

Отзыв на автореферат диссертации К. В. Захарченко
**«Метод исследования закономерностей периодического деформирования
и связанных с ними диссипативных процессов при усталости авиационных
материалов»**, представленной на соискание учёной степени кандидата
технических наук по специальности 01.02.06 – Динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры

Любой материал представляет собой структурно неоднородную среду, характеризующуюся при переменных напряжениях своим неупругим поведением. Неупругость, связанная с усталостным разрушением, у каждого материала появляется при определённых амплитудах нагружения как результат возникновения локальных пластических деформаций, сопровождающих это разрушение. Естественно, что по неупругим характеристикам материала можно отслеживать его структурное состояние, изменение этого состояния в связи с накоплением повреждений и давать оценку его долговечности, поскольку процессы деформирования и разрушения тесно взаимосвязаны. Особенно важно проанализировать поведение составных материалов – материалов с покрытиями, с различными видами обработки поверхности, композиционных материалов, имеющих свою специфику в деформационных процессах и разрушении.

В представленной работе использованы по существу два метода анализа поведения материалов. Один основан на изучении взаимосвязи между экстремальными значениями компонент тензора деформаций, другой – на измерениях амплитудной зависимости демпфирования. Оба метода выявляют результат процесса циклического нагружения, отражающий различные стороны деформационных свойств материалов, которые отличаются по своей структуре.

Новым и весьма важным здесь следует признать одновременное измерение компонент тензора деформаций в процессе циклического нагружения, которое показало характерные особенности деформационных процессов материалов с различными покрытиями и обработкой поверхности. Эти измерения сопровождались анализом образующегося микрорельефа, показывая его связь с параметрами силового воздействия. Такой метод диагностики позволяет сделать выбор того или иного технологического процесса обработки материала до того, как будут проведены его всесторонние исследования.

Связь между процессами диссипации энергии и долговечностью при переменных нагрузках изучается многими исследователями достаточно давно и отражена в большом ряде статей и книг. В данной работе применён тепловизионный метод регистрации рассеиваемой в материале энергии по её тепловой составляющей. Это один из возможных способов измерения внутреннего трения в материалах, имеющий свои преимущества и недостатки. Основное преимущество применённого метода измерений заключается в том, что он является бесконтактным и безынерционным. Тепловизионный контроль широко используется в технической диагностике, энергоаудите, в различных

областях строительства, энергетики, промышленности. Но в данном случае он ограничен самими условиями теплового эффекта циклического деформирования, поэтому его использование было только в части проведённых исследований.

Выполнен большой цикл исследований деформационных свойств различных материалов, по которым выявлены характерные особенности в поведении каждого из них. Продемонстрирована информативность применённой методики исследования на примере измерения компонент тензора деформаций в образцах при вариациях толщины модифицированной поверхности.

Измерения амплитудной зависимости неупругого деформирования при различной асимметрии цикла нагружения дали в результате удобный для практики метод оценки допустимых или характерных условий нагружения для каждого из исследованных материалов. В работе получено, что очередной прирост демпфирования при повышении амплитуды нагружения в дуралюмине связан с разрывом кривых усталости. Это подтверждает наше предположение о появлении при этих нагрузках локальных пластических деформаций в других объёмах материала¹. Разброс индивидуальных свойств образцов в этом случае и должен приводить к бимодальному распределению логарифма долговечности. А кривая усталости, следовательно, должна представлять собой огибающую значений долговечности для различных мест разрушения в структуре материала.

Тепловой метод в этом случае хорош тем, что температура разогрева связана со скоростью разрушения, так как усталость – это временной процесс, и она непосредственно указывает на время разрушения (на долговечность). А число циклов (выносливость) определяется только тем, сколько их успеет произойти за время разрушения. Но количественная связь температуры разогрева с долговечностью возможна только после решения задачи теплоотвода в окружающую среду в соответствии с распределением мощности внутренних источников тепла по объёму материала.

Замечания по представленной работе, изложенной в автореферате, следующие.

1. Если в разделе 2.5 рассматривается *новый метод, включающий в себя ...* целый ряд процедур, то почему-то данные измерения компонент тензора полных деформаций не сопровождаются сведениями о неупругом деформировании образцов во времени. Это бы дало дополнительную информацию, например, о сдвиге фаз между напряжениями и деформациями, о параметрах петли неупругости. Связь продольных и поперечных деформаций во времени более информативна, чем их экстремальные значения. Особенно это важно при исследовании композитов². Нет данных об амплитудной зависимости микрорельефа и его изменениях во времени в процессе циклической наработки.

2. В работе определялись три компоненты тензора истинных деформаций, но представлены данные только по двум. Можно было бы судить об изменениях объёма при нагружении, сопоставляя истинную продольную деформацию с суммой истинных поперечных. Одновременно стали бы видны и погрешности измерений. А изменение объёма при термообработке стали 40Х (стр. 15) связано, видимо, не с «разрыхлением». Объём определяется структурой материала, как и, например, коэффициент Пуассона.
3. Не изложена методика количественного определения «критических» (или «предельных») напряжений. Условная прямая на рисунке 9 – *Начало диссипативного разогрева* – проведена без какой-либо обработки амплитудной зависимости приращения температуры. Демпфирующие характеристики определяются средней температурой образца, поэтому термоупругий эффект должен быть исключён из обработки амплитудной зависимости разогрева. Кроме того, диссипативный разогрев начинается от амплитуды равной нулю. В любом материале существует релаксационный фон внутреннего трения. Чувствительность тепловизора может оказаться недостаточной, чтобы это заметить. Известно, что термоэлектрический метод измерения, имеющий на порядок большую чувствительность, позволяет надёжно разделить различные типы рассеяния энергии, связанные с различными механизмами демпфирования³. Поэтому по представленным данным измерений оценка «критических» напряжений получается приближённой.
4. Не изложены требования по выбору размеров испытуемых образцов и особенностей применяемого метода измерений. От этого зависит чувствительность метода и погрешности измерений. Измеряемое значение прироста температуры в образце определяется величиной рассеиваемой в цикле нагружения материала энергией, зависящей от частоты, условиями теплоотвода, квадратом длины рабочей части образца и частотой нагружения. Увеличивая длину рабочей части образца, мы получаем большую температуру разогрева, но постоянная времени, также зависящая от квадрата длины рабочей части образца, увеличивается, и требуется значительное время для выхода на режим установившегося теплообмена.

По рисунку 8 видно, что нагружение происходило ступенями через 100 с. То есть в эксперименте не определялось значение установившейся температуры, а измерялась её значение на каком-то этапе разогрева. Кривая разогрева – это приблизительно экспонента $\Delta T \approx \Delta T_{st} [1 - \exp(-t/\tau)]$, с постоянной времени τ , определяющейся выражением⁴:

$$\tau = \frac{c\rho}{\lambda\pi^2/L^2 + \alpha P/S}.$$

Здесь c — удельная теплоёмкость, ρ — плотность материала образца, α — эффективный коэффициент теплообмена, P и S — периметр и площадь поперечного сечения образца.

Если взять теплофизические свойства какой-либо близкой по составу стали, например, стали 35⁵, то пренебрегая конвективным теплообменом (второе слагаемое в знаменателе формулы) для длины рабочей части образца 80 мм получим $\tau \approx 60$ с. Следовательно, необходимо 3–4 минуты для выхода на установившийся режим теплообмена. Но фактическая длина образца получается больше, так как есть переходное тепловое сопротивление между рабочей частью образца и захватами испытательной машины. А захваты имеют ограниченную теплоёмкость и в процессе измерений нагреваются. Формула этого не учитывает.

Опыт измерения температурного поля на рабочей части образца показывает, что при её длине 70 мм выход на стационарный режим теплообмена происходит за 16–20 минут⁶. В эксперименте автора, таким образом, фактически измерялась усреднённая скорость разогрева на выбранном интервале времени ступени нагружения. Так можно делать, но тогда каждая ступень нагружения должна выполняться после охлаждения образца до температуры окружающей среды. В представленной же работе каждая последующая ступень нагружения начиналась с некоторой неопределённой температуры после частичного остывания образца (см. кривые разогрева на рис. 8 или 9).

Правильнее определять именно начальную скорость разогрева, если нужно быстро получить результат, или если материал имеет низкую теплопроводность. Для этого начальный участок кривой разогрева аппроксимируется экспонентой. Далее по производной от полученной аналитической зависимости вычисляется начальная скорость разогрева, когда $\Delta T = 0$, которая и будет пропорциональна установившейся разности температуры ΔT_{st} . Такой метод измерений был применён при исследовании неупругости ПММА, а по выделяемой тепловой энергии в цикле нагружения, пропорциональной площади петли, вычислялось раскрытие петли неупругости⁷.

5. Видимо, автора не интересовало правильное определение величины рассеиваемой в цикле энергии. Для корректного измерения величины демпфирования необходимо определять разность температуры между серединой и краями рабочей части образца. То есть там, где и происходит интересующее нас выделение тепла, и распределение температуры по длине рабочей части образца известно. Измерялась же разность температуры между образцом и окружающей средой. Измерение разности температуры на рабочей части образца при нагрузках меньших «предела усталости» даёт строгую её зависимость от квадрата амплитуды, а отклонения от неё с ростом амплитуды нагружения и будут свидетельствовать о появлении усталостного разрушения⁶.

6. В первом абзаце на стр. 18 автореферата речь идёт о материале Д16 Т, который почему-то в данной области *сопротивляется периодическому нагружению без существенного изменения упругих свойств*. А как эти свойства должны изменяться? Этот материал разрушается и при меньших, и при больших, чем «критические», амплитудах напряжений. То есть используемый метод показал только очередной прирост демпфирования, о чём ранее упоминалось. А динамический модуль упругости или фактическая жёсткость образца не измерялись.
7. Далее речь идёт о сравнении с пределами выносливости, но каких материалов не упоминается. Результаты сопоставления не приводятся, а расхождение с данными тепловых измерений вполне объясняется перечисленными ранее причинами. Для Д16 Т тепловые измерения, выполненные даже термоэлектрическим методом, его не определяют. Его можно определить только методом свободных затухающих колебаний, когда декремент колебаний становится постоянной величиной. Амплитуда появления разогрева, связанного с локальными пластическими деформациями, сопровождающими процесс усталостного разрушения, может быть только статистически связана с «пределом» усталости. Демпфирование измеряется в значительном объёме материала, а разрушается образец только в каком-либо месте этого объёма. Пример такой статистики дан в упомянутой уже работе⁶. При этом измерения и испытания на долговечность должны проводиться на одной частоте (в автореферате об этом не упоминается), так как неупругость и выносливость зависят от длительности периода цикла.
8. В общих выводах и результатах работы опять упоминается об определении «предельного» НДС *по возникновению диссипативного разогрева*. В действительности же определены условия нагружения по характерному изменению амплитудной зависимости разогрева. В одних случаях то связывается с пределами выносливости, в других – с более выраженным приростом неупругости.

Несмотря на высказанные замечания, следует отметить, что большой объём проведённых экспериментальных работ, вклад автора в разработку и проведение анализа получаемой информации, отличающейся большим разнообразием, являются ценным научным и практическим результатом данной работы.

Итак, представленная работа представляет собой цикл исследований, решающим в комплексе методическую, научную и научно-прикладную части сформулированных задач, имеющих существенное значение для промышленности, в том числе и для исследований, связанных с созданием новых материалов или методов технологической обработки материалов, применявшихся ранее. Достаточное количество публикаций (все в соавторстве) входят в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК. Диссертационная работа по своему содержанию, научной направленности,

объёму выполненной работы, достоверности результатов и актуальности решённых задач соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и п. 9 Положения о присуждении учёных степеней. Захарченко Кирилл Владимирович заслуживает присуждения ему степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры.

Петров Марк Григорьевич,
ведущий научный сотрудник
Федеральное государственное унитарное предприятие
«Сибирский научно-исследовательский институт авиации
имени С. А. Чаплыгина» (ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина»)
кандидат технических наук
специальность 05.07.03 – Прочность летательных аппаратов
630051, г. Новосибирск, ул. Ползунова, 21
Тел. (383) 278-71-31, e-mail: mark-st@ngs.ru

М. Г. Петров

Подпись М. Г. Петрова заверяю

Научный руководитель ФГУП «СибНИА им. С. А. Чаплыгина»
доктор технических наук, профессор

А. Н. Серьёзов



- ¹ Петров М. Г. Прочность и долговечность элементов конструкций: подход на основе моделей материала как физической среды. – Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2015.
- ² Петров М. Г. Методы оценки повреждённости материалов и конструкций // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы XI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных с международным участием. – Бийск: Изд-во АлГТУ, 2018. – С. 289-293.
- ³ Харри Р., Жубер Ф., Гомаа А. Определение истинного предела выносливости неразрушающим методом по испытаниям одного образца // Теоретические основы инженерных расчётов. – 1981. – № 1. – С. 72-77.
- ⁴ Ранцевич В. Б. Расчёт нестационарных температурных полей образцов при усталости и их связи с тепловой частью механического гистерезиса // Проблемы прочности. – 1978. – № 1. – С. 51-55.
- ⁵ Пехович А. И., Жидких В. М. Расчёты теплового режима твёрдых тел. – Л.: Энергия, 1976.
- ⁶ Гоцелюк Т. Б., Конаков О. А., Петров М. Г. Усталостное разрушение сварных соединений из стали 09Г2С / Доклады 2-ой Всероссийской конференции «Проблемы оптимального проектирования сооружений». – Новосибирск: НГАСУ, 2011. – С. 113-126.
- ⁷ Петров М. Г. Оценка структурного состояния композиционных материалов в процессе разрушения // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 4 (65). – С. 61-67.