

Автоматизация расчетов усталостной долговечности элементов авиаконструкций с геометрическими концентраторами напряжений

Полоник Е.Н.*, Суренский Е.А., Федотов А.А.*****

Корпорация «Иркут», Ленинградский проспект, 68,

Москва, 125315, Россия

**e-mail: Evgeniy.Polonik@irkut.com*

***e-mail: Evgeniy.Surenskiy@irkut.com*

****e-mail: Aleksandr.Fedotov02@irkut.com*

Аннотация

В статье содержится описание компьютерной программы SNCalculator для расчета долговечности элементов конструкции с геометрическими концентраторами. SNCalculator интегрируется в программный комплекс конечно-элементных расчетов Femap и позволяет значительно повысить степень автоматизации расчетов. Приложение реализует три наиболее распространенные в авиационной отрасли методики расчета усталостной прочности: расчет по качеству конструкции (Лоим В.Б.), расчет по теории подобия (Когаев В.П.) и расчет по теории рейтингов усталости (Стрижиус В.Е.). Описаны основные элементы методик и приведена принципиальная схема алгоритма расчета усталостной долговечности программой SNCalculator.

Ключевые слова: усталостная долговечность, концентрация напряжений, авиационные конструкции, автоматизация.

Введение

Обеспечение проектного ресурса является важной задачей при проектировании современных транспортных самолетов. Решение этой задачи позволяет уточнить выбор материалов и конструктивно-технологических решений, тем самым, создать более безопасную и экономически эффективную конструкцию.

Известно, что в реальных элементах конструкций существенную роль в снижении усталостной долговечности имеют геометрические концентраторы напряжений. Особенно много подобных концентраторов различного масштаба (от отверстия под заклепку до выреза фюзеляжа под дверь) и типа (вырезы, галтели и т.п.) имеется в современных самолетах. Тем самым, расчет на долговечность элементов конструкций с геометрическими концентраторами напряжений приобретает особое значение.

Расчет усталостной долговечности является трудоемким процессом, так как при его выполнении расчетчик должен оперировать большим числом данных, обусловленных историей нагружения и поиском критических мест. Необходимость его автоматизации и интеграции с конечно-элементными комплексами очевидна и подтверждается как наличием коммерческих программных продуктов, так и программных пакетов собственной разработки предприятий и КБ авиационной отрасли.

В статье рассмотрена программа SNCalculator, разрабатываемая авторами и позволяющая проводить автоматизированные расчеты усталостной долговечности элементов конструкций как без, так и с геометрическими концентраторами

напряжений, изложены методики расчета и приведен алгоритм работы программы.

Программа SNCalculator

Для выполнения оценки усталостной долговечности элементов конструкции с геометрическими концентраторами напряжений (в первую очередь разнообразных вырезов) с высокой степенью автоматизации на языке программирования C# была разработана программа SNCalculator (интерфейс программы см. на рис.1). Данное приложение интегрируется в программный комплекс конечно-элементных расчетов Femap. Это обеспечивает интерактивность взаимодействия с анализируемой конечно-элементной моделью (КЭМ), а также загрузку результатов статических расчетов в автоматическом режиме (при формировании циклограмм напряжений) посредством API Femap.

SNCalculator позволяет выполнять расчеты усталостной долговечности по трем различным методикам (теориям): теории подобия, теории “качества” конструкции и теории рейтингов усталости (описание этих методик приведено в следующем разделе статьи).

Перед проведением усталостных расчетов пользователь должен выполнить статический анализ КЭМ на расчетные случаи, соответствующие режимам полета. Полученные результаты используются при задании маски истории нагружения. Маска представляет собой таблицу, в которой каждая строка содержит информацию о коэффициенте пульсации, соответствующем расчетном случае (наборе результатов статического расчета Femap) и числе повторений цикла с данным уровнем напряжений. В процессе расчета происходит загрузка необходимых данных статического анализа из КЭМ, и на их основе формируются циклограммы

нагрузки.

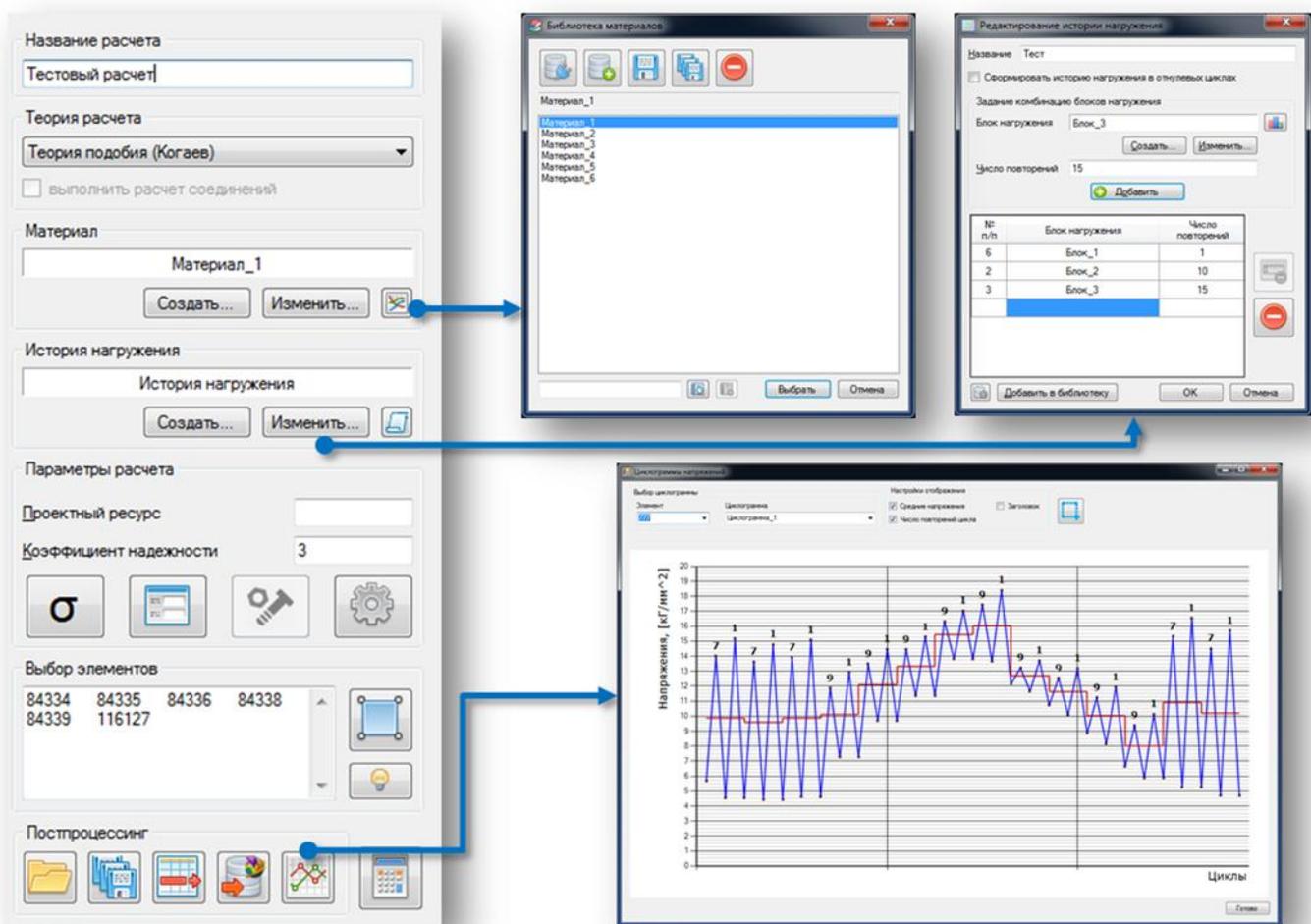


Рисунок 1 – Интерфейс программы SNCalculator

Исходными данными для работы программы являются:

- параметры материала;
- маска истории нагружения;
- параметры теории расчета;
- уровень напряжений – брутто/нетто (для теории подобия);
- напряжения, полученные при статическом анализе конструкции

(автоматически загружаются из модели Femap).

Для повторного использования материалов и масок истории нагружения в приложении имеется набор библиотек.

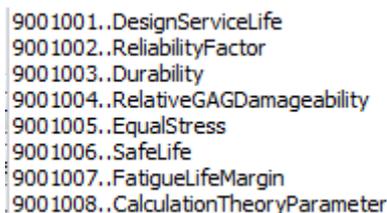
Выполнив расчет, пользователь получает доступ к возможностям обработки результатов расчета (постпроцессингу) SNCalculator, который позволяет:

- сохранить результаты;
- экспортировать результаты в таблицу Excel;
- экспортировать результаты в модель Femap;
- выполнить просмотр циклограмм напряжений.

В таблицу Excel экспортируются следующие данные:

- № конечного элемента;
- теория расчета;
- проектный ресурс (в историях нагружений);
- коэффициент надежности;
- долговечность (за одну историю нагружения);
- безопасный ресурс (в историях нагружений);
- параметр теории расчета (качество, эффективный коэффициент концентрации напряжений или рейтинг усталости);
- относительная повреждаемость цикла земля-воздух-земля (ЗВЗ);
- напряжение эквивалентного по вносимому повреждению отнулевого цикла (для одной истории нагружения);
- коэффициент запаса усталостной долговечности.

При экспорте результатов в КЭМ в комплексе Femap создается новый набор данных (output set) с названием проведенного расчета, включающий в себя вектора результатов (output vectors), приведенные на рис. 2 и соответствующие данным, выводимым при экспорте результатов в Excel.



```
9001001..DesignServiceLife
9001002..ReliabilityFactor
9001003..Durability
9001004..RelativeGAGDamageability
9001005..EqualStress
9001006..SafeLife
9001007..FatigueLifeMargin
9001008..CalculationTheoryParameter
```

Рисунок 2 – Экспортируемые в Femap результаты расчета (output vectors)

При просмотре циклограмм напряжений (см. рис. 1, правый нижний угол) отображаются циклы нагружения в виде кривой минимум-максимум напряжений с подписанным над каждым максимумом числом повторений цикла.

Для получения более полной информации о расчете имеется возможность настройки вывода промежуточных файлов нескольких типов (циклограмма до обработки методом “дождя”, обработанная циклограмма (в виде блока нагружения) и т.п.), запись которых осуществляется в директорию, заданную пользователем.

Методики и алгоритм расчета, реализованные в программе SNCalculator

Как было отмечено выше, SNCalculator позволяет выполнять расчеты усталостной долговечности по трем различным методикам. Первые два метода относятся к группе методов, которые используют понятие эффективного коэффициента концентрации напряжений. В теории подобия эффективный

коэффициент концентрации напряжений (K_{eff}) рассчитывается по формуле Когаева [1, 2]. Во втором методе, предложенном Лоимом [3], оперируют параметром “качество” (K). Уровень SN кривой эталонного образца материала и величина эффективного коэффициента концентрации напряжений одновременно определяют “качество” элемента конструкции, эта характеристика определяется на основании анализа экспериментальных данных и накопленного опыта эксплуатации аналогичных конструкций. В третьем методе, предложенном Стрижиусом [4], используется понятие рейтинга усталости (σ_R) – максимального нормального напряжения отнулевого цикла (номинальное напряжение в сечении “брутто”), при котором усталостная долговечность элемента в зоне рассматриваемого потенциально-критического места равна 10^5 циклов при 50%-ной вероятности с уровнем надежности 0,5. Далее, для краткости, каждую методику (теорию) будем обозначать по фамилии автора.

Отметим общие положения всех трех реализованных в SNCalculator методик:

- для схематизации циклограммы напряжений и выделения полуциклов используется метод дождя [5];
- для суммирования повреждений используется линейная теория Пальмгрена-Майнера.

Кратко опишем основные элементы методик.

1) После обработки циклограммы по методу дождя необходимо привести все полученные циклы к отнулевым циклам равного повреждения. Для этого используется формула Одингса $\sigma_{прив} = \sigma_{max} (1 - R)^{0.5}$ (методики Лоима и Когаева) или

формула Уолкера $\sigma_{прив} = \sigma_{\max} (1-R)^\gamma$ с параметром $\gamma = 0,6$ (методика Стрижиуса).

Параметр R в этих формулах – коэффициент асимметрии цикла.

2) Вычисляется напряжение эквивалентного по вносимому повреждению всей истории нагружения отнулевого цикла (эквивалент) по формуле $\sigma_{\text{экс}} = \sqrt[m]{\sum_i n_i \sigma_{\text{прив}i}^m}$.

3) Для методик Лоима и Когаева необходимо перестроить SN кривую образца (например, полосы с отверстием) для обсчитываемого элемента конструкции с

концентратором по формуле $\sigma = \frac{\sigma_{\text{концентратора}}}{K_\sigma} \frac{K_{\text{eff}}}{K_{\text{обр}}^{\text{обр}}}$ (Когаев) и $\sigma = \sigma_{\text{концентратора}} \frac{K}{K_{\text{обр}}}$ (Лоим).

В этих формулах K_σ - теоретический коэффициент концентрации напряжений «брутто» образца.

4) Расчет долговечности ведется по формулам: $N = \frac{10^C}{(\sigma_{\text{экс}})^m}$ (Лоим, Когаев) и

$$N = 10^5 \left(\frac{\sigma_R}{\sigma_{\text{экс}}} \right)^m \text{ (Стрижиус).}$$

В этих формулах m и C – параметры SN кривой ($\sigma^m N = 10^C$). В расчете по методикам Лоима и Когаева эквивалент используется с учетом перестройки SN кривой.

5) Параметры теорий (методик) расчета

- Качество (параметр теории Лоима) обычно назначается расчетчиком, например, качество образца типа полоса с отверстием равно 3, качество контура крупномасштабного выреза с приклепанным усилением равно 2,8 и т.п. [3].

- Эффективный коэффициент концентрации напряжений (параметр теории Когаева) определяется по формуле из теории подобия Когаева [1, 2]:

$$K_{eff} = \frac{2K_{\sigma}}{1 + \left(\frac{88,3 \cdot \bar{G}}{L} \cdot 1_{мм^2} \right)^{\gamma}} + \frac{1}{\beta_{srf}} - 1$$

где γ – экспериментальная константа, для алюминиевых сплавов равна 0,2;
 β_{srf} – коэффициент учета качества поверхности, может принимать значение от 0,2 до 1; \bar{G} – относительный градиент напряжений, по выбору пользователя его расчет может производиться программой SNCalculator автоматически; L – периметр зоны повышенной концентрации напряжений.

- Рейтинг усталости (параметр теории Стрижиуса) элемента конструкции определяется по формуле [4]: $\sigma_R = \sigma_{R0} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_7$, где σ_{R0} – базовое значение рейтинга усталости «ненадрезанного» элемента конструкции, k_1 – коэффициент эффективности местных утолщений, k_2 – коэффициент поверхностной обработки и k_7 – коэффициент числа однотипных концентраторов.

Принципиальная схема алгоритма расчета по всем трем методикам приведена на рис. 3.

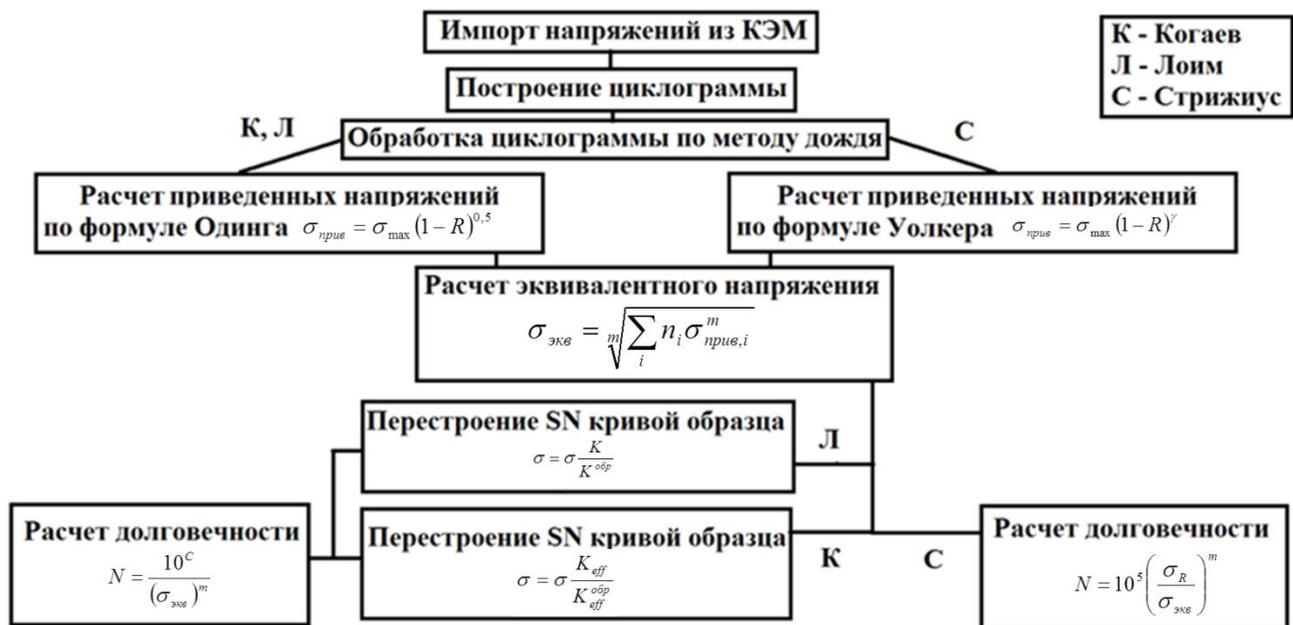


Рисунок 3 - Принципиальная схема алгоритма расчета усталостной долговечности

Заключение

Применение SNCalculator при проектировании авиационных конструкций позволяет значительно снизить временные затраты на подготовку исходных данных, проведение усталостных расчетов и анализ полученных результатов. Добиться этого помогает эффективное использование имеющихся конечно-элементных моделей, простота в задании исходных данных, а также возможность получения подробной информации о расчетах в удобной для анализа форме.

Дальнейшее направление развития программы – реализация расчета болтовых и заклепочных соединений по методикам, предложенным Стебеньевым В.Н. [6] и Стрижусом В.Е. [4]. Отметим, что уже реализованная в SNCalculator методика Лоима [3] позволяет рассчитывать указанные соединения с привлечением параметра «качество».

Библиографический список

1. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. ГОСТ 25.504-82. - М.: Издательство стандартов, 1982. - 55 с.
2. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. - М.: Машиностроение, 1993. - 364 с.
3. Лоим В.Б. Практика расчетной оценки долговечности авиаконструкций с использованием эффективных коэффициентов концентрации напряжений // Вестник машиностроения. 1998. №9. С. 31-37.
4. Стрижиус В.Е. Методы расчета усталостной долговечности элементов авиаконструкций: Справочное пособие. - М.: Машиностроение, 2012. - 272 с.
5. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. ГОСТ 25.101-83. - М.: Издательство стандартов, 1983. - 25 с.
6. Стебнев В.Н. Методика оценки сопротивления усталости соединений // Труды ЦАГИ. 1981. выпуск 2117. С. 42-54.