

УДК 629.735

П.А. Фомичев*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»***МЕТОД РАСЧЕТА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ
АВИАКОНСТРУКЦИЙ ПО ЛОКАЛЬНОМУ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМУ СОСТОЯНИЮ**

Изложен метод расчета долговечности элементов конструкций по локальному напряженно-деформированному состоянию. Принят энергетический критерий усталостного разрушения. В качестве исходной информации о материале служат циклические деформационные и усталостные характеристики, получаемые по результатам испытаний гладких образцов. Показана возможность применения метода к расчету тел с контактной передачей нагрузки.

метод, циклическое нагружение, долговечность, гистерезис, рассеянная энергия, концентрация напряжений, элемент конструкции.

Разрушение элементов конструкций практически всегда начинается в зонах концентрации напряжений. В настоящее время известны два подхода к расчетам долговечности таких элементов – по номинальным напряжениям и по локальному напряженно-деформированному состоянию (НДС). Первый подход был разработан в 60-е годы, когда для определения НДС конструкций преимущественно применяли расчетную схему тонкостенного стержня, получаемые при этом напряжения и были номинальными. Расчет долговечности проводили с учетом эффективных коэффициентов концентрации напряжений, которые находили по результатам многочисленных предварительных испытаний конкретных зон конструктивной нерегулярности.

Развитие вычислительной техники привело к широкому внедрению в практику инженерных расчетов метода конечных элементов (МКЭ), реализованному в настоящее время в ряде специализированных программных продуктов типа NASTRAN, ANSYS, COSMOS и др. Применение МКЭ позволяет получить поля напряжений и деформаций. Расчет долговечности по локальному НДС основан на учете реальных напряжений и деформаций в зонах конструктивной нерегулярности. Этот подход более универ-

сален, но требует углубленного изучения процессов циклического деформирования материала в концентраторе напряжений при регулярном и нерегулярном нагружении.

Важным этапом в анализе усталостного разрушения материала является исследование процесса накопления повреждений на стадии зарождения трещины. В условиях эксплуатации на конструкцию действуют нагрузки с переменной амплитудой. Поэтому для расчета долговечности находят применение различные методики суммирования усталостных повреждений, основанные на феноменологическом подходе к процессу усталости. В этих методиках как критерий разрушения, так и закономерности накопления повреждений определяются гипотезами и допущениями, принимаемыми авторами. Вследствие неопределенности понятия "повреждение" затруднена непосредственная экспериментальная проверка принимаемых допущений. Совершенствование методики суммирования должно осуществляться на базе экспериментально подтвержденных и имеющих физическое обоснование критериев усталостного разрушения.

Таким образом, при разработке метода расчета долговечности необходимо установить критерий усталостного разрушения, механизм накопления повреждений, а также параметр, характеризующий долговечность материала в условиях однородного и неоднородного напряженного состояния. Предпочтение может быть отдано энергетическому подходу, поскольку он допускает физически ясное суммирование рассеянной энергии как при регулярном, так и нерегулярном циклическом нагружении.

В направлении решения указанных задач в лаборатории "Прочность" выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования проведены на установках, созданных на базе универсальных электромеханических испытательных машин. Эти установки включают специализированные тензометры, блоки обработки аналоговых сигналов, аналого-цифровые преобразователи, компьютер [1]. Разработанное программное обеспечение дает возможность получать информацию о рассеиваемой в металле в процессе циклического нагружения энергии. Реализован метод петли гистерезиса, разрешающая способность блока измерения составляет около $5 \cdot 10^{-6}$ мм/мм. Для измерения деформаций в концентраторах напряжений и гладких образцах применены тензометры с базами 2 мм и 15 мм. Образцы были изготовлены из материалов с контрастными циклическими деформационными свойствами, а именно, из малопластичных сплавов Д16АТ, В95пчТ2, В95пчТ3, пластичного АМцМ

и стали 30ХГСА со средними свойствами пластичности. Кроме этого были испытаны образцы из сталей 40Х, 45, 12ХНЗА и др.

В процессе испытаний образцов без концентраторов напряжений проведены измерения амплитуды полной и остаточной деформации, которая численно равна половине ширины петли гистерезиса. Предложено уравнение кинетической диаграммы циклического деформирования (зависимости амплитуды остаточной деформации от относительной наработки), введены функции разупрочнения (упрочнения) [2 – 4]. Зависимость средних значений остаточных деформаций от амплитуд напряжений характеризует основная диаграмма циклического деформирования. По результатам экспериментов при симметричном и асимметричном нагружении установлено, что эту зависимость в логарифмических координатах можно представить в виде прямой или ломаной прямой, состоящей из двух отрезков.

В задачах поциклового расчета напряженного состояния и определения долговечности возникает необходимость в учете действительной диаграммы циклического деформирования материала, которая устанавливает зависимость текущих значений деформаций от напряжений или контур петли гистерезиса при периодическом нагружении. Показана применимость уравнения в виде суммы линейного и степенного слагаемых, записанного в координатах разгрузки, помещенных в точки реверса напряжений и деформаций, предложены уравнения контура, коэффициентов формы петли гистерезиса [5] и поперечной деформации [6].

На основе анализа результатов экспериментальных исследований в работе [7] сформулирована модель расчета кинетики амплитуды остаточной деформации при программном нагружении. Очень важная особенность циклического деформирования металла при блочном нагружении заключается в том, что после перегрузки на ступени с максимальной амплитудой напряжения величина амплитуды остаточной деформации на остальных ступенях превышает значение, достигаемое при регулярном нагружении с той же наработкой и амплитудой напряжения. Если число блоков до разрушения велико, то без существенной погрешности можно считать, что кинетика остаточной деформации наблюдается только на перегрузочной ступени в блоке нагрузок.

Величину рассеянной за цикл нагружения в элементарном объеме материала энергии обычно находят как площадь петли гистерезиса. В работе [8] предложен энергетический критерий усталостного разрушения метал-

лов, основанный на разделении суммарной рассеянной за цикл нагружения энергии на опасную и неопасную с точки зрения усталости составляющие.

Энергетический критерий усталостного разрушения и модель циклического деформирования материала позволили сформулировать метод расчета долговечности при нерегулярном нагружении [9, 10]. Поскольку циклическое деформирование нестабильных металлов характеризуется различными кинетическими диаграммами и функциями разупрочнения (упрочнения), нельзя установить единую формулу для расчета долговечности. Однако, исходя из общих соотношений, могут быть получены зависимости, применимые для конкретного материала и условий нагружения.

При расчете долговечности тел с концентраторами напряжений необходимо различать две задачи, первая связана с определением локальных напряжений и деформаций, а вторая – с установлением параметра, характеризующего долговечность до возникновения трещины в условиях неоднородного напряженного состояния.

По совокупности результатов экспериментальных исследований локальных деформаций, полученных с помощью малобазных тензометров, и расчетов по ряду известных приближенных зависимостей отмечено, что наилучшее согласование обеспечивает формула Нейбера с поправочной функцией Махутова [11, 12]. Тем не менее, достигаемая при этом точность нахождения локальных напряжений и деформаций не всегда удовлетворительна. Предложено [13] уточнять поправочную функцию по результатам упругопластического расчета НДС по методу конечных элементов для конкретного концентратора напряжений. В зависимости от решаемой задачи в качестве физического закона следует принимать диаграмму монотонного или циклического деформирования конструкционного материала.

Для решения второй задачи выполнено сопоставление долговечности гладких и надрезанных образцов в зависимости от различных параметров локального напряженно-деформированного состояния. Показано [14], что кривые усталости гладких и надрезанных образцов совпадают только в координатах амплитуда остаточной деформации или рассеянная энергия – число циклов до зарождения трещины размером 0,2 – 0,5 мм. Рассеянную энергию находим как произведение локального напряжения, остаточной деформации в вершине концентратора и коэффициента формы петли гистерезиса. В условиях сложного напряженного состояния в расчетах следует использовать интенсивности напряжений и остаточных деформаций

[13]. Согласование кривых усталости гладких и надрезанных образцов в указанных координатах равнозначно по точности. Однако предпочтение отдано рассеянной энергии, поскольку она допускает физически ясное суммирование при нерегулярном нагружении.

Для учета влияния градиентов напряжений и деформаций на долговечность тел с надрезами [15] применена известная гипотеза о том, что число циклов до зарождения макротрещины определяется характеристиками НДС на некотором расстоянии от вершины концентратора напряжений. В работе [16] на основе предположения о применимости формулы Нейбера в окрестности точки с наибольшей концентрацией предложены зависимости для расчета градиентов напряжений и деформаций. Методики расчета долговечности и предела выносливости образцов с надрезами опубликованы в [17, 18].

Применение энергетического подхода позволило проводить расчеты долговечности при циклическом изгибе [19] по усталостным и циклическим деформационным свойствам материала, полученным в условиях растяжения-сжатия, учитывая при этом форму и размеры детали.

В практике эксплуатации нередки случаи, когда на конструкцию действуют циклические нагрузки с различными частотами. Применительно к авиаконструкциям в качестве несущей закономерно изменяющейся циклической нагрузки рассматривают цикл земля-воздух-земля. На этот цикл накладываются случайные нагрузки, определяемые турбулентностью атмосферы, неровностями аэродрома и др. В первом приближении такое нагружение схематизируют и представляют как бигармоническое, полагая, что частота несущей низкочастотной гармоники существенно ниже частоты высокочастотной гармоники. В работе [20] предложен метод расчета долговечности при таком нагружении, проведено сопоставление с результатами экспериментальных исследований, выполненных в ЦАГИ и ИПП НАН Украины, отмечены причины погрешности известной методики расчета, основанной на линейном суммировании усталостных повреждений.

Метод расчета долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию применен к расчету элементов конструкций с контактной передачей нагрузки. Проведен анализ локального упругопластического НДС на основе МКЭ на контуре заполненного и нагруженного отверстий [21]. Расчет НДС выполнен в два этапа, на первом – определено распределение усилий по связям с учетом податливости крепежа, а на втором – получено распределение напряжений и деформаций на

контуре отверстий в результате численного решения контактной задачи взаимодействия крепежа и обшивки. Установлено, что локальная циклограмма напряжений не только количественно, но и качественно отличается от циклограммы номинальных напряжений, задаваемой в виде программы типового полета [22].

Предложенный метод расчета долговечности элементов конструкций в совокупности с многоуровневым конечно элементным анализом напряженно-деформированного состояния позволяет без проведения дополнительных экспериментальных исследований выбирать рациональное конструктивное решение на этапах проектирования и доработок конструкции, определять эквиваленты соответствия по повреждению программы испытаний и спектра эксплуатационных нагрузок. Установлено лучшее согласование с экспериментальными данными результатов расчетов долговечности натуральных конструкций по сравнению с известными методами. Эффективность и достоверность метода подтверждены на примерах расчета долговечности крыльев самолетов Ан-24, Ту-160, Бе-200 и др., гермошпангоута фюзеляжа самолета Boeing 747SR, модели фюзеляжа самолета Boeing 737 при действии циклического наддува [23].

Заключение

1. Предложен метод расчета долговечности элементов конструкций до возникновения усталостных трещин по локальному напряженно-деформированному состоянию, основанный на энергетическом критерии усталостного разрушения. В качестве необходимой информации о свойствах материала достаточно иметь циклические деформационные и усталостные характеристики, полученные при испытаниях гладких образцов.

2. Показана возможность применения метода к элементам конструкций с контактной передачей нагрузки, что позволяет определять долговечность зон конструктивной нерегулярности на этапе проектирования без проведения дополнительных испытаний.

Литература

1. Фомичев П.А., Трубочанин И.Ю., Гребенюк Я.В. Система автоматизированной регистрации и обработки циклических деформационных характеристик конструкционных материалов // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: ХАИ. – 1998. – С. 14 – 18.

2. Фомичев П.А., Лукаш П., Кунз Л. Определение диаграмм циклического деформирования сталей 15313 и 13030 при многоцикловом мягком нагружении // IX Междунар. коллоквиум "Механическая усталость металлов" (Смоленице, Словакия, декабрь 1987 г.). – Братислава, 1987. – С. 130 – 134.

3. Фомичев П.А., Трубочанин И.Ю., Свирский Ю.А. Исследование циклических деформационных характеристик стали 30ХГСА // Пробл. прочности. – 1991. – № 5. – С. 47 – 50.

4. Фомичев П.А. Соотношения между долговечностью, кинетикой деформаций и напряжений при мягком и жестком нагружении // Тр. XI Международного коллоквиума "Механическая усталость металлов". – К.: Наук. думка, 1992. – Т. 1. – С. 43 – 49.

5. Фомичев П.А., Трубочанин И.Ю. Уравнение контура и коэффициент формы петли гистерезиса // Проблемы прочности. – 1997. – № 3. – С. 30 – 38.

6. Фомичев П.А., Трубочанин И.Ю. Коэффициент поперечной деформации и деформационный гистерезис при циклическом нагружении // Проблемы прочности. – 1997. – № 4. – С. 30 – 37.

7. Фомичев П.А., Трубочанин И.Ю. Изменение амплитуды пластической деформации при регулярном и программном мягком нагружении сталей // Проблемы прочности. – 1991. – № 2. – С. 39 – 44.

8. Трощенко В.Т., Фомичев П.А. Энергетический критерий усталостного разрушения // Проблемы прочности. – 1993. – № 1. – С. 3 – 10.

9. Фомичев П.А. Энергетический метод расчета долговечности при нерегулярном нагружении. Сообщение 1. Учет последовательности действия нагрузок // Проблемы прочности. – 1995. – № 7. – С. 3 – 12.

10. Фомичев П.А. Энергетический метод расчета долговечности при нерегулярном нагружении. Сообщение 2. Долговечность при программном блочном нагружении // Проблемы прочности. – 1995. – № 8. – С. 3 – 11.

11. Звягинцев В.В., Фомичев П.А. Экспериментальное исследование долговечности и циклической остаточной деформации в зоне концентрации напряжений // Прочность конструкций летательных аппаратов. – Х.: ХАИ. – 1990. – Вып. 9. – С. 49 – 58.

12. Фомичев П.А., Звягинцев В.В. Прогнозирование долговечности тел с надрезами по локальному напряженно-деформированному состоянию. Сообщение 1. Определение напряжений и деформаций в надрезе при циклическом упругопластическом деформировании // Проблемы прочности. – 2000. – № 3. – С. 37 – 45.

13. Фомичев П.А., Гребенюк Я.В., Трубочанин И.Ю. Расчеты долговечности элементов конструкций в условиях сложного поля напряжений //

Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: ХАИ. – 2003. – Вып. 19. – С. 63 – 66.

14. Фомичев П.А. Прогнозирование долговечности тел с надрезами по локальному напряженно-деформированному состоянию. Сообщение 2. Определение параметра, характеризующего долговечность тел с концентраторами напряжений // Проблемы прочности. – 2000. – № 3. – С. 46 – 55.

15. Фомичев П.А. Прогнозирование долговечности тел с надрезами по локальному напряженно-деформированному состоянию. Сообщение 3. Учет градиентов напряжений и деформаций // Проблемы прочности. – 2000. – № 4. – С. 12 – 21.

16. Фомичев П.А. Расчет градиентов действительных напряжений и деформаций в зоне концентрации напряжений при упругопластическом циклическом деформировании. Сообщение 1 // Проблемы прочности. – 1989. – № 9. – С. 98 – 100.

17. Фомичев П.А., Полак Я. Методика расчета долговечности образцов с концентратором напряжений. Сообщение 2 // Проблемы прочности. – 1989. – № 9. – С. 100 – 103.

18. Фомичев П.А. Методика расчета предела выносливости образцов с концентратором напряжений // Проблемы прочности. – 1989. – № 11. – С. 84 – 86.

19. Фомичев П.А., Абдулкадеер А.Я. Методика расчета долговечности и предела выносливости тел при изгибе // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: ХАИ. – 1999. – Вып. 9. – С. 375 – 379.

20. Фомичев П.А. Долговечность при бигармоническом нагружении // Проблемы прочности. – 2004. – № 3. – С. 25 – 36.

21. Фомичев П.А., Гонтаренко А.П. Определение локальных упругопластических деформаций на контуре заполненного и нагруженного отверстий // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: ХАИ. – 1998. – Вып. 6. – С. 29 – 33.

22. Фомичев П.А., Шпак В.В., Сидоров Н.Г. Формирование локальной циклограммы напряжений при сложном нагружении панели крыла // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ». – 2003. – Вып. 19. – С. 58 – 62.

23. Dybskiy P., Terada H., Fomichov P., Trubchanin I., Shpack V. An approach for prediction of the fatigue crack initiation in airframe metal structures // Fracture and Damage Mechanics. International Conference. London. – July 27 – 29, 1999. – P. 475 – 482.

Поступила в редакцию 11.04.2005