

На правах рукописи



ЕРПАЛОВ Алексей Викторович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ
УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ И РАСЧЕТ РЕСУРСА
КОНСТРУКЦИЙ ПРИ АСИММЕТРИЧНОМ СЛУЧАЙНОМ
НАГРУЖЕНИИ**

Специальность:

**01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и
аппаратуры**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Челябинск – 2017

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Шефер Леопольд Анатольевич,
профессор кафедры летательных аппаратов
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский
государственный университет (национальный
исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Добровольский Сергей Владимирович,
профессор кафедры сопротивления
материалов ФГБОУ ВО «Ижевский
государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова»

доктор технических наук, профессор
Ерофеев Валерий Владимирович,
профессор кафедры технологии нефтяного
аппаратостроения ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной технический
университет»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Самарский национальный ис-
следовательский университет имени акаде-
мика С.П. Королева»

Защита диссертации состоится 20 декабря 2017 г. в 10⁰⁰ часов на заседа-
нии диссертационного совета Д 212.288.10 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский го-
сударственный авиационный технический университет» по адресу: 450008,
г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфим-
ский государственный авиационный технический университет» и на сайте
www.ugatu.su.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Ф.Г. Бакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Решение задач по дальнейшему повышению надежности машин и аппаратов, работающих в условиях вибрации, при одновременном снижении их материалоемкости тесно связано с обеспечением их усталостной долговечности. В ходе эксплуатации элементы конструкций летательных аппаратов, автомобильного и железнодорожного транспорта и перевозимых изделий подвергаются воздействию вибрационных нагрузок, которые, как правило, носят случайный характер. При этом динамические нагрузки осложнены асимметрией процесса нагружения в виду действия статических нагрузок (силы тяжести конструкции, линейной перегрузки). Длительное действие вибраций может приводить к качественным изменениям конструкций, большинство из которых носит усталостный характер.

Одним из показателей совершенства конструкций является их минимально возможный вес при сохранении эксплуатационных качеств. Снижение веса, особенно для летательных аппаратов, связано с уменьшением коэффициентов запаса прочности их элементов, что существенно повышает требования к точности методов расчета усталостной долговечности с учетом структуры действующих процессов, их математического ожидания и заданной вероятности разрушения. Сложность используемого оборудования, длительность испытаний свидетельствуют о перспективности исследований в этой области и их необходимости для промышленности. Поэтому исследование характеристик сопротивления усталости материалов при асимметричном случайном нагружении, а так же вероятностная оценка ресурса конструкций представляются актуальными.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка методики вероятностной оценки ресурса конструкций, работающих в условиях асимметричного случайного или гармонического нагружения, проведение испытаний и выдача рекомендаций по проведению усталостных испытаний конструкционных материалов с использованием современных испытательных и измерительных систем.

В работе решены следующие **задачи**:

1. Проведена серия экспериментальных исследований усталостных характеристик конструкционных материалов при консольном изгибе с воздействием гармонического и случайного нагружений в отдельности.

2. Разработана корректирующая модель средних квадратических отклонений (СКО) напряжений, позволяющая учитывать асимметрию нагружения для эксплуатационного процесса нагружения (гармонический, случайный).

3. Разработана модель учета рассеивания усталостных характеристик материала при использовании предложенной корректирующей модели СКО напряжений.

4. Разработана методика расчета ресурса и запасов циклической прочности элементов конструкций при действии асимметричного эксплуатационного процесса нагружения с использованием предложенной корректирующей модели СКО напряжений.

Методы исследований. При выполнении работы исследования усталостных характеристик материалов проводились с учетом методик расчета деталей машин на выносливость. Их анализ проводился численным исследованием с помощью компьютерных пакетов MatLab, Python, методами дифференциального и интегрального исчисления, математической статистики и теории вероятности.

Научная новизна. Новыми являются следующие основные результаты:

1. Разработаны новые методические рекомендации по проведению усталостных испытаний материалов на вибростенде при действии стационарного гауссового случайного или гармонического процесса нагружения с учетом действия статического нагружения.

2. Получены новые экспериментальные данные об усталостной прочности алюминиевого сплава АМг-61 при действии случайного и гармонического процессов нагружения, осложненных асимметрией цикла.

3. Сформирована новая корректирующая модель СКО напряжений, отличающаяся от существующих возможностью прогнозировать усталостные характеристики материалов при асимметричном случайном нагружении и учитывать изменения по долговечности.

4. Предложена новая модель учета рассеивания усталостных характеристик материала, применимая для разработанной корректирующей модели СКО напряжений.

5. Разработана новая методика расчета ресурса и запасов циклической прочности элементов конструкций при асимметричном эксплуатационном процессе нагружения, отличающаяся возможностью учесть предлагаемую корректирующую модель СКО напряжений.

Практическая значимость. В процессе выполнения работы получены следующие практические результаты:

1. Для проведения усталостных испытаний конструкционных материалов разработана методика испытаний, спроектирована и изготовлена специальная экспериментальная оснастка для вибростенда, позволяющая реализовывать консольный изгиб одновременно для шести плоских образцов и задавать асимметрию цикла нагружения.

2. Получены новые экспериментальные данные по усталостным свойствам сплава АМг-61 при симметричных и асимметричных видах нагружения с воздействием как гармонического, так и случайного процессов.

3. Разработано программное обеспечение, позволяющее обрабатывать результаты вибрационных испытаний образцов и прогнозировать усталостные характеристики материала с учетом асимметрии цикла нагружения и вероятности разрушения.

4. Разработана методика расчета ресурса и запасов циклической прочности элементов конструкций, работающих в условиях асимметричного эксплуатационного нагружения.

На защиту выносятся: совокупность полученных новых данных экспериментальных исследований усталостных свойств конструкционных материалов при действии гармонического или стационарного гауссового случайного нагру-

жения с асимметрией; корректирующая модель СКО напряжений, учитывающая асимметрию нагружения; модель учета рассеивания усталостных характеристик материала; общая схема расчета долговечностей и запасов циклической прочности элементов конструкций с использованием корректирующей модели СКО напряжений.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на: VI Научно-технической конференции аспирантов и докторантов (секция Технические науки, ЮУрГУ, г. Челябинск, 2014); VII Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос» (БГТУ, г. Санкт-Петербург, 2014); VII Научно-технической конференции аспирантов и докторантов (секция Технические науки, ЮУрГУ, г. Челябинск, 2015); Международной научно-технической конференции Пром-Инжиниринг (ЮУрГУ, г. Челябинск, 2015); VIII Научно-технической конференции аспирантов и докторантов (секция Технические науки, ЮУрГУ, г. Челябинск, 2016).

Результаты диссертационной работы использовались при выполнении научно-исследовательских работ совместно с АО «ГРЦ им. Макеева».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, включая четыре статьи в журналах, рекомендованных ВАК России, и одно свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, списка литературы, включающего 128 наименований, содержит 144 страницы машинописного текста, 56 иллюстраций, 28 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель исследования, приведено краткое содержание работы.

В первой главе, имеющей обзорный характер, выполнен анализ исследований усталостных характеристик материалов в условиях асимметричного эксплуатационного процесса нагружения. Отдельно проведены обзоры по методам оценки повреждения конструкций в результате действия случайного процесса нагружения, а также по учету асимметрии при гармоническом и случайном процессах нагружения.

Обзор методов оценки повреждений при случайном нагружении показал, что в настоящее время авторы все чаще для оценки повреждения конструкций используют непосредственно случайный процесс, исключая ошибку схематизации этих процессов. Одной из тенденций исследований является представление широкополосного гауссовского процесса как скорректированного неким коэффициентом узкополосного процесса. Авторы Гусев А.С., Шефер Л.А., Wirsching P.H., Light, Lutes L.D., Benasciutti D., Larsen C.E. и др. внесли большой вклад в изучение этого вопроса, однако все исследования по определению корректирующего коэффициента носят эмпирический характер. Отдельной тенденцией можно вы-

делить оценку повреждения на основе функций плотности вероятностного распределения максимумов. Авторы Zhao W., Baker M.J., Park J.B., Dirlik T. смешивают распределения Релея, Райса, Вейбулла и другие, а также выводят свои функции распределения, на основе экспериментальных данных. Существует так же ряд методов таких авторов, как Petrucci G., Zuccarello B., основанных на использовании спектральных моментов, как основных характеристик усталостного повреждения от действия случайного процесса. Стоит отметить и попытку авторов Gao Z., Moan T. и Mrsnik M. представить функцию спектральной плотности напряжений как множество случайных узкополосных процессов. Все методики применимы и нет единых рекомендаций по использованию того или иного метода. Однако наибольшее распространение получил метод Dirlik, не смотря на громоздкие выкладки.

Обзор исследований, посвященных методам учета асимметрии в процессах нагружения реальных конструкций, показал, что вопрос учета асимметрии остается актуальным, постоянно ведутся разработки новых методов. В настоящее время существуют различные эмпирические зависимости для пересчета асимметричных процессов в эквивалентные им по повреждению центрированные. Основной вклад в исследование этого вопроса внесли такие авторы, как Goodman J., Gerber W., Soderberg C.R., Smith J., Кинасошвили Р.С., Одинг И.А., Петерсон, Биргер И.А., Хэйвуд Р.В., Степнов М.Н. и др. Как правило, такие зависимости получены на основе экспериментальных исследований и не имеют теоретической базы, что ограничивает их применение на отдельных видах материалов. Универсальные формулы пересчета для разных материалов существуют давно, но их погрешность велика. В первую очередь это связано с особенностями материалов и учета факторов, влияющих на получение результатов. Авторы Голуб В.П., Крижановский В.И., Касперская В.В., Погребняк А.Д., Кочеткова Е.С., Пелых В.П., Желдубовский А.В. и др. предпринимали попытки создания обобщающих формул, но чаще всего они учитывают только особенности материала и не берут во внимание другие факторы, например, влияния числа циклов. Если рассматривать гармоническое нагружения, то проведено достаточно много исследований и даны рекомендации по учету асимметрии. Что касается случайного процесса нагружения, а он чаще всего является эксплуатационным процессом, то большинство методик, разработанных для детерминированных процессов, невозможно использовать из-за статистической природы случайного процесса. Авторы работ Gasiak G., Pawliczek R., Nieslony A., Bohm M. Lagoda T., Macha E. и др. разработали методики оценки долговечности конструкций при действии случайного нагружения, но все они основаны на использовании диаграммы усталости, полученной при гармоническом нагружении. Таким образом, ранее проведенные исследования внесли определенный вклад в более глубокое понимание проблемы. Однако отсутствуют методики, позволяющие экспериментально полученные диаграммы усталости при эксплуатационном процессе нагружения непосредственно применять для оценки повреждения конструкций.

Проведен обзор по литературным источникам, располагающим экспериментальными результатами исследований характеристик усталости материалов при

асимметричном нагружении при случайном и гармоническом нагружениях. Однако большинство из них невозможно применить в настоящем исследовании в виду следующих факторов: высокочастотное гармоническое нагружение, отсутствие статистической базы испытаний, не соответствует схема нагружения.

Глава завершается формулировкой цели и задач исследования, которые приведены во введении автореферата.

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований долговечности конструкционных материалов. Для этого собрана установка для испытаний образцов материалов на выносливость. Схема комплектации оборудования представлена на рисунке 1. Спроектирована и изготовлена оснастка, реализующая поперечный изгиб консольно закрепленных плоских образцов материалов. Схема нагружения образцов показана на рисунке 2. Главной особенностью разработанной оснастки является возможность одновременного испытания до шести образцов материалов.

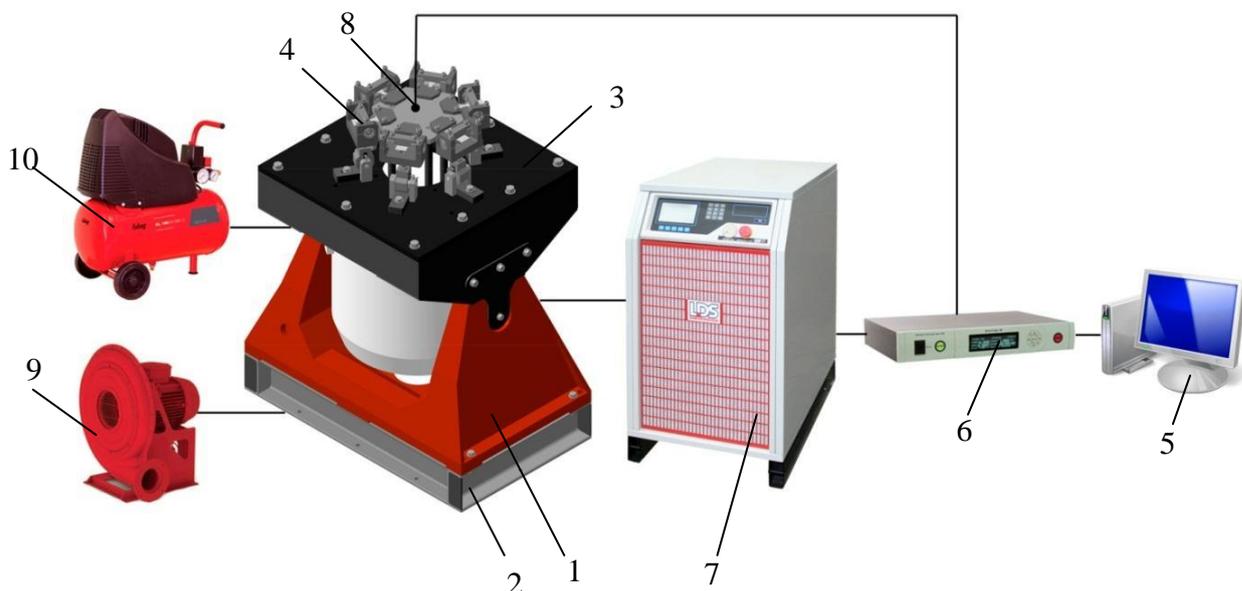


Рисунок 1. Схема стенда для испытаний материалов на усталостную долговечность: 1 – электродинамический вибростенд *LDS V780*; 2 – платформа; 3 – универсальная переходная рама; 4 – оснастка для испытаний; 5 – персональный компьютер; 6 – система управления *Bruel&Kjaer*; 7 – усилитель; 8 – пьезоэлектрический *ICP* акселерометр; 9 – система охлаждения; 10 – компрессор.

Представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния плоского образца для усталостных испытаний. Получена зависимость для пересчета перемещений края консольно закрепленного образца в максимальные напряжения опасного сечения образца.

Определены и обоснованы теоретические аспекты обобщенного представления эксплуатационного режима нагружения. Амплитудное значение характеризуется средним квадратическим отклонением (СКО) напряжений S динамической составляющей нагружения в зависимости от вида процесса нагружения. В качестве ха-

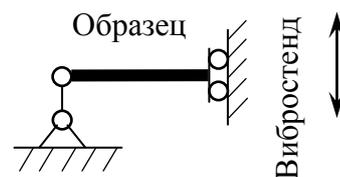


Рисунок 2. Схема нагружения образцов

характеристики асимметрии нагружения предложено использовать безразмерную величину – степень асимметрии μ , которая находится как отношение математического ожидания напряжений σ_m к пределу прочности материала $\sigma_{m\kappa}$. Для случайного процесса дополнительным параметром, характеризующим широкополосность процесса, является коэффициент нерегулярности i , который определяется выражением:

$$i = \frac{n_0}{n_{\max}} = \frac{\int_0^{\infty} S_{\sigma}(\omega) \omega^2 d\omega}{\sqrt{\int_0^{\infty} S_{\sigma}(\omega) \omega^4 d\omega \int_0^{\infty} S_{\sigma}(\omega) d\omega}}, \quad (1)$$

здесь n_0 – среднее число пересечений уровня математического ожидания с заданным знаком производной в единицу времени; n_{\max} – среднее число максимумов в единицу времени; $S_{\sigma}(\omega)$ – спектральная плотность напряжений; ω – текущее значение частоты (Гц).

Таким образом, в диссертационной работе эксплуатационные процессы нагружения (гармонический и случайный) характеризуются совокупностью следующих параметров: степень асимметрии μ , СКО напряжений S и коэффициент нерегулярности i в случае случайного процесса. Под долговечностью N случайного процесса понимается число пересечений процессом уровня математического ожидания с заданным знаком производной. Для гармонического нагружения значение N равно числу циклов.

Разработаны новые методические рекомендации по проведения усталостных испытаний на вибростенде для случая гармонического нагружения и гауссового случайного нагружения различной широкополосности. Задание асимметрии нагружения осуществляется системой воздушной компенсации вибростенда.

Приведены результаты экспериментальных исследований усталостных характеристик сплава АМг-61 при гармоническом и случайном (коэффициент нерегулярности $i = 0,82$) видах нагружения с разной степенью асимметрии. Получены зависимости кривых усталости для разных значений степени асимметрии для исследуемого сплава АМг-61 и сплава МА-15, результаты испытаний которого взяты из литературных источников. Построены усталостные диаграммы рассматриваемых материалов с вероятностями разрушения $P = 0,001; 0,5; 0,999$. Для примера на рисунке 3 изображены диаграммы усталости сплава АМг-61 при случайном процессе нагружения со степенью асимметрии $\mu = 0,22$ и вероятностями разрушения $P = 0,001; 0,5; 0,999$.

В третьей главе предложена новая корректирующая модель СКО напряжений, позволяющая прогнозировать кривые усталости материалов с разными значениями степени асимметрии на основе ограниченного эксперимента при действии эксплуатационного процесса нагружения.

Выполнен сравнительный анализ методов коррекции асимметрии нагружения при разных видах нагружения на основе таких обзорных моделей, как Gudman, Gerber, Smith, Soderberg, Петерсона и Биргера. Для сравнения использовались полученные в диссертационной работе экспериментальные данные. Выявлено, что при гармоническом нагружении наибольшую сходимость расчетных данных с экспериментом показывает модель Gudman, при этом коэффициент корреляции равен $r = 0,978$. Более подробное рассмотрение этой модели для разных долговечностей показывает расхождение с уменьшением долговечности.

При случайном нагружении удовлетворительную сходимость показали модели Gudman и Петерсона для разных значений долговечностей. Отдельно рассмотрена модель Степнова. В общем случае, при средних значениях долговечностей (10^5 - 10^6 циклов) в независимости от типа нагружения корректирующая модель Степнова хорошо коррелируется с экспериментальными данными ($r = 0,919$), однако она требует знать коэффициент для конкретного материала. Остальные корректирующие модели, выявленные в обзоре, не рассматривались в силу ограничений: конкретный материал, тип нагружения или основаны на моделях, рассмотренных ранее.

В диссертационной работе предлагается корректирующая модель, которая строится на основе линейной регрессии двух точек – при симметричных испытаниях и при асимметричных с некоторым значением степени асимметрии μ_j . В общем виде корректирующая модель представляется зависимостью:

$$S_{\mu_i, N}(\mu_i) = S_{0, N} - \frac{\mu_i (S_{0, N} - S_{\mu_j, N})}{\mu_j}, \quad (2)$$

где $S_{\mu_i, N}$ – СКО напряжений при асимметричном цикле нагружения со степенью асимметрии μ_i для долговечности N ; $S_{\mu_j, N}$ – СКО напряжений при асимметричном цикле нагружения со степенью асимметрии μ_j для долговечности N ; $S_{0, N}$ – СКО напряжений при симметричном цикле нагружения для долговечности N ; μ_i – степень асимметрии для i -го испытания; μ_j – степень асимметрии для j -го испытания.

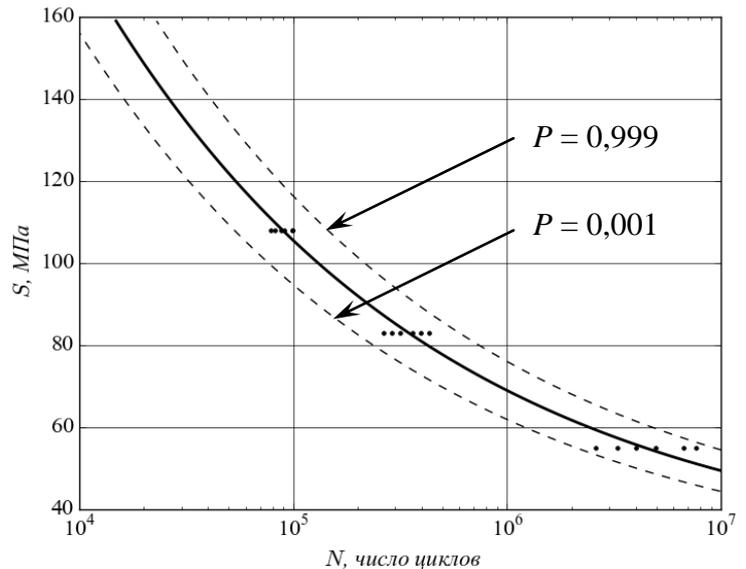


Рисунок 3. Диаграмма усталости сплава АМг-61 при случайном процессе нагружения со степенью асимметрии $\mu = 0,22$

Такая линейная модель строится для любой долговечности в диапазоне многоциклового усталости ($N = 10^4 - 10^7$ циклов). Все линии, каждая из которых соответствует определенному значению долговечности, сходятся в одной точке (см. рисунок 4). Для корректирующей модели Goodman такая точка лежит на оси абсцисс и соответствует значению предела прочности материала. Для предлагаемой корректирующей модели координаты точки схождения всех прямых долговечностей тяжело предугадать и чаще всего точка лежит далеко за пределом прочности материала, что теряет всякий физический смысл. В таком случае точку схождения рассматривают с точки зрения математического анализа и используют для проверки корректности построенных прямых долговечностей.

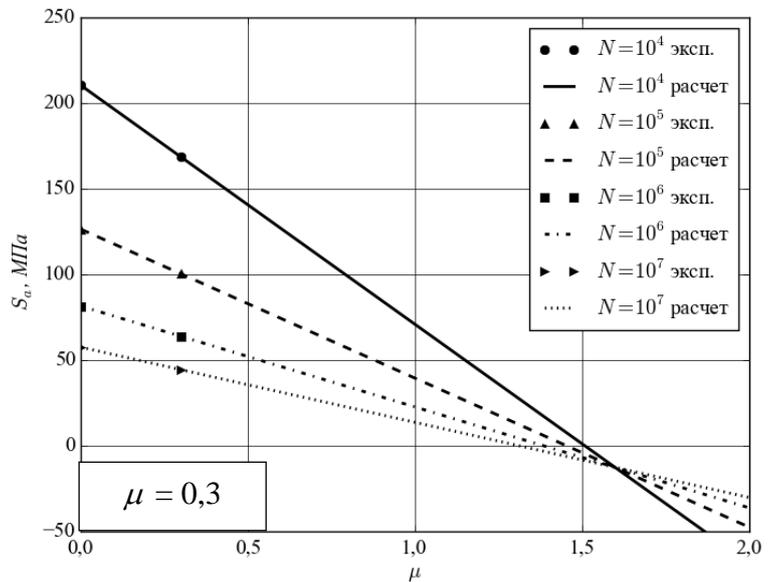


Рисунок 4. Корректирующая модель СКО напряжений для сплава АМг-61 при случайном нагружении

Таким образом, достаточно знать результаты усталостных испытаний для конкретного эксплуатационного процесса нагружения при симметричном нагружении и для некоторого асимметричного нагружения, чтобы предсказывать по диаграмме СКО напряжений уровень напряжения для любого значения асимметрии.

Для примера на рисунке 4 изображена корректирующая модель СКО напряжений для сплава АМг-61 при случайном нагружении. Модель строилась на основании результатов симметричных испытаний и испытаний со степенью асимметрии $\mu = 0,3$.

Предлагаемая корректирующая модель помимо проведения симметричных испытаний подразумевает дополнительные испытания с неким значением степени асимметрии. Проведены исследования и даны рекомендации по выбору значения степени асимметрии для дополнительных испытаний. Для этого рассмотрены четыре корректирующие модели, построенные на основе экспериментальных данных сплава АМг-61 при случайном нагружении. В первой модели в качестве дополнительных испытаний взяты испытания со степенью асимметрии $\mu = 0,12$, во второй – $\mu = 0,22$, в третьей – $\mu = 0,3$, а четвертая, как базовая, построена методами регрессионного анализа по всем значениям степени асимметрии.

Рассмотрены реальные диапазоны изменения степени асимметрии $\mu = 0 - 0,7$. Верхний предел $\mu = 0,7$ выбран как максимально задаваемый уровень напряжений для усталостных испытаний ($\sigma_{\max} = 0,7\sigma_{нч}$), что примерно соответствует пределу текучести материала. Разбивая все прямые корректирующих моделей на равные небольшие отрезки на всем диапазоне изменения μ найдены отклонения

каждой корректирующей модели от базовой в процентном соотношении. На рисунке 5 показаны максимальные отклонения корректирующих моделей относительно базовой в процентном соотношении для каждого значения долговечности в диапазоне от 10^4 до 10^7 циклов.

Аналогичные исследования проведены для гармонического нагружения сплава АМг-61 и сплава МА-15. Установлено, что в не зависимости от вида процесса нагружения для сплавов АМг-61 и МА-15 рекомендуется выбирать значение степени асимметрии в диапазоне $\mu = 0,31-0,33$.

Разработана модель учета рассеивания усталостных характеристик материала. Предполагается, что для ограниченных баз испытаний закон распределения долговечностей можно считать логарифмически нормальным. Тогда коэффициент вариации СКО напряжений v_s для эксплуатационного процесса запишется

$$v_s = \frac{S_s}{\bar{S}}, \quad (3)$$

где \bar{S} – СКО напряжений кривой усталости, построенной для вероятности $P = 0,5$; S_s – среднее квадратическое отклонение уровня напряжения.

Рассматривая взаимосвязь между СКО логарифмов долговечностей S_{lgN} и коэффициентом вариации СКО напряжений v_s и полагая, что для образцов из конкретного материала при заданном процессе нагружения коэффициент вариации v_s есть величина постоянная во всем диапазоне долговечностей, в работе предлагается использовать эмпирическую зависимость:

$$v_{si} = \frac{2,3 S_{lgN_i} (S_i - S_0)}{B S_i}, \quad (4)$$

здесь B – коэффициент уравнения кривой усталости; S_i – уровень СКО напряжения; S_0 – СКО предела неограниченной выносливости материала.

СКО напряжений S с заданной вероятностью разрушения находится как

$$S = \bar{S} \pm t_q S_s \quad (5)$$

или, с учетом формулы (3):

$$S = \bar{S} \pm t_q v_s \bar{S}, \quad (6)$$

где t_q – квантиль нормального распределения для заданной вероятности неразрушения q .

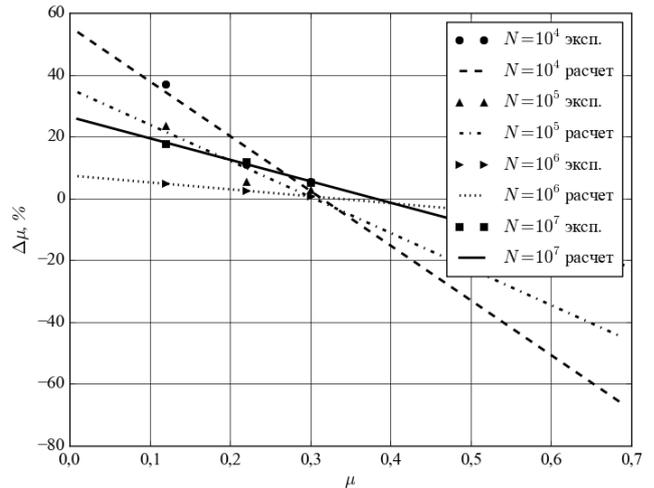


Рисунок 5. Максимальные отклонения корректирующих моделей относительно базовой для выбранных долговечностей при случайном процессе нагружении сплава АМг-61

Для наглядности построена корректирующая модель СКО напряжений для сплава АМг-61 при случайном нагружении. Выбраны две прямые соответствующие долговечностям $N = 10^5$ и $N = 10^7$, на рисунке 7 они показаны сплошными линиями. Для каждой экспериментально полученной точки по формуле (6) найдены точки с вероятностью разрушения $P = 0,001$ и $0,999$. Через полученные точки проведены линии регрессии, при этом наименьший коэффициент корреляции составил $r = 0,995$. На рисунке 7 эти прямые обозначены пунктирной линией. Они позволяют судить о рассеивании характеристик усталостной кривой для заданной вероятности разрушения.

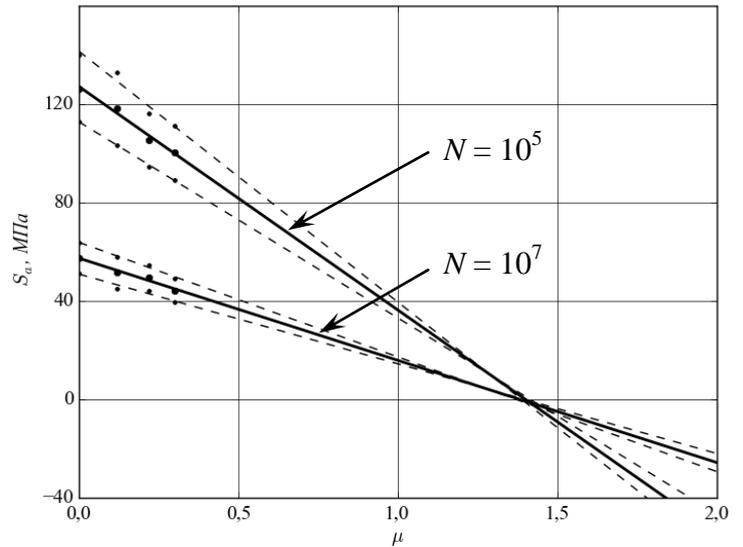


Рисунок 6. Корректирующая модель СКО напряжений для сплава АМг-61 при случайном нагружении и характеристики рассеивания

Четвертая глава посвящена разработке методики расчета ресурса и запасов циклической прочности конструкций, учитывающей асимметрию нагружения по предлагаемой в работе корректирующей модели СКО напряжений при действии эксплуатационного режима нагружения.

Проведена оценка погрешности использования схематизации случайного процесса на основе метода «падающего дождя». Выявлено трехкратное различие эксперимента с расчетом, что доказывает необходимость проведения вибрационных испытаний при непосредственном случайном воздействии.

В диссертационной работе рассматривается полулогарифмическое уравнение кривой усталости:

$$\langle \lg N_i \rangle = A - B \lg(S_i - S_0), \quad (7)$$

где $\langle \lg N_i \rangle$ – математическое ожидание долговечностей для выбранного уровня напряжений; S_i – уровень СКО напряжения; S_0 – СКО предела неограниченной выносливости материала; A , B – коэффициенты уравнения усталости, находятся экспериментально.

Рассмотрим объект, на который поочередно воздействует j процессов нагружения с различной структурой i . Каждый из исходных процессов может иметь различные значения степени асимметрии. Количество значений степени асимметрий для процесса конкретной структуры обозначим через K_i ($1 \leq j \leq K_i$). Для каждого сочетания структуры процесса и математического ожидания проводится нагружение на δ_i уровнях СКО напряжений $S_{i\beta}$ ($1 \leq \beta \leq \delta_i$).

В силу своей универсальности в диссертационной работе используется линейная гипотеза суммирования повреждений от процессов нагружения:

$$P = \sum_{i=1}^j \sum_{j=1}^{K_i} \sum_{\beta=1}^{\delta_i} \frac{n_{0i}(\mu_{ij}, S_{i\beta})}{N_{0i}(\mu_{ij}, S_{i\beta})} = 1, \quad (8)$$

где $n_{0i}(\mu_{ij}, S_{i\beta})$ – число циклов нагружения для i -ой структуры процесса с конкретными значениями СКО напряжений и степени асимметрии;
 $N_{0i}(\mu_{ij}, S_{i\beta})$ – долговечность при тех же исходных параметрах процесса нагружения.

Учитывая уравнение кривой усталости (7) и предположение о переходе к предельному состоянию путем увеличением всех СКО напряжений $S_{i\beta}$ в η раз, зависимость (8) примет вид

$$\sum_{i=1}^j \sum_{j=1}^{K_i} \sum_{\beta=1}^{\delta_i} \frac{n_{0i}(\mu_{ij}, S_{i\beta})}{10^A (S_{i\beta} \eta - S_0)^{-B}} = 1, \quad (9)$$

где η – запас усталостной прочности.

Здесь суммирование производится при условии, что $S_{i\beta} \eta > S_0$.

Выражение (9) не имеет аналитического решения, и коэффициент запаса циклической прочности η может быть определен лишь методом приближений.

При заданной ограниченной долговечности $N_{0\delta}$ в работе предлагается коэффициент запаса циклической прочности η_δ находить как:

$$\eta_\delta = \frac{S_0 + 10^{\frac{A}{B}} \cdot N_{0\delta}^{-\frac{1}{B}}}{S_0} \eta. \quad (10)$$

Полученные выражения при нагружении процессами с переменными статистическими характеристика позволяют провести расчеты для вероятности разрушения $P = 0,5$.

Для определения долговечности с заданной вероятностью рассматривается объект исследования, на который воздействует M различных режимов нагружения. Математическое ожидание и СКО логарифмов долговечностей при конкретном повреждении объекта для каждого их режимов нагружения обозначены соответственно $\langle \lg N_{0,j} \rangle$ и $S_{\lg N_j}$ ($1 \leq j \leq M$).

В диссертационной работе предлагается для расчета ресурса использовать следующее условие прочности с учетом рассеивания по долговечности $S_{\lg N}$:

$$\sum_{i=1}^j \sum_{j=1}^{K_i} \sum_{\beta=1}^{\delta_i} \frac{n_{0i}(\mu_{ij}, S_{i\beta}) (S_{i\beta} \eta_t - S_0)^B}{10^A \exp(2,3 t_{q,k} \cdot S_{\lg N_j})} = 1. \quad (11)$$

С учетом рассеивания по нагруженности:

$$\sum_{i=1}^j \sum_{j=1}^{K_i} \sum_{\beta=1}^{\delta_i} \frac{n_{0i}(\mu_{ij}, S_{i\beta})}{10^A \left(\frac{S_{i\beta}}{1 \pm t_{q,k} v_s} \eta_t - S_0 \right)^{-B}} = 1, \quad (12)$$

где η_t – коэффициент запаса циклической прочности с заданной вероятностью разрушения.

Суммирование в выражении (11) производится только при условии, что

$$S_{i\beta} \eta_t > S_0, \text{ а в выражении (12) при условии } \frac{S_{i\beta}}{1 \pm t_{q,k} v_s} \eta_t > S_0.$$

Зависимости (11) и (12) позволяют решать две задачи:

1. При известном или заданном законе изменения нагрузки во времени и заданной вероятности разрушения определить коэффициент запаса циклической прочности.

2. При известном или заданном законе изменения нагрузки во времени и заданном коэффициенте запаса циклической прочности определить вероятность разрушения.

По предложенной методике проведен расчет долговечности конструкции на примере образца сплава АМг-61. Блок нагружения состоял из случайных процессов с чередующимися по заданной программе СКО напряжений (S) и значениями степени асимметрии μ . Длительность действия каждого процесса выбиралась исходя из принципа равного их вклада в повреждение образца. Натурный эксперимент проходил для шести образцов. Рассчитанные по результатам эксперимента значение относительного повреждения колеблются от 0,9480 до 1,1015, среднее значение – 1,0032.

Очевидно, данный подход достаточно точный, так как суммируются повреждения от действия совокупности процессов и особенности накопления повреждений от каждого из них учитываются соответствующей кривой усталости от процессов того же качества.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложена методика по проведению усталостных испытаний плоских образцов материалов с галтелями при консольном изгибе на электродинамическом вибростенде при стационарном гауссовом случайном процессе нагружения различной широкополосности и гармоническом нагружении с автоматическим поддержанием параметров испытаний. Методика учитывает задание асимметрии нагружения, реализованное статическим смещением подвижного стола вибростенда.

2. Проведены расчетно-экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния плоского образца для усталостных испытаний. Выведена зависимость для пересчета перемещений края консольно закрепленного образца в максимальные напряжения опасного сечения образца. При этом относительная ошибка расчета и эксперимента не превышает 3%.

Для обобщенного представления эксплуатационного нагружения (гармонический и случайный) предложены следующие характеризующие параметры: степень асимметрии μ , среднее квадратическое отклонение напряжений S и коэффициент нерегулярности i в случае случайного процесса.

Проведена серия экспериментальных исследований усталостных характеристик сплава АМг-61 при стационарном гауссовом случайном и гармоническом видах нагружения с значениями степени асимметрии $\mu = 0; 0,12; 0,22$ и $0,3$. Испытывалось от 20 до 80 образцов на каждую кривую усталости, всего 206 образцов. Построены усталостные диаграммы исследуемого сплава АМг-61 и материала МА-15, экспериментальные данные которого взяты из литературных источников, а также кривые усталости для вероятностей разрушения $P = 0,001$ и $P = 0,999$.

3. Разработана корректирующая модель СКО напряжений, позволяющая на основе ограниченного эксперимента, прогнозировать кривые усталости материалов с разными значениями степени асимметрии как при гармоническом, так и при случайном процессах нагружения. Корректирующая модель может быть построена для разных значений долговечности в диапазоне многоциклового усталости. Для построения модели необходимы дополнительные испытания с некоторым значением степени асимметрии. В работе даны рекомендации и установлено, что в независимости от вида процесса нагружения для сплавов АМг-61 и МА-15 рекомендуется выбирать значение степени асимметрии в диапазоне от $0,31$ до $0,33$. В качестве перспективы дальнейшей разработки темы является расширение применимости модели и выдача рекомендаций по выбору значения степени асимметрии для разных типов материалов.

4. Разработана модель учета рассеивания усталостных характеристик, которая позволяет строить кривую усталости заданной асимметрии с учетом вероятности разрушения. Модель базируется на коэффициенте вариации амплитуд напряжений с условием, что амплитуды напряжений подчиняются нормальному закону распределения.

5. Разработана методика расчета ресурса и запасов циклической прочности элементов конструкций на основе линейной гипотезы суммирования повреждений. Методика учитывает предлагаемую в работе корректирующую модель СКО напряжений, а так же позволяет рассчитывать характеристики рассеивания по условию долговечности или по условию нагруженности элементов конструкции. Методика применима для расчета ресурса конструкций при действии стационарного гауссового случайного процесса нагружения или гармонического нагружения.

Выполнен расчет долговечности конструкции на примере образца сплава АМг-61. Программа нагружения состояла из четырех блоков, с разными уровнями СКО напряжений и значениями степени асимметрии. Расчет подтвержден экспериментальными исследованиями, в ходе которых установлена хорошая сходимость с линейной гипотезой суммирования повреждений, что подтверждает работоспособность предлагаемой методики расчета ресурса конструкций. Среднее значение относительного повреждения для всех образцов в эксперименте составило $\Pi = 1,0032$.

Основные публикации по теме диссертации

В рецензируемых журналах из списка ВАК:

1. Шефер, Л.А. Обобщенная диаграмма усталости материалов при действии различных случайных, гармонических и полигармонических процессов / Л.А. Шефер, А.В. Ерпалов, Д.Х. Валеев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – Т. 81, № 1-1. – С. 58-62.

2. Ерпалов, А.В. Усталостные испытания материалов и конструкций с использованием современного оборудования / А.В. Ерпалов, Л.А. Шефер, Е.Е. Рихтер, П.А. Тараненко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2015. – Т. 15, №2. – С. 70-80.

3. Erpalov, A.V. Prediction of stress-life curve of a material under random or cyclic loading with asymmetry / A.V. Erpalov, L.A. Shefer // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – P. 458-464 (Scopus).

4. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2016612215. Прогнозирование диаграммы усталости материалов при асимметричных эксплуатационных режимах нагружения / А.В. Ерпалов, Л.А. Шефер; заявитель и правообладатель: Южно-Уральский государственный университет. – заявка № 2015662625; заявл. 21.12.15 ; зарегистр. 19.02.16.

5. Erpalov, A.V. Fatigue-based Classification of Loading Processes / A.V. Erpalov, L.A. Shefer // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 144-149 (Scopus, WoS).

В других изданиях:

6. Ерпалов, А.В. Выбор рациональных параметров образцов для усталостных испытаний при консольном изгибе / А.В. Ерпалов, П.Н. Усков, С.В. Махнович // Наука ЮУрГУ. Материалы 65 научной конференции. Секции технических наук: в 2т. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2013. – Т.1. – С. 202-205.

7. Ерпалов, А.В. Методика аппроксимации усталостной диаграммы при случайном нагружении образцов / А.В. Ерпалов, Л.А. Шефер // Молодежь. Техника. Космос: труды VI Общероссийской молодежной научно-технической конференции / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2014. – С. 108-110.

8. Ерпалов, А.В. Выбор рациональных параметров образцов с концентраторами напряжений для усталостных испытаний при консольном изгибе / А.В. Ерпалов, Л.А. Шефер, С.В. Махнович, П.Н. Усков // Наука ЮУрГУ. Материалы 66-й науч. конференции – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2014. – С. 112-117.

9. Ерпалов, А.В. Методика усталостных испытаний конструктивно подобных образцов на современном оборудовании / А.В. Ерпалов, Л.А. Шефер, Е.Е. Рихтер, П.А. Тараненко // Материалы 7 научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2015. – С. 166-172.

10. Ерпалов, А.В. Усталостные испытания и методика определения усталостных характеристик материалов при случайном процессе нагружения / А.В. Ерпалов // Материалы 8 научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2016. – С. 87-92.

Диссертант

А.В. Ерпалов

ЕРПАЛОВ Алексей Викторович

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ
УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ И РАСЧЕТ РЕСУРСА КОНСТРУКЦИЙ ПРИ
АСИММЕТРИЧНОМ СЛУЧАЙНОМ НАГРУЖЕНИИ

Специальность:

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и
аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 00.00.20___. Формат 60×84 1/16
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. _____. Уч.-изд. л. _____.
Тираж __ экз. Заказ № _____.