадение.

Это позволило сделать вывод, что если при оптимизации процесса производства встает вопрос об изменении режимов термической обработки деталей или выборе исходной заготовки, то для определения получаемых в результате такого изменения усталостных свойств в ряде случаев достаточно испытывать не более 10 образцов или деталей

ВЫВОДЫ

1. На базе существующих алгоритмов DETAL и ZONA, позволяющих производить пересчет параметров кривой усталости с одной формы образца или детали на любую другую и производить оценку влияния различных технологических факторов производства этих деталей на их долговечность, были разработаны вычислительные программы, необходимые для проведения исследований и расчетов кривых усталости деталей
2. Разработан вероятностный метод расчета характеристик сопротивления усталости деталей машин после изменения технологии их изготовления по результатам испытаний 5...6 образцов или деталей на одном уровне нагружения
3. Разработана методика ускоренной экспериментальной оценки влияния технологических факторов изготовления деталей на долговечность, позволяющая существенно сократить объем испытаний, время, стоимость работ и обеспечивающая приемлемую для практических расчетов точность.
4. На основании принятого допущения о равенстве углов наклона к оси долговечности кривых усталости образцов, изготовленных из материалов, схожих по своей внутренней структуре, были получены расчетные зависимости и разработана вычислительная программа USTALOST, позволяющая в режиме диалога определять характеристики сопротивления усталости деталей машин.
5. Проведены экспериментальные исследования усталостных свойств материалов 01420, 01421, 01570 и исследовано влияние технологии изготовления на характеристики сопротивления усталости.
6. Был проведен сравнительный анализ предлагаемого вероятностного метода расчета с результатами экспериментальных исследований образцов и деталей из сталей и алюминиевых сплавов, который показал, что разработанный метод обеспечивает необходимую для практических расчетов точность при определении пределов ограниченной выносливости деталей машин.

Основные научные и практические результаты диссертации опубликованы в работах:

Шефер Л.А., Шлейхер А.А. Прогнозирование статистических характеристик сопротивления усталости деталей машин по данным ограниченных испытаний // Динамическая нагруженность и ресурс несущих конструкций транспортных средств. Научно-технический отчет. Челябинск: ЧГТУ, 1997.

Шлейхер А.А. Ускоренный метод получения обобщенной диаграммы усталости металлов // Динамика и прочность конструкций: с науч. трудов. Челябинск: ЮУрГУ, 1999.

Шефер Л.А., Шлейхер А.А. Экспериментальное подтверждение вероятностного метода расчета характеристик сопротивления усталости деталей // Динамика и прочность конструкций: с науч. трудов. Челябинск: ЮУрГУ, 1999.

Издательство Южно-Уральского государственного
университета

ЛР № 020364 от 10.04.97. Подписано в печать 23.06.99. Формат
60*80 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 0,93. Уч. -изд. л. 0,98.
Тираж 80 экз. Заказ 151/266.

УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.