

Федеральное агентство по образованию
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Национальный проект «Образование»
Инновационная образовательная программа ННГУ. Образовательно-научный центр
«Информационно-телекоммуникационные системы: физические основы и
математическое обеспечение»

Н.Н. Берендеев

Применение системы ANSYS к оценке усталостной долговечности

*Учебно-методические материалы по программе повышения
квалификации «Информационные системы в
математике и механике»*

Нижний Новгород

2006

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	4
2. Основы расчета долговечности при многоцикловой усталости	6
2.1. Определение опасной точки	6
2.2. Определение истории нагружения	6
2.3. Задание свойств материала	11
2.4. Задание характеристик конструкции или ее элемента влияющих на изучаемый процесс	14
2.5. Расчет усталостной долговечности	17
3. Основы методики расчета повреждения при многоцикловой усталости в системе ANSYS	17
3.1. Основная терминология	18
3.2. Методика оценки степени поврежденности	20
4. Расчет элемента конструкции с использованием модуля Fatigue ..	23
4.1. Последовательность выполняемых команд	23
4.2. Примеры расчета усталостного повреждения	38
5. Контрольные вопросы	78
6. Контрольные задания	79
Литература	82

Учебно-методические материалы подготовлены в рамках инновационной образовательной программы ННГУ: Образовательно-научный центр «Информационно-телекоммуникационные системы: физические основы и математическое обеспечение»

Берендеев Н.Н. Применение системы ANSYS к оценке усталостной долговечности. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Новые подходы в исследованиях и разработках информационно-телекоммуникационных систем и технологий». Нижний Новгород, 2006, 83 с.

Аннотация

Данная работа посвящена изучению особенностей оценки усталостной долговечности с использованием пакета конечно элементного анализа ANSYS.

В первой части разбираются теоретические основы расчета усталостной долговечности. Вторая часть посвящена изучению основных методов и методик расчета усталостной долговечности, реализованных в системе ANSYS. В третьей части на базе ряда примеров проводится ознакомление с методами оценки усталостной долговечности, акцентируется внимание на особенностях применения изучаемых методик.

© Н.Н. Берендеев

ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при анализе конструкций и их элементов помимо традиционной задачи определения напряженно-деформированного состояния все чаще рассматриваются задачи определения ресурса конструкций [1, 2]. Одним из вопросов, которые необходимо изучить в данном случае является вопрос условий разрушения конструкций. На сегодняшний день в численных методах решения задач механики деформируемого твердого тела развиваются два основных подхода к решению указанной задачи. Первый подход – моделирование развития дефектов (поры, трещины и т.п.) с учетом изменения граничных условий в рассматриваемом элементе конструкции и перестроение сетки при изменении размеров дефекта [3 – 8]. Второй подход – оценка степени поврежденности материала в элементах конструкции при условии, что дефекты и их рост в явном виде не рассматриваются [9 – 12].

Согласно публикациям, посвященным применению первого подхода [4, 13–15], указанный подход является индивидуальным для каждой конкретной задачи и приводит к написанию собственного программного обеспечения или макросов в существующих системах конечно-элементного анализа (ANSYS, NASTRAN и т.п.). Его применение требует от пользователя уровня знаний научного сотрудника, имеющего опыт численного моделирования задач роста трещин.

Второй подход не позволяет в явном виде оценить момент разрушения конструкции, но позволяет получить наглядную картину степени поврежденности конструкции на основе, используемых моделей накопления повреждений. Указанная картина может применяться при оценке ресурса конструкции. Данный подход соответствует требованиям, предъявляемым к методам исследования процессов разрушения в массовых системах конечно-элементного анализа, используемых при решении инженерных задач. К недостаткам данного подхода можно отнести то, что не учитывается влияние деградации свойств материала вследствие накопления повреждений при анализе напряженно деформированного состояния рассматриваемых элементов конструкций.

В настоящее время при изучении процессов разрушения выделяют ряд основных явлений, характеризующих особенности протекания указанных процессов. На основе введенного положения механизмы разрушения разделяют на следующие основные типы [4, 16]: динамическое (импульсное), например: ударное; длительное, например: ползучесть, релаксация; периодическое (циклическое), например: квазистатическое,

малоцикловая усталость, многоцикловая усталость. Среди перечисленных выше процессов разрушения одной из наиболее типичных и часто встречающихся причин отказов элементов инженерных конструкций является процесс многоцикловой усталости [1]. Данный процесс характеризуется отсутствием макропластических деформаций, подверженных ему изделий, и длительностями $5 \cdot 10^4 - 10^7$ циклов нагружения [17]. Рассмотрим возможность определения степени поврежденности материала элементов конструкций в ходе многоцикловой усталости с использованием конечно-элементной системы ANSYS.

В данной системе реализована возможность исследования разрушения, вызванного многоцикловой усталостью, посредством второго подхода к исследованию процессов разрушения. В случае многоцикловой усталости данный подход может быть рассмотрен как корректный подход к описанию процесса разрушения. С учетом следующих обстоятельств: процесс накопления повреждений при многоцикловой усталости, приводящий к разрушению конструкций, локализован в малой области [18, 19], размеры которой много меньше характерных размеров конечных элементов в сетках [4], применяемых при моделировании элементов конструкций; разрушение происходит при напряжениях меньших предела текучести и не сопровождается возникновением макрообластей пластических деформаций [18]; в процессе разрушения не происходит изменения геометрических размеров конструкций и их элементов.

ГЛАВА 2. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРИ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

При решении задачи оценки усталостной долговечности традиционно выделяют ряд основных этапов [20]:

- определение опасной точки (сечения) в конструкции, в которой локализован процесс разрушения при многоцикловой усталости;
- определение истории нагружения в выбранной опасной точке;
- задание свойств материала;
- задание характеристик конструкции или ее элемента, влияющих на изучаемый процесс;
- расчет усталостной долговечности.

Рассмотрим каждый из указанных выше этапов.

2.1. Определение опасной точки

Процесс многоцикловой усталости по определению относится к процессам разрушения, не сопровождающимся развитой пластической деформацией [18–20]. Как следствие, данный процесс локализован в окрестности некоторой точки, в которой возникают наиболее благоприятные условия для протекания, изучаемого процесса.

Указанная точка определяется не только видом напряженного состояния, но и характеристиками самой конструкции.

2.2. Определение истории нагружения

При определении истории нагружения в выбранной опасной точке возникает ряд проблем, связанных с тем, что в общем случае история нагружения представляет собой случайную функцию, а напряженное состояние, как правило, является многоосным. Рассмотрим подробнее способы решения указанной задачи.

Традиционно принято разбивать все типы нагружения на два основных типа: регулярное нагружение и случайное нагружение [20]. В случае первого типа нагружения зависимость параметра, характеризующего нагружение, от времени представляет собой синусоиду или набор синусоид последовательно сменяющихся друг друга во времени. В случае второго типа нагружения зависимость параметра, характеризующего нагружение, от времени представляет собой случайную функцию или случайную функцию на некотором отрезке, которая периодически повторяется во времени.

Все методы оценки усталостной долговечности используют внешнюю нагрузку в том виде, который характерен для описания регулярного нагружения – цикл нагружения характеризуется средним и амплитудным значениями [20, 21].

Поэтому перед проведением расчета усталостной долговечности предварительно проводят схематизацию истории нагружения, сводя историю случайного нагружения к блочному регулярному нагружению [20].

В настоящее время для решения указанной задачи применяются методы «падающего дождя» или полных циклов [20].

При характеристике истории нагружения в случае многоциклового усталости принято использовать три основных подхода [21]: внешнее воздействие описывается зависимостью компонент тензора напряжений в опасной точке от времени, зависимостью неупругой деформации в опасной точке от времени и зависимостью либо полной удельной энергии, либо какой-то ее части от времени. В инженерных приложениях традиционно для характеристики истории нагружения используется первый подход [20].

В элементах реальных конструкций в основном возникает многоосное напряженное состояние. Большая часть экспериментальных данных, на которых базируется расчет усталостной долговечности, получены в случае одноосного нагружения при симметричном цикле нагружения. Поэтому при использовании для описания внешнего воздействия зависимости компонент тензора напряжений в опасной точке от времени необходимо уметь переходить от многоосного напряженного состояния к одноосному и от асимметричного цикла нагружения к симметричному циклу нагружения. Для перехода от многоосного к одноосному напряженному состоянию используются различные типы эквивалентного по повреждаемости одноосного напряжения. При переходе от асимметричного цикла нагружения к симметричному циклу нагружения также используются различные типы эквивалентного напряжения. Для перехода от реальной истории нагружения к ее схематизированному аналогу, который может быть сопоставлен с экспериментальными данными, применяются различные подходы, основное отличие которых состоит в последовательности выполнения следующих операций: схематизация истории нагружения, переход от многоосного к одноосному напряженному состоянию и переход от асимметричного к симметричному нагружению.

Рассмотрим подробнее зависимости, описывающие перечисленные выше операции.

Так как описание методов схематизации нерегулярного нагружения является достаточно объемным, а знание используемой в них методологии не нужно при решении инженерных задач, то в данной работе указанные сведения не приводятся, а желающие ознакомиться с данными методами могут рассмотреть работы [1, 20].

Введем обозначения: $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(t)$ – зависимость компонент тензора напряжений в опасной точки от времени, характеризующая историю нагружения; σ^l – какой-либо параметр напряженного состояния после процесса схематизации истории нагружения.

Перечислим основные зависимости, используемые при переходе от многоосного к одноосному напряженному состоянию.

Согласно результатам экспериментальных и теоретических работ ход процесса многоциклового усталости обусловлен накоплением микропластических деформаций в зернах материала конструкций [18–20]. Поэтому для проведения указанного выше перехода традиционно используют гипотезы [22] максимального касательного напряжения (Трескя-Сен-Венана) и удельной энергии формоизменения (Губеря-Мизеса-Генки), в которых одноосное напряженное состояние эквивалентное по поврежденности данному многоосному состоянию описывается следующими соотношениями соответственно

$$\sigma_{eqv} = |\sigma_1 - \sigma_3|, \quad (1)$$

$$\sigma_{eqv} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}, \quad (2)$$

где σ_{eqv} – эквивалентное напряжение, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – первое, второе и третье главные напряжения данного напряженного состояния.

Для описания перехода от асимметричного к симметричному циклу нагружения используются следующие зависимости, связывающие амплитуду напряжения эквивалентного по повреждаемости симметричного цикла нагружения $\sigma_{a eqv}$ с амплитудным и средним напряжением данного асимметричного цикла нагружения.

Зависимость Серенсена-Кинашвили [20]

$$\sigma_{a\text{ eqv}} = \sigma_a + \Psi_{\sigma} \sigma_m, \quad (3)$$

где σ_a, σ_m – амплитудное и среднее напряжение данного асимметричного цикла нагружения, Ψ_{σ} – коэффициент учета асимметрии цикла нагружения, который определяется по формуле [20]

$$\Psi_{\sigma} = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}, \quad (4)$$

здесь σ_{-1} – предел усталости при симметричном цикле нагружения ($\sigma_m = 0$), σ_0 – предел усталости при пульсирующем (отнулевом) цикле нагружения ($\sigma_a = \sigma_m$).

Зависимость Гудмана [18]

$$\sigma_{a\text{ eqv}} = \sigma_a + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \sigma_m, \quad (5)$$

где σ_B – предел прочности.

Зависимость Гербера [18]

$$\sigma_{a\text{ eqv}} = \sqrt{(\sigma_a)^2 + \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B}\right)^2 (\sigma_m)^2}. \quad (6)$$

Зависимость Зодерберга [18]

$$\sigma_{a\text{ eqv}} = \sqrt{(\sigma_a)^2 + \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_T}\right)^2 (\sigma_m)^2}, \quad (7)$$

где σ_T – предел текучести.

Особняком от приведенных выше зависимостей стоит зависимость Сайнса (Sines) [23], которая изначально разрабатывалась для случая описания многоосного напряженного состояния для возможности получения амплитуды напряжения симметричного цикла нагружения эквивалентного по повреждаемости с данным асимметричным циклом нагружения, в том случае если главные оси тензоров напряжений амплитудных и средних значений напряжения цикла не совпадают (например, в случае симметричного цикла кручения при постоянном изгибе и т.п.).

$$\sigma_{a\,eqv} = \frac{3}{\sqrt{2}}\tau_{a\,oct} + 3\Psi_{\sigma}\sigma_{m\,oct}, \quad (8)$$

где $\tau_{a\,oct}$ – касательное октаэдрическое напряжение тензора амплитуд напряжений, определяемое по формуле

$$\tau_{a\,oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_{a1} - \sigma_{a2})^2 + (\sigma_{a2} - \sigma_{a3})^2 + (\sigma_{a1} - \sigma_{a3})^2}, \quad (9)$$

здесь $\sigma_{a1}, \sigma_{a2}, \sigma_{a3}$ – первое, второе и третье главное напряжения тензора амплитуд напряжений, $\sigma_{m\,oct}$ – октаэдрическое нормальное напряжение тензора средних напряжений цикла, определяемое по формуле

$$\sigma_{m\,oct} = \frac{\sigma_{m1} + \sigma_{m2} + \sigma_{m3}}{3}, \quad (10)$$

где $\sigma_{m1}, \sigma_{m2}, \sigma_{m3}$ – первое, второе и третье главное напряжения тензора средних напряжений.

При определении последовательности выполнения действий для получения схематизированной истории нагружения, применимой при оценке усталостной долговечности выделяют два основных пути [17]:

- схематизация истории нагружения – переход от многоосного к одноосному напряженному состоянию – переход от асимметричного цикла нагружения к симметричному циклу нагружения;
- схематизация истории нагружения – переход от асимметричного цикла нагружения к симметричному циклу нагружения – переход от многоосного к одноосному напряженному состоянию.

Результатом процесса схематизации и сведения к эквивалентным значениям истории нагружения является последовательность значений эквивалентных амплитуд напряжений при одноосном симметричном цикле нагружения $\sigma_{a\,eqv}^l$, где $l = \overline{1, N_b}$, где N_b – число циклов выделенных при схематизации нерегулярного нагружения.

2.3. Задание свойств материала

При описании процесса многоциклового усталости основной характеристикой материала, используемой для описания его способности сопротивления процессу многоциклового усталости, является кривая Велера (Wöhler) (кривая усталости) [18, 25]. Эта кривая (рис. 1) описывает зависимость максимального значения напряжения в цикле от числа циклов до разрушения при данном уровне максимального напряжения, постоянного в ходе всего процесса нагружения.

Для различных типов материалов указанная кривая в области многоциклового усталости имеет различный вид [18, 24]:

- для мало- и среднеуглеродистых сталей, мало- и среднелегированных сталей данная кривая имеет горизонтальную асимптоту (рис. 1, кривая 1) и как следствие физический предел усталости σ_R (ордината асимптоты);
- для высокопрочных легированных сталей данная кривая состоит из одного участка и не имеет горизонтальной асимптоты (рис. 1, кривая 2);
- для цветных металлов, их сплавов и нержавеющей сталей данная кривая состоит из двух участков и также не имеет горизонтальной асимптоты (рис. 1, кривая 3). В этом случае, так же как и в предыдущем, материал не имеет физического предела усталости. Вместо него рассматривается условный по базе предел усталости – уровень максимального напряжения σ_R^b , при котором разрушение произойдет через заданное число циклов (базу) N_b .

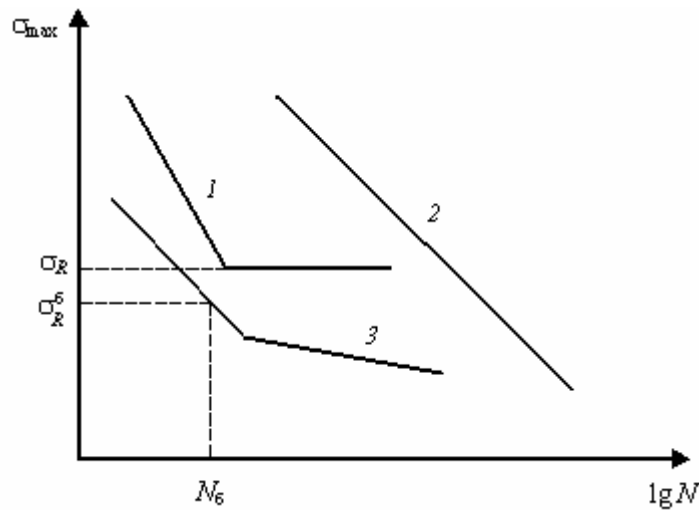


Рис. 1.

Для описания наклонного участка (участков) кривой Велера при многоцикловой усталости традиционно используется уравнение Басквина (Basquin) [26]

$$\sigma_a = CN^m, \quad (11)$$

здесь N – число циклов нагружения до разрушения при амплитуде напряжения равной σ_a , m – константа материала, C – константа материала, которая для материалов первого типа имеет вид

$$C = \sigma_{-1} N_G^{-m}, \quad (12)$$

где N_G – абсцисса точки перегиба на кривой Велера.

Приведенные выше кривые усталости соответствуют поведению образцов материалов. Данные кривые являются экспериментальными зависимостями. В настоящее время при исследовании хода процесса многоцикловой усталости применяются следующие типы экспериментов [18, 20, 27]: циклический изгиб: плоский и с вращением, консольный, трехточечный и четырехточечный; циклическое растяжение-сжатие; циклическое кручение. Вид получаемых в ходе данных экспериментов кривых усталости эквивалентен, а числовые значения отличаются. Например, пределы усталости низко- и

среднедегированных сталей при симметричном цикле нагружения для растяжения-сжатия

σ_{-1}^{pc} , изгиба σ_{-1}^I и кручения τ_{-1}^K связаны следующими соотношениями [28, 29]

$$\begin{aligned} \sigma_{-1}^{pc} &= (0,7 \div 0,9)\sigma_{-1}^I \\ \tau_{-1}^K &= (0,5 \div 0,6)\sigma_{-1}^I \end{aligned} \quad (13)$$

Для алюминиевых сплавов эти же величины связаны следующими соотношениями [28, 29]

$$\begin{aligned} \sigma_{-1}^{pc} &= (0,85 \div 0,95)\sigma_{-1}^I \\ \tau_{-1}^K &= (0,55 \div 0,65)\sigma_{-1}^I \end{aligned} \quad (14)$$

Помимо указанных выше соотношений, от типа проводимого испытания согласно экспериментальным данным, также зависит коэффициент чувствительности к асимметрии цикла нагружения в зависимостях (3). Согласно данным работ [17, 20] в случае циклического изгиба и циклического растяжения-сжатия его значения совпадают и могут быть определены согласно формуле (4), а в случае циклического кручения данные значения отличаются и определяются согласно зависимости [20]

$$\psi_{\tau} = \frac{2\tau_{-1} - \tau_0}{\tau_0}, \quad (15)$$

здесь τ_{-1} – предел усталости при симметричном циклическом кручении ($\tau_m = 0$), τ_0 – предел усталости при пульсирующем (отнулевом) циклическом кручении ($\tau_a = \tau_m$).

С учетом указанного выше, становится очевидной необходимость рассмотрения вида напряженного состояния, к которому тяготеет напряженное состояние в элементе конструкции. С последующим выбором соответствующей диаграммы усталости и соответствующего набора констант в соотношении (3).

Для определения вида напряженного состояния можно использовать параметр Надаи-Лоде

$$\chi_{\sigma} = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1 . \quad (16)$$

Значения данного параметра χ_{σ} принадлежат отрезку $[-1;1]$.

В зависимости от значения параметра напряженное состояние соответствует одному из следующих видов:

- $\chi_{\sigma} = -1$ – одноосное растяжение;
- $\chi_{\sigma} = 1$ – одноосное сжатие;
- $\chi_{\sigma} = 0$ – чистый сдвиг;
- $-1 \leq \chi_{\sigma} < -0,5$ – растяжение;
- $-0,5 \leq \chi_{\sigma} \leq 0,5$ – сдвиг;
- $0,5 < \chi_{\sigma} \leq 1$ – сжатие.

Часто при решении практических задач для материала изучаемой конструкции известна только одна кривая Велера (наиболее распространенными являются данные, полученные в условиях циклического изгиба). В то время как, напряженное состояние изделия тяготеет к другому напряженному состоянию. В этом случае с учетом предположения об эквивалентности вида кривых усталости при различных видах экспериментов, искомую кривую можно получить путем умножения известных данных на коэффициент, взятый из формул (13) и (14) (параллельный перенос кривой вдоль оси максимальных напряжений (см. рис.1)).

2.4. Задание характеристик конструкции

Согласно экспериментальным данным на ход процесса многоциклового усталости помимо истории нагружения и усталостных свойств материала влияет также размер конструкции (масштабный эффект), величины градиентов напряжений в окрестности опасной точки (концентрация напряжений), наличие и величина остаточных напряжений в окрестности опасной точки, качество обработки поверхности в области опасной точки, среда, в которой работает элемент конструкции.

Для учета указанных выше факторов при оценке уровня усталостной поврежденности конструкции вводят коэффициенты пересчета предела усталости K_D . В ходе исследования элементов конструкций вместо предела усталости образца σ_{-1}

рассматривается предел усталости элемента конструкции σ_{D-1} , определяемый по формуле

$$\sigma_{D-1} = K_D \sigma_{-1}. \quad (17)$$

В инженерной практике принята следующая формула для определения коэффициента K_D с учетом указанных выше факторов [30]

$$K_D = \frac{1}{(K_\sigma/K_d + 1/K_F - 1)/K_v}, \quad (18)$$

где K_σ – эффективный коэффициент концентрации напряжений (отношение предела усталости гладкого образца к пределу усталости образца с концентратором напряжений), определяется по формуле

$$K_\sigma = 1 + (\alpha_\sigma - 1)q. \quad (19)$$

Здесь α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений, определяемый из номограмм (например, в работах [20, 27]), q – коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений; K_d – коэффициент влияния абсолютных размеров поперечного сечения или масштабный фактор (отношение предела усталости образца заданного диаметра к пределу усталости образца со стандартным диаметром¹) определяется на основе номограмм; K_F – коэффициент влияния качества обработки поверхности (отношение предела усталости образца с рассматриваемым качеством обработки поверхности к пределу усталости образца, на основании которого была получена кривая Велера) определяется на основе номограмм²; K_v – коэффициент

¹ В настоящее время данный диаметр равен 5 мм. В более ранних работах указанная величина составляла 7,5 мм и даже 10 мм. Поэтому при нахождении данного коэффициента необходимо знать диаметр образцов, с использованием которых была получена кривая Велера.

² В настоящее время принятой нормой обработки поверхности образцов для построения кривой Велера является полировка. Ранее использовались шлифованные образцы.

влияния поверхностного упрочнения (отношение предела усталости образца с рассматриваемой обработкой поверхности к пределу усталости не упрочненного образца) определяется на основе номограмм. Значения коэффициента чувствительности материала к концентрации напряжений для различных типов материалов [17], приведены в таблице 1.

Таблица 1

Тип материала	q
Литые материалы и материалы с внутренними источниками концентрации и дефектами (серый чугун и т.п.)	0,1 – 0,2
Литые жаропрочные сплавы, стальное и алюминиевое литье, модифицированные чугуны	0,1 – 0,4
Низкоуглеродистые стали, жаропрочные деформируемые сплавы, аустенитные коррозионно-стойкие стали, алюминиевые деформируемые сплавы	0,3 – 0,5
Среднеуглеродистые стали, низколегированные стали	0,4 – 0,6
Конструкционные легированные стали	0,6 – 0,7
Высоколегированные стали (типа коррозионно-стойких сталей мартенситного класса), титановые сплавы	0,7 – 0,9

Данные, приведенные в таблице, показывают, что чем более бездефектной является структура материала и, чем менее пластичным является данный материал, тем он более чувствителен к концентрации напряжений (тем ближе эффективный коэффициент концентрации напряжений K_{σ} к теоретическому коэффициенту концентрации напряжений α_{σ}).

При проведении расчетов в формулах (3–8), вместо амплитуды напряжения цикла σ_a подставляется величина

$$\sigma_a^D = \frac{\sigma_a}{K_D}. \quad (20)$$

Например, формула (3) примет вид

$$\sigma_{a\text{ eqv}} = \frac{\sigma_a}{K_D} + \psi_\sigma \sigma_m . \quad (21)$$

2.5. Расчет усталостной долговечности

После того как получено схематизированное описание процесса нагружения в виде набора амплитуд эквивалентных напряжений $\sigma_{a\text{ eqv}}^l$, $l = \overline{1, N_b}$; задано уравнение, описывающее кривую Велера; учтены особенности элемента конструкции путем введения в рассмотрение предела усталости элемента конструкции σ_{D-1} , можно переходить к оценке поврежденности конструкции, накопленной в ходе процесса многоциклового усталости.

Предположим, что каждый l -й цикл нагружения в рассматриваемом процессе разрушения конструкции повторяется k_l раз.

При описании повреждения, накопленного в конструкции, наиболее часто используется правило линейного суммирования повреждений Пальмгрена–Минера [20]. Согласно данному правилу повреждение, накопленное в опасной точке, определяется по формуле

$$\psi = \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{N_i}, \quad (22)$$

где n – число различных амплитуд напряжений в процессе нагружения, k_i – число повторений амплитуды $\sigma_{a\text{ eqv}}^i$ в процессе нагружения, N_i – число циклов до разрушения при амплитуде напряжения $\sigma_{a\text{ eqv}}^i$, определяемое с использованием кривой Велера.

С учетом соотношения (22), принимая предположение о не повторяемости амплитуд напряжений в процессе нагружения, повреждение, накопленное в опасной точке изучаемой конструкции при заданных условиях нагружения будет определяться по формуле

$$\Psi = \sum_{i=1}^{N_b} \Psi_i = \sum_{i=1}^{N_b} \frac{k_i}{N_i}, \quad (23)$$

где Ψ_i – повреждение, накопленное в результате действия амплитуды $\sigma_{a\,eqv}^i$ за все время процесса нагружения, будет определяться по формуле

$$\Psi_i = \frac{k_i}{N_i}. \quad (24)$$

В случае описания процесса накопления повреждений уравнением (23) условие разрушения записывается в виде

$$\Psi \geq a_p.^3. \quad (25)$$

³ Традиционно $a_p = 1$. Но в зависимости от характера нагружения a_p может быть как больше, так и меньше единицы [1, 20, 24]. Вместе с тем, при нерегулярном нагружении с хаотичным порядком изменения пиковых значений напряжений оценка $a_p = 1$ является корректной [1, 20].

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ПРИ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ В СИСТЕМЕ ANSYS

3.1. Основные терминологии

При работе в модуле **Fatigue** (усталость) системы ANSYS используются ряд основных терминов.

Location или *Fatigue location* или *Fatigue stress location* – точка в конструкции в которой исследуется процесс многоциклового усталости.

Event или *Fatigue event* – событие – аналог цикла нагружения. Данный термин введен в связи с тем, что в изучаемой системе при схематизации процесса нагружения процесс рассматривается не целиком, а по частям. Схематизация каждой указанной части должна приводить к одному циклу нагружения, используемому при оценке накопленного повреждения. Введенная выше часть процесса нагружения и носит название события.

Loading – момент времени в ходе события во время, которого задается напряженное состояние.

Usage factor или *Partial usage* – повреждение, накопленное в изучаемой точке конструкции за событие (или от многократного возникновения условий одного и того же события).

Cumulative fatigue usage – суммарное повреждение, накопленное в изучаемой точке конструкции за весь процесс нагружения.

Alternating stress – амплитудное значение напряжения в цикле.

Scale factor for stress – коэффициент (масштабный фактор напряжений) на который умножается текущий уровень напряжения⁴. Для каждого события может быть задан по отдельности.

Stress concentration factor – коэффициент концентрации напряжений. Задается для *Location*, следовательно, одинаков для всех событий. Используется для учета воздействия на ход процесса накопления повреждений при многоциклового усталости концентрации напряжений, масштабного эффекта, качества обработки поверхности, среды, в которой

⁴ Если история нагружения является последовательностью подобных циклов нагружения (σ_a , σ_m в циклах нагружения различны, а их соотношение одно и то же), то при расчетах удобно решить задачу об определении распределения напряжений только для одного случая, а для других получить путем использования того же напряженного состояния, умноженного на соответствующий коэффициент пересчета (часто решают задачу для случая единичной внешней нагрузки, а затем умножают на величину действительной нагрузки).

происходит процесс нагружения. Эквивалентен коэффициенту K_D , определяемому по формуле (18).

3.2. Методика оценки степени поврежденности

Модуль **Fatigue** системы ANSYS реализован в виде калькулятора в блоке постпроцессора, поэтому история нагружения может быть, как прочитана из файлов результатов, так и введена вручную. Подобный подход оправдан тем, что для балочных элементов значения напряжений, полученных в результате расчетов в системе ANSYS, не отображаются в файле результатов.

Процедура оценки степени повреждаемости, возникающей в опасной точке конструкции, в модуле **Fatigue** содержит следующий основной набор действий:

- задание опасной точки;
- задание коэффициента концентрации напряжений в выбранной опасной точке;
- задание истории нагружения в виде последовательности событий (число событий m), с учетом числа повторений каждого события $p_j, j = \overline{1, m}$;
- введение масштабного фактора напряжений для каждого события;
- вычисление для каждого *Loading* эквивалентного одноосного напряжения по гипотезе максимального касательного напряжения (1);
- схематизация процесса нагружения по методу «падающего дождя»; результатом данного действия будет набор амплитуд эквивалентных напряжений $\sigma_{a\ eqv}^i$, длина которого равна $0,5G(G - 1)$, где G – суммарное число *Loading* во всех событиях и числа повторений каждой из этих амплитуд напряжений k_i ;
- задание диаграммы усталости в виде набора точек (кривая Велера на основе этих точек интерполируется некоторым полиномом);
- вычисление повреждения (*Usage factor*) для каждого события по формуле (24);
- оценка суммарного повреждения (*Cumulative fatigue usage*) по формуле (23).

Рассмотрим подробнее результаты процесса схематизации и то, каким образом связаны величины p_j и k_j , а так же амплитуды эквивалентных напряжений.

При проведении процесса схематизации в системе ANSYS получается набор эквивалентных амплитуд напряжений $\sigma_{a\ eqv}^{\alpha\beta\gamma\delta}$, которые являются амплитудами цикла

нагружения при условии, что пиковые значения данного цикла нагружения (максимум и (или) минимум) соответствуют нагружению β события α и нагружению δ события γ . При этом, событие α имеет p_α повторений, а событие γ имеет p_γ повторений.

Указанный выше набор величин $\sigma_{a\text{ eqv}}^{\alpha\beta\gamma\delta}$ группируется в порядке убывания.

Рассмотрим процедуру определения величин $\sigma_{a\text{ eqv}}^i$ и k_i на основе набора величин $\sigma_{a\text{ eqv}}^{\alpha\beta\gamma\delta}$, реализованную в модуле **Fatigue**.

На первом шаге процедуры рассматривается первый элемент набора величин $\sigma_{a\text{ eqv}}^{\alpha\beta\gamma\delta}$ – $\sigma_{a\text{ eqv}}^{\alpha_1\beta_1\gamma_1\delta_1}$. Данный элемент принимается за $\sigma_{a\text{ eqv}}^1$. Число повторений данной амплитуды определяется по формуле

$$k_1 = \min \{ p_{\alpha_1}, p_{\gamma_1} \}. \quad (26)$$

Затем производится пересчет величин p_{α_1} и p_{γ_1} по формулам

$$\begin{aligned} p_{\alpha_1} &= p_{\alpha_1} - k_1, \\ p_{\gamma_1} &= p_{\gamma_1} - k_1. \end{aligned} \quad (27)$$

На втором шаге процедуры рассматривается элемент $\sigma_{a\text{ eqv}}^{\alpha_2\beta_2\gamma_2\delta_2}$. Производится проверка условия

$$p_{\alpha_2} > 0 \cap p_{\gamma_2} > 0. \quad (28)$$

Если данное условие не выполнено, то переходим к следующему шагу (следующему элементу набора).

Если выполнено, то $\sigma_{a\text{ eqv}}^2 = \sigma_{a\text{ eqv}}^{\alpha_2\beta_2\gamma_2\delta_2}$. Число повторений данной амплитуды определяется по формуле

$$k_2 = \min \{ p_{\alpha_2}, p_{\gamma_2} \}. \quad (29)$$

Производится пересчет величин p_{α_2} и p_{γ_2} по формулам

$$\begin{aligned} p_{\alpha_2} &= p_{\alpha_2} - k_2, \\ p_{\gamma_2} &= p_{\gamma_2} - k_2. \end{aligned} \quad (30)$$

i-й шаг процедуры.

Производится проверка условия

$$p_{\alpha_i} > 0 \cap p_{\gamma_i} > 0. \quad (31)$$

Если данное условие не выполнено, то переходим к следующему шагу (следующему элементу набора).

Если выполнено, то $\sigma_{a\ eqv}^i = \sigma_{a\ eqv}^{\alpha_i \beta_i \gamma_i \delta_i}$. Число повторений данной амплитуды определяется по формуле

$$k_i = \min \{ p_{\alpha_i}, p_{\gamma_i} \}. \quad (32)$$

Производится пересчет величин p_{α_i} и p_{γ_i} по формулам

$$\begin{aligned} p_{\alpha_i} &= p_{\alpha_i} - k_i, \\ p_{\gamma_i} &= p_{\gamma_i} - k_i. \end{aligned} \quad (33)$$

ГЛАВА 4. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТА КОНСТРУКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДУЛЯ *FATIGUE*

При описании использования модуля **Fatigue** для оценки поврежденности элементов конструкций выберем следующую методику: на первом этапе приведем последовательность команд в системе ANSYS и пути к соответствующим пунктам меню; на втором этапе рассмотрим ряд примеров, позволяющих показать особенности работы модуля.

4.1. Последовательность выполняемых команд

Для вхождения в модуль **Fatigue** надо пройти следующий набор меню и подменю:

Main Menu > General Postproc > Fatigue.

На рис. 2. представлен вид главного меню при вхождении в указанный модуль.

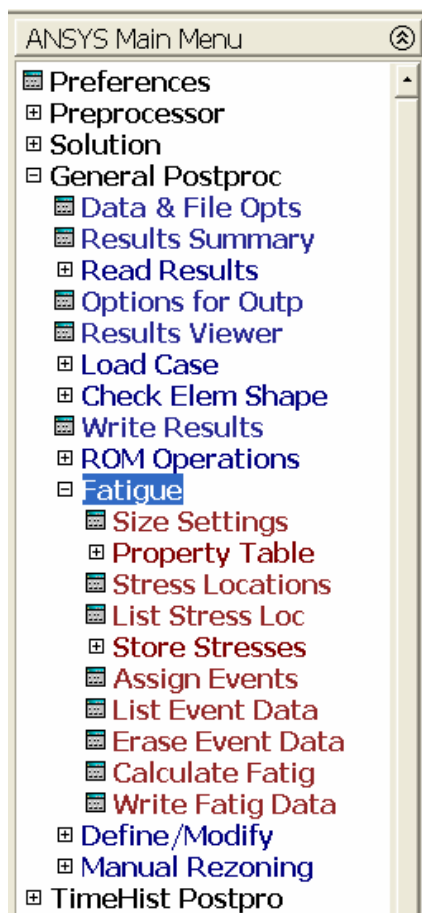


Рис. 2.

1 шаг. Задание размерности задачи: определение максимального числа точек в конструкции (поле, в котором задается данный параметр, обведено красным эллипсом на рис. 4), в которых будет проводиться вычисление усталостного повреждения; определение максимального числа событий при усталостном нагружении (поле, в котором задается данный параметр, обведено зеленым эллипсом на рис. 4); определение максимального числа нагружений в одном событии⁵ (поле, в котором задается данный параметр, обведено синим эллипсом на рис. 4). Для данной цели служит команда **FTSIZE**. Путь через систему меню и подменю для выполнения тех же действий следующий:

Main Menu > General Postproc > Fatigue> Size Settings.

На рис. 3 представлен вид главного меню при вызове рассматриваемой команды.

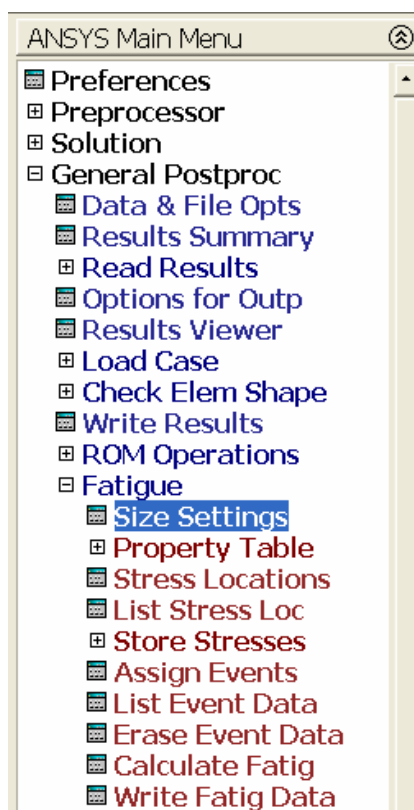


Рис. 3.

На рис. 4 представлена форма, появляющаяся при вызове команды **FTSIZE**.

⁵ По умолчанию в программе выставлены следующие значения перечисленных выше параметров: число точек – 5, число событий – 10, число нагружений – 3. Если задается только одно событие для каждой точки, то оно должно содержать не менее трех нагружений.

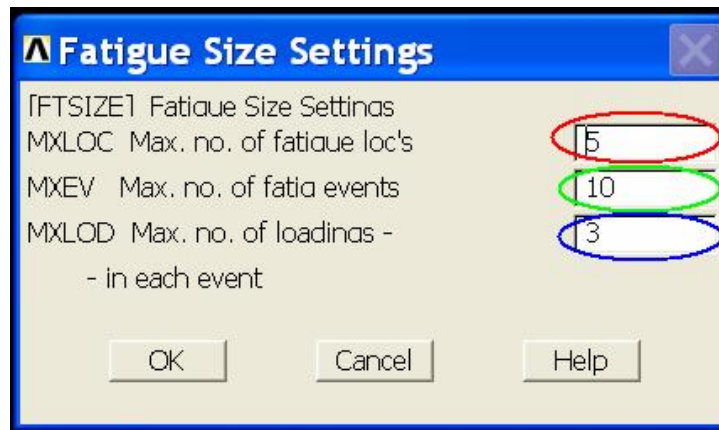


Рис. 4.

2 шаг. Задание и описание каждой из точек, в которых будет проводиться вычисление усталостного повреждения. При этом определяются следующие параметры: номер точки (на рис. 6 поле, где должен быть задан этот параметр, обведено красным эллипсом); номер узла, которому соответствует данная точка (на рис. 6 поле, где должен быть задан этот параметр, обведено зеленым эллипсом); значения коэффициентов концентрации напряжений по каждой из осей в глобальной системе координат (на рис. 6 поле, где должен быть задан этот параметр, обведено синим эллипсом). Для данной цели служит команда **FL**. Путь через систему меню и подменю для выполнения тех же действий следующий:

Main Menu > General Postproc > Fatigue>Stress Location.

На рис. 5 представлен вид главного меню при вызове рассматриваемой команды. На рис. 6 представлена форма, появляющаяся при вызове команды **FL**.

В зависимости от того будет ли история нагружения вводиться вручную или данные будут браться из файла результатов расчета выполняется соответственно шаг 3 или шаг 4⁶.

⁶ Первый подход к заданию истории нагружения может использоваться как в случае, если известна полученная из вне история нагружения, так и в случае, если элемент конструкции изучался в системе ANSYS, но моделировался балочными конечными элементами.



Рис. 5.

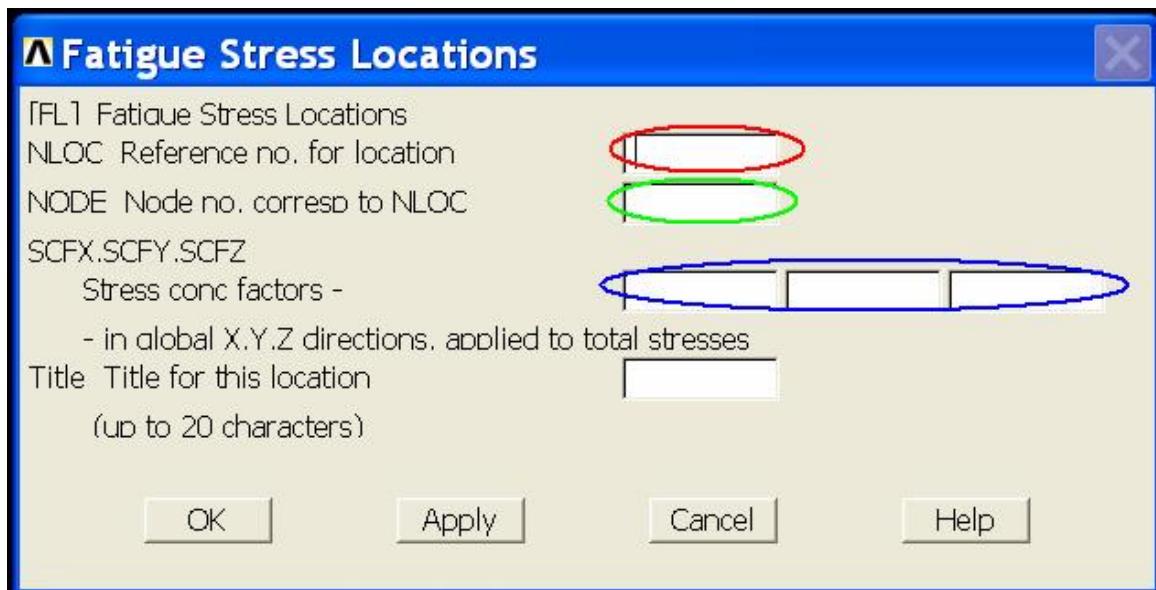


Рис. 6.

3 шаг. Задание напряженного состояния, соответствующего одному нагружению одного из событий одной из точек, вручную⁷. При этом задается номер события (на форме, приведенной на рис.8, поле для ввода указанного параметра помечено красным эллипсом) и номер нагружения (на форме, приведенной на рис.8, поле для ввода указанного параметра помечено зеленым эллипсом). Для данной цели служит команда **FS**. Путь через систему меню и подменю для выполнения тех же действий следующий:

Main Menu > General Postproc > Fatigue>Store Stresses>Specified Val.

На рис.7 представлен вид главного меню при вызове рассматриваемой команды.

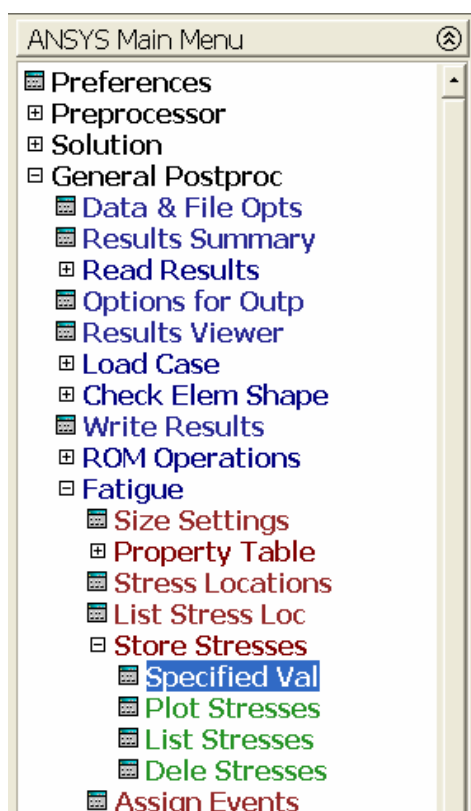


Рис. 7.

На рис. 8 представлена форма, появляющаяся при вызове команды **FS**.

⁷ Если для описываемого нагружения все компоненты напряженного состояния равны нулю, то надо ввести хотя бы один ноль. Не ввод ни одного нулевого значения приведет к ошибке.

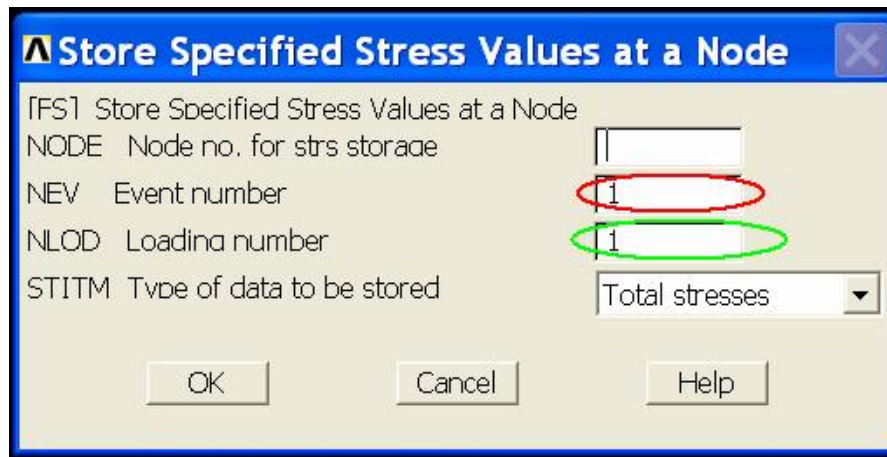


Рис. 8.

4-ый шаг. Задание напряженного состояния, соответствующего одному нагружению одного из событий одной из точек, из файла результатов. При этом задается номер узла конечно-элементной сетки, для которого извлекаются данные, а также номер события и номер нагружения, с которыми ассоциируются присваиваемые напряжения (поле для ввода первого из указанных параметров в форме, приведенной на рис. 10, помечено красным эллипсом, для второго параметра зеленым эллипсом, а для третьего синим эллипсом). Для данной цели служит команда **FSNODE**⁸. Путь через систему меню и подменю для выполнения тех же действий следующий:

Main Menu > General Postproc > Fatigue> Store Stresses>From rst File.

На рис.9 представлен вид главного меню при вызове рассматриваемой команды. На рис. 10 представлена форма, появляющаяся при вызове команды **FSNODE**.

Шаг 3 или шаг 4 повторяются число раз необходимое для задания истории нагружения во всех рассматриваемых точках.

5 шаг. Построение графика истории нагружения выбранной компоненты напряженного состояния в пределах, которая выбирается в поле, обведенном красным эллипсом на рис.12, заданного события, которая выбирается в поле, обведенном зеленым эллипсом на рис.12, для заданной точки, которая выбирается в поле, обведенном синим эллипсом на

⁸Перед выполнением данной команды должен быть открыт файл результатов, или должна быть открыта задача, в которой произведены вычисления. Более подробно эта операция будет описана в конце данного подраздела.

рис. 12. Для данной цели служит команда **FSPLLOT**. Путь через систему меню и подменю для выполнения тех же действий следующий:

Main Menu > General Postproc > Fatigue>Store Stresses>Plot Stresses.



Рис. 9.

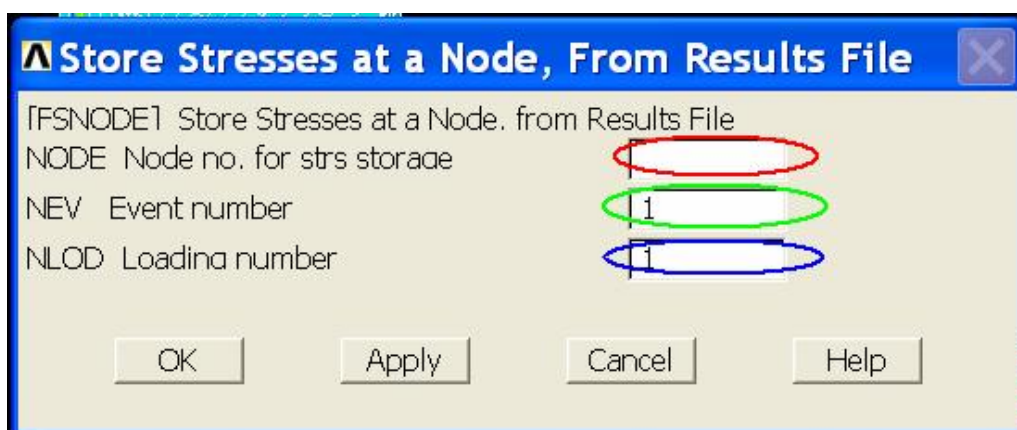


Рис. 10.

На рис.11 представлен вид главного меню при вызове рассматриваемой команды. На рис. 12 представлена форма, появляющаяся при вызове команды **FSPLLOT**.



Рис. 11.

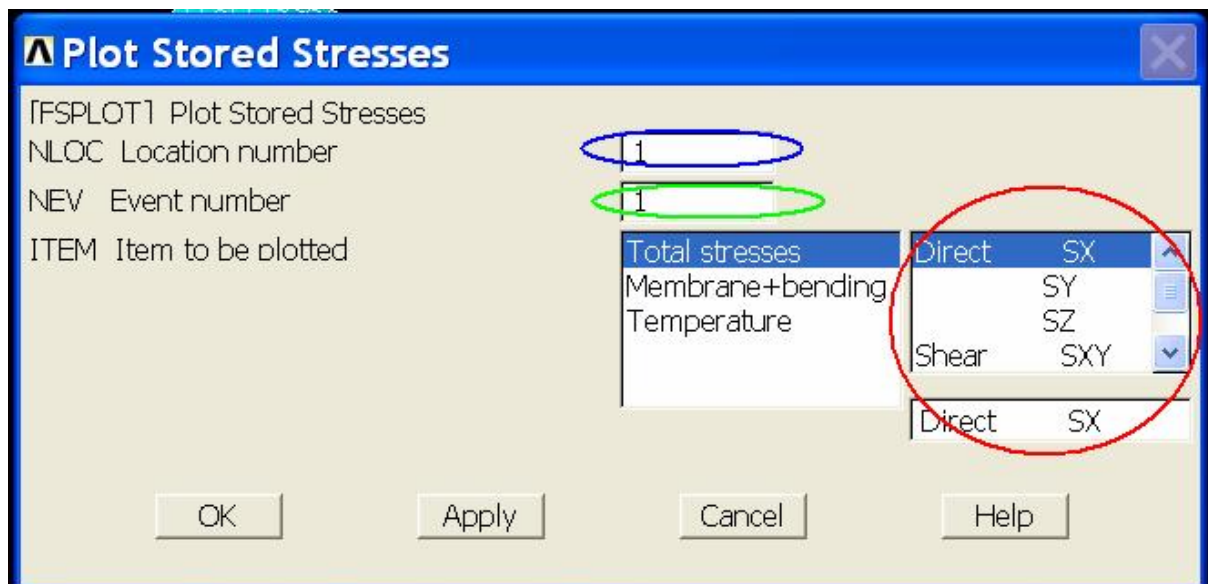


Рис. 12

6 шаг. Вывод в виде списка истории нагружения по всем компонентам напряженного состояния или для всех точек по всем событиям, или для выбранных точек по выбранным событиям. Для данной цели служит команда **FSLIST**. Путь через систему меню и подменю для выполнения тех же действий следующий:

Main Menu > General Postproc > Fatigue>Store Stresses>List Stresses.

На рис.13 представлен вид главного меню при вызове рассматриваемой команды. На рис. 14 представлена форма, появляющаяся при вызове команды **FSLIST**.



Рис. 13.

7 шаг. Описание каждого события. Для события с заданным номером (указывается в поле, обведенном красным эллипсом, на рис. 16) определяется число повторений данного события (указывается в поле, обведенном зеленым эллипсом, на рис. 16); масштабный

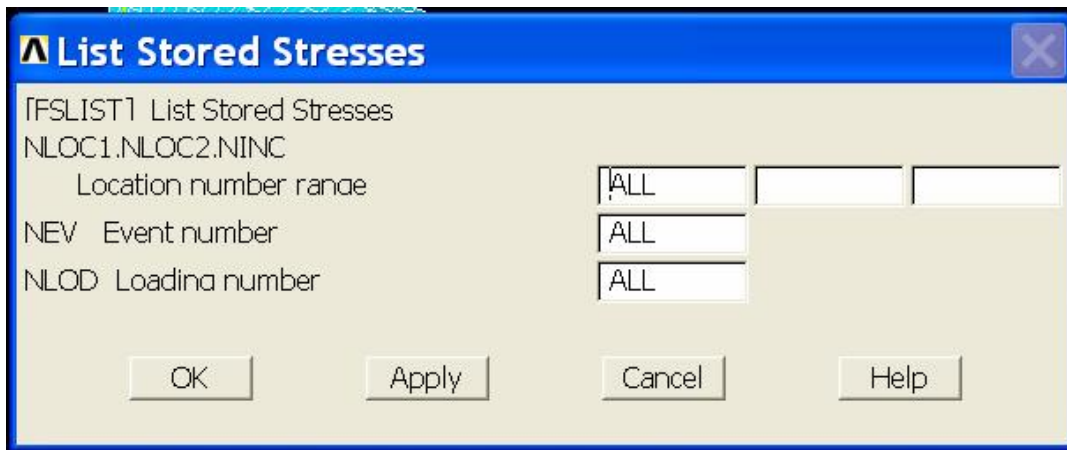


Рис. 14

фактор (указывается в поле, обведенном синим эллипсом, на рис. 16)⁹. Для данной цели служит команда **FE**. Путь через систему меню и подменю для выполнения тех же действий следующий:

Main Menu > General Postproc > Fatigue>Assign Events.

На рис.15 представлен вид главного меню при вызове рассматриваемой команды.

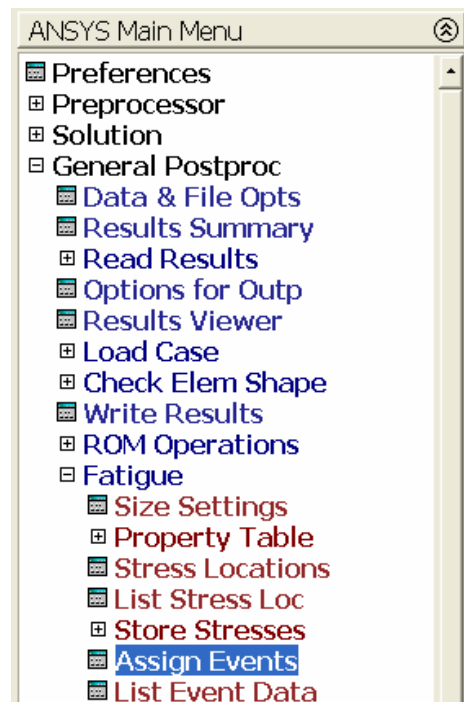


Рис. 15.

⁹ По умолчанию для каждого события в программе выставлены следующие значения: число повторений – 1; масштабный фактор – 1.

На рис. 16 представлена форма, появляющаяся при вызове команды **FE**.

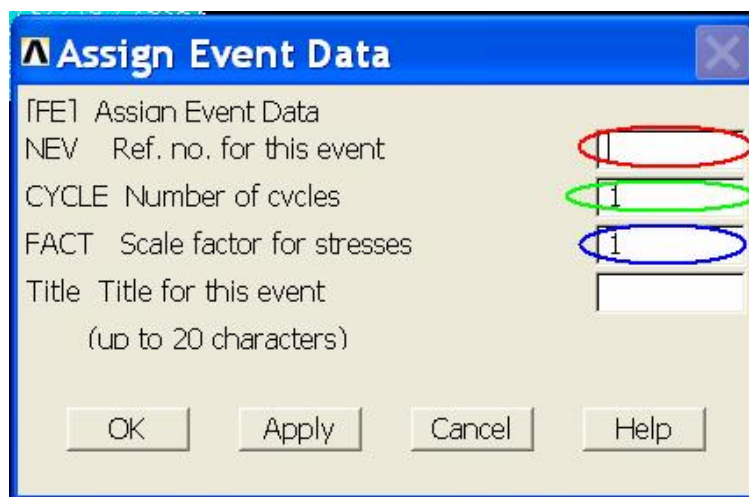


Рис. 16.

8 шаг. Вычисление набора амплитуд эквивалентных напряжений по всей истории нагружения для заданной точки (поле, в котором надо указать номер данной точки, обведено на рис. 18 красным эллипсом)¹⁰. Для данной цели служит команда **FTCALC**. Путь через систему меню и подменю для выполнения тех же действий следующий:

Main Menu > General Postproc > Fatigue> Calculate Fatig.

На рис.17 представлен вид главного меню при вызове рассматриваемой команды. На рис. 18 представлена форма, появляющаяся при вызове команды **FTCALC**.

9 шаг. Задание кривой усталости в табличном виде. Задается таблица в первом столбце которой вводятся долговечности, а во втором соответствующие им уровни амплитуд напряжений¹¹. Для данной цели служит команда **FP**. Путь через систему меню и подменю для выполнения тех же действий следующий:

Main Menu > General Postproc > Fatigue>Property Table> S-N Table.

¹⁰ Вычисленные значения выводятся в файл, который открывается в отдельном окне и может быть в дальнейшем сохранен.

¹¹ Точки кривой усталости должны вводиться в порядке возрастания долговечности.



Рис. 17.

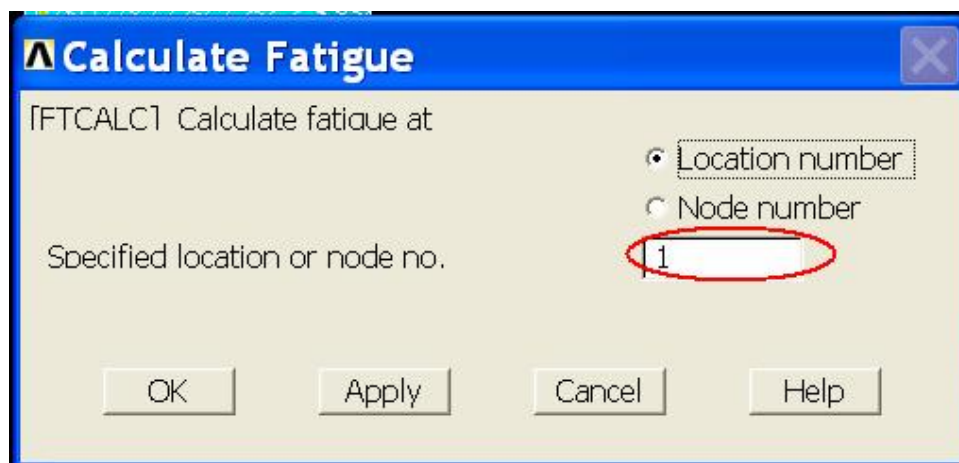


Рис. 18.

На рис.19 представлен вид главного меню при вызове рассматриваемой команды. На рис. 20 представлена форма, появляющаяся при вызове команды **FP**.



Рис. 19.

10 шаг. Вычисление повреждений, накопленных за каждое из событий и суммарного повреждения, для заданной точки. Для данной цели служит команда **FTCALC**. Путь через систему меню и подменю для выполнения тех же действий следующий:

Main Menu > General Postproc > Fatigue> Calculate Fatig.

Действия необходимые при осуществлении шагов 8 и 10 совпадают. Отличие в результатах объясняется тем, что в модуле **Fatigue** при отсутствии сведений о кривой усталости (случай шага 8) производится только расчет амплитуд эквивалентных напряжений.

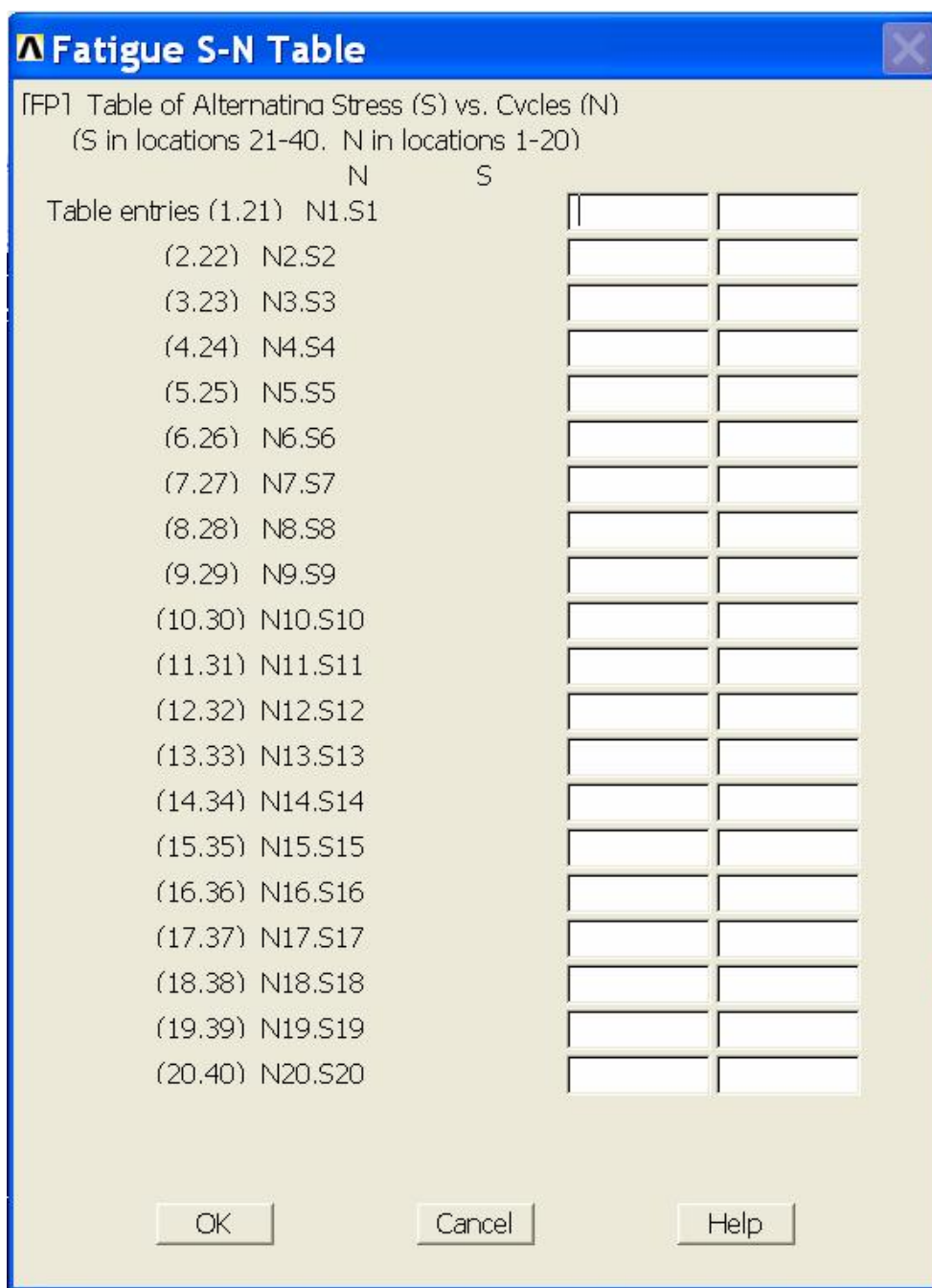


Рис. 20.

В завершении данного подпункта небольшая ремарка о способе задания напряжений с применением команды чтения из файла. При использовании команды **FSNODE** часто поступают следующим образом: производят несколько статических расчетов одной и той же конструкции при различных нагрузках, или в терминологии ANSYS совершают

несколько шагов по нагрузке. Затем при вызове команды **FSNODE** каждый нагружение связывают с заданием шага по нагрузке.

Команда **SET** служит для задания номера шага нагружения (на рис. 22 красным эллипсом помечено поле, в котором задается номер шага нагружения). На рис. 21 представлен вид главного меню при вызове команды **SET**.

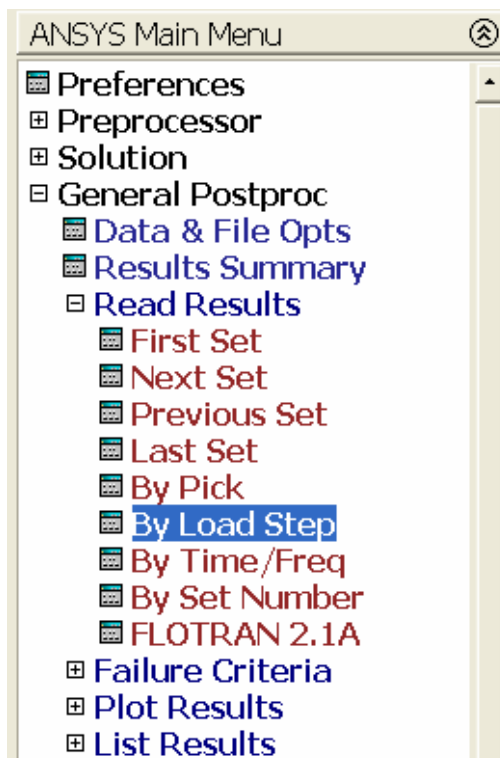


Рис. 21.

На рис. 22 представлена форма, появляющаяся при вызове команды **SET**.

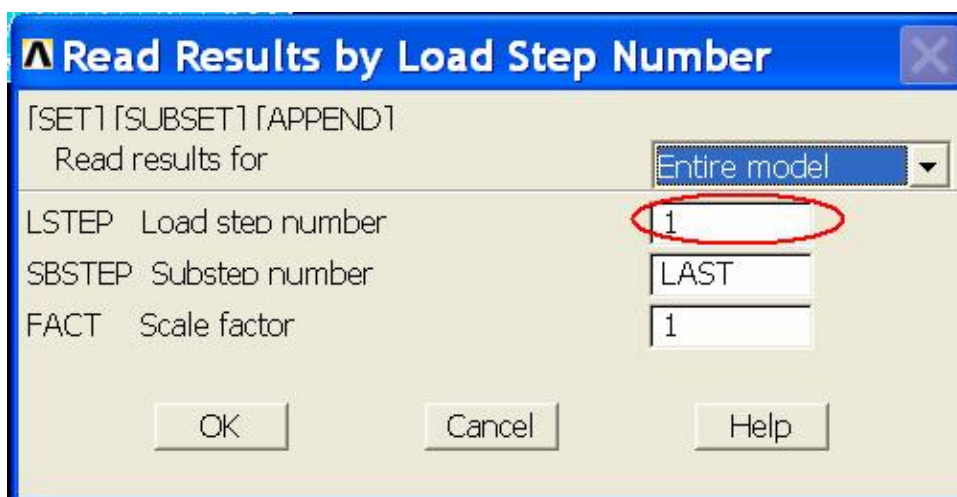


Рис. 22.

4.2. Примеры расчета усталостного повреждения.

Пример 1. Дан стальной стержень круглого поперечного сечения (рис. 23) площадью $A = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$. Один торец стержня закреплен. К другому концу стержня приложена осевая сила F , изменяющаяся во времени по синусоидальному закону $F = F_a \sin \omega t$ с амплитудой $F_a = 10 \text{ кН}$. Определить усталостное повреждение, накопленное в стержне в ходе десяти циклов нагружения. Диаграмма усталости представлена в табл. 2.

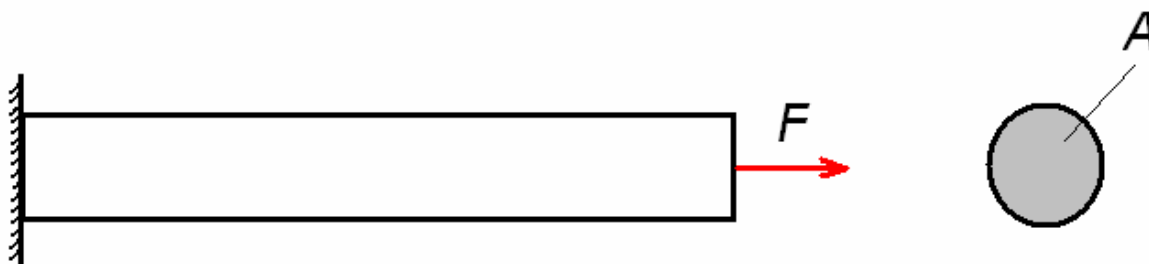


Рис. 23.

Таблица 2

N	100	1000	10000	100000	1000000	10000000
$\sigma_a, \text{ МПа}$	400	350	300	250	200	150

Решение. Для решения данной задачи будем использовать модуль **Fatigue** системы ANSYS. При нахождении распределения напряжений в данной задаче можно было бы использовать стержневые конечные элементы (тип Link), но результаты подобного анализа не могут быть использованы в рассматриваемом модуле. Поэтому историю нагружения будем вводить вручную.

Определим историю нагружения. Напряженное состояние соответствует одноосному растяжению-сжатию. Нормальное напряжение в поперечных сечениях стержня изменяется по закону $\sigma = \sigma_a \sin \omega t$, где $\sigma_a = 200 \text{ МПа}$.

Проведем расчет оценки степени поврежденности, сохраняя порядок и номера шагов из пункта 4.1.

1-ый шаг. Так как нагружение является регулярным, и любое сечение стержня является равноопасным, то может быть использована размерность задачи по умолчанию. Тогда соответствующая команда имеет вид

FTSIZE,5,10,3,

2-ой шаг. Из замечаний, приведенных выше, следует, что процесс накопления повреждений можно рассмотреть в одной точке. Остальные точки будут равноопасны. Соответствующая команда имеет вид

FL, ,1,,,,

Параметры данной команды следующие: «1» – номер узла¹², дальнейшее перечисление запятых в команде показывает, что коэффициенты концентрации напряжений по каждой из осей равны единице¹³.

3-ий шаг. Так как нагружение является регулярным, то для описания истории нагружения достаточно одного события. Цикл нагружения в общем случае может быть охарактеризован максимальным и минимальным значением напряжения в цикле. В модуле **Fatigue**, если событие только одно, то для его описания нужно три нагружения. Поэтому к двум указанным выше значениям напряжения цикла добавим еще одно – среднее значение напряжения в цикле. Для нашей задачи три указанные величины равны соответственно: 200 МПа, 200 МПа, 0 МПа. В результате ввода истории нагружения был получен следующий набор команд

FS,1,1,1,1,0,,,,,

FS,1,1,2,1,200e6,,,,,

FS,1,1,3,1,-200000000,,,,,

¹² В случае нашей задачи фиктивная величина, введенная для возможности решения.

¹³ Концентрация напряжений отсутствует.

Опишем подробнее параметры рассматриваемой команды **FS**. Первый параметр – номер узла или точки (в нашем случае это 1 (см. шаг 2)). Второй параметр номер события (в нашем случае событие одно). Третий параметр номер нагружения в событии (в нашем случае как отмечено выше три нагружения). Четвертый параметр – тип напряженного состояния¹⁴. Последующие шесть параметров описывают напряженное состояние в данном нагружении (в нашем случае не нулевой была только одна компонента напряженного состояния¹⁵).

6 шаг. Команда вывода всех компонент напряженного состояния для всех точек и всех событий имеет вид

FSLIST,ALL,,,ALL,ALL,

Приведем результаты действия команды:

LIST FATIGUE STRESSES FOR LOCATIONS 1 TO 5 IN STEPS OF 1

EVENTS 1 TO 10 - LOADS 1 TO 3

*** POST1 FATIGUE STRESSES ***

LOCATION 1 NODE 1

EVENT 1

(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7) LOCATION 1 EVENT 1 LOAD 1

SX,SY,SZ 0.0000 0.0000 0.0000

SXY,SYZ,SXZ,TEMP 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7) LOCATION 1 EVENT 1 LOAD 2

SX,SY,SZ 0.20000E+09 0.0000 0.0000

SXY,SYZ,SXZ,TEMP 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7) LOCATION 1 EVENT 1 LOAD 3

SX,SY,SZ -0.20000E+09 0.0000 0.0000

¹⁴ Данный параметр имеет следующие значения: 1 – трехмерное напряженное состояние (массивное тело), 8 – пластины, оболочки, мембраны, 7 – температурное воздействие.

¹⁵ Напряжения заданы в Па.

SXY,SYZ,SXZ,TEMP 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

7 шаг. По условию задачи надо оценить поврежденность после десяти циклов нагружения. Поэтому число повторений события равно 10. Соответствующая команда имеет вид

FE,1,10,1,

Первый параметр – номер события, второй параметр – число повторений события, третий параметр – масштабный фактор для данного события

8 шаг. Команда запуска процедуры расчета в модуле **Fatigue** в данном случае имеет вид

FTCALC,1

Параметр – номер узла или точки. Результаты работы данного модуля, содержащие все амплитуды эквивалентных напряжений за историю нагружения, выглядят следующим образом:

PERFORM FATIGUE CALCULATION AT LOCATION 1 NODE 0

*** POST1 FATIGUE CALCULATION ***

LOCATION 1 NODE 1

*** NOTE *** CP= 3.500 TIME= 11:21:46

No N values defined. Fatigue evaluation will not include usage factors.

EVENT/LOADS 1 2 AND 1 3

PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.20000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 1 1 AND 1 2

PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.10000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 1 1 AND 1 3

PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.10000E+09 WITH TEMP = 0.0000

9 шаг. Задание кривой усталости, данные для которой были взяты из табл. 1, было осуществлено следующим набором команд

FP,1,100,1000,10000,100000,1000000,10000000

FP,21,400e6,350e6,300e6,250e6,200e6,150e6

Данные об усталостных свойствах в модуле **Fatigue** хранятся в виде одномерного массива, поэтому первый параметр в команде («1», «21») указывает на номер элемента массива, с которого начинается рассматриваемая характеристика и соответственно указывается на тип характеристики (1 – число циклов, 21 – амплитуда напряжения)¹⁶.

10 шаг. Команда та же, что и на 8-м шаге. Приведем результаты вычислений:

PERFORM FATIGUE CALCULATION AT LOCATION 1 NODE 0

*** POST1 FATIGUE CALCULATION ***

LOCATION 1 NODE 1

EVENT/LOADS 1 2 AND 1 3

PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.20000E+09 WITH TEMP = 0.0000

CYCLES USED/ALLOWED = 10.00/ 0.1000E+07 = PARTIAL USAGE = 0.00001

¹⁶ Первые двадцать элементов отданы под значения чисел циклов, элементы с 21 по 40 – под соответствующие значения амплитуд напряжений.

CUMULATIVE FATIGUE USAGE = 0.00001

В данном случае программа определила, что история нагружения состоит из одного цикла нагружения с амплитудой $\sigma_a = 200$ МПа (что и было задано), и вычислила накопленное повреждение за 10 циклов нагружения по формуле (22).

Пример 2. Рассматривается шарнирноопертая стальная балка (рис. 24) квадратного поперечного сечения (сторона квадрата $h=0,1$ м, длина балки $l=1$ м). По верхней плоскости балки задано давление, изменяющееся во времени по синусоидальному закону $p = p_a \sin \omega t$, где $p_a = 2,93$ МПа. Диаграмма усталости для материала балки при растяжении-сжатии представлена в табличном виде (табл. 3), а диаграмма усталости при изгибе представлена в табличном виде в табл. 2.

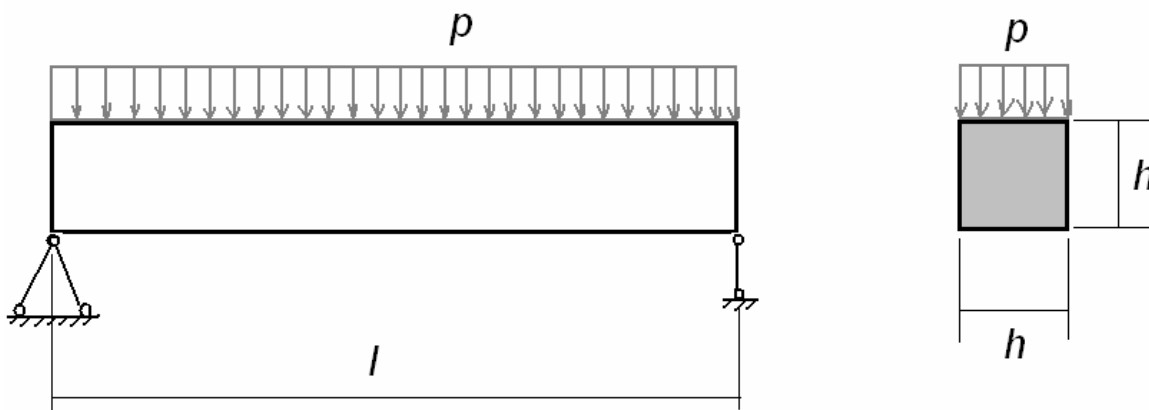


Рис. 24.

Таблица 3

N	100	1000	10000	100000	1000000	10000000
σ_a , МПа	370	310	280	220	170	110

Оценить максимальное повреждение, возникающее в балке после 100 циклов нагружения.

Решение. При нахождении распределения напряжений в данной задаче используем трехмерные конечные элементы (тип Solid). Поэтому историю нагружения будем брать из файла результатов.

На рис. 25 представлена конечно-элементная сетка для данной конструкции.

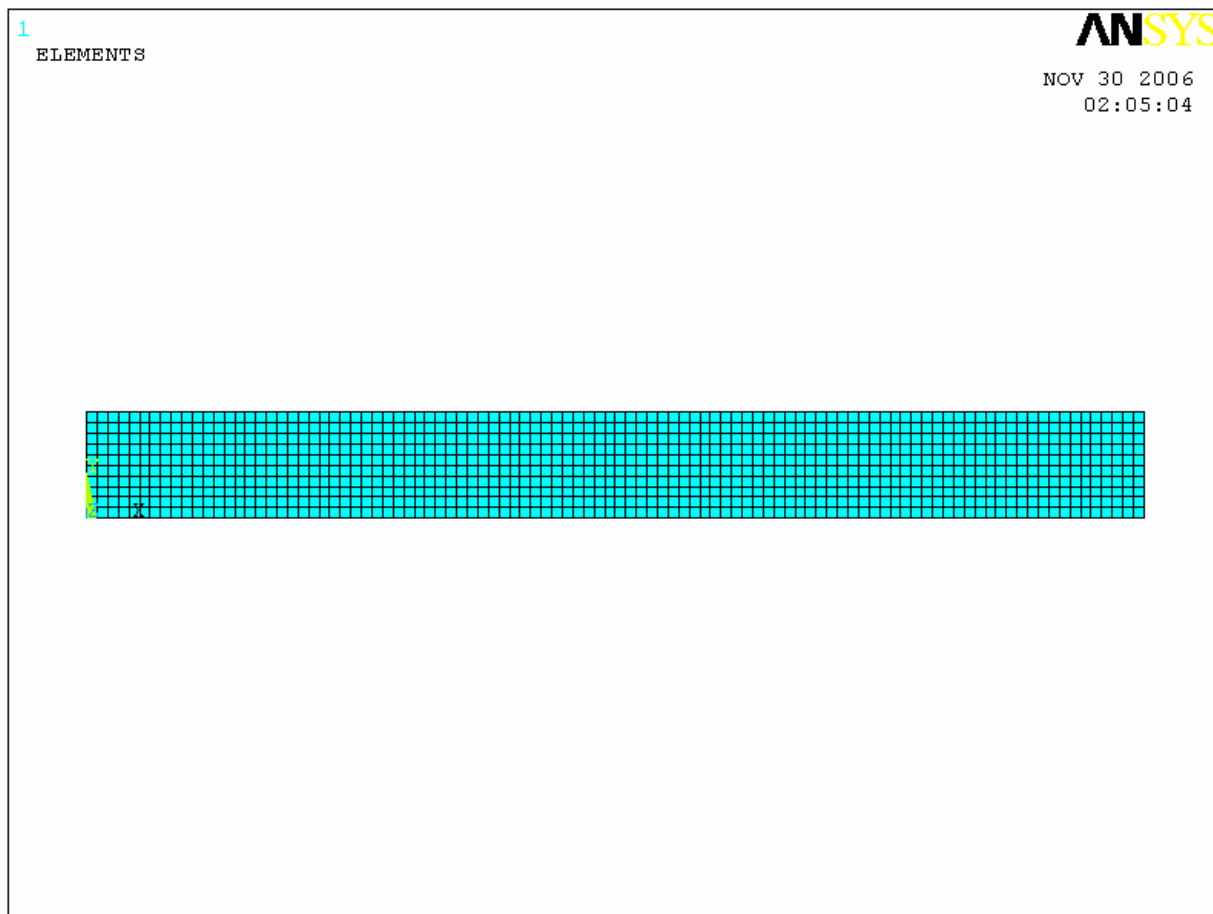


Рис. 25.

Результаты статического расчета данной конструкции при результирующей нагрузке равной $F_a = 20$ кН в виде распределения нормальных напряжений σ_{xx} приведены на рис. 26.

Напряженное состояние соответствует изгибу, поэтому будем использовать данные о сопротивлении материала балки усталости, приведенные в таблице 2.

Проведем расчет оценки степени поврежденности, сохраняя порядок и номера шагов из пункта 4.1.

1 шаг. Так как нагружение является регулярным, и для данной конструкции имеются две равноопасные точки (крайнее верхнее и крайнее нижнее волокно в нормальном

сечении, расположенном по середине балки выделено фиолетовым цветом на рис. 26) и из этих двух точек достаточно рассмотреть одну, то может быть использована размерность задачи по умолчанию. Тогда соответствующая команда имеет вид

FTSIZE,5,10,3,

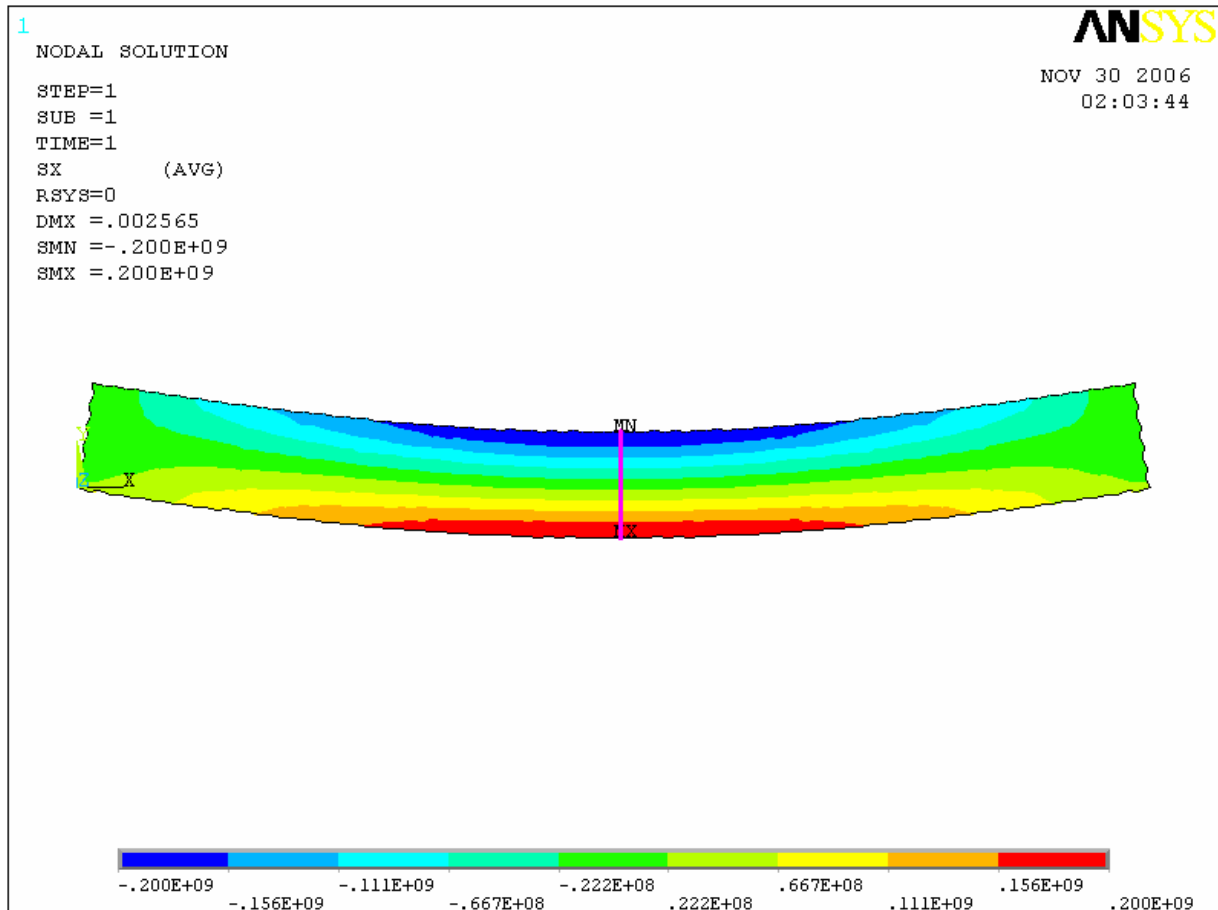


Рис. 26.

2 шаг. Из замечаний, приведенных выше, следует, что процесс накопления повреждений можно рассмотреть в одной точке. Эта точка соответствует половине длины балки крайнему нижнему волокну в нормальном сечении. Соответствующая команда имеет вид

FL,1,171,,,

Параметры данной команды следующие: «1» – номер точки, «171» – номер узла в конечно-элементной модели соответствующий данной точке.

4 шаг. Так как нагружение является регулярным, то для описания истории нагружения достаточно одного события. Цикл нагружения в общем случае может быть охарактеризован максимальным и минимальным значением напряжения в цикле. Но в случае модуля **Fatigue**, если событие только одно, то для его описания три нагружения. Поэтому к двум указанным выше значениям напряжения цикла добавим еще одно – среднее значение напряжения в цикле. Для получения каждого из трех нагружений были решены три статические задачи, в которых внешнее давление принимало максимальное, минимальное и среднее значение в цикле. Все три решения были записаны в один файл результатов. Набор команд, позволяющий получить историю нагружения в данном случае, имеет вид

SET,1,LAST,1,

FSNODE,171,1,1,

SET,2,LAST,1,

FSNODE,171,1,2,

SET,3,LAST,1,

FSNODE,171,1,3,

Команда **SET** служит для задания номера шага нагружения (первый параметр данной команды), чтобы результаты данного шага нагружения могли быть извлечены из файла результатов.

В команде **FSNODE** первый параметр – номер узла, для которого извлекаются данные; второй параметр – номер события; третий параметр – номер нагружения.

6 шаг. Команда вывода всех компонент напряженного состояния для всех точек и всех событий имеет вид

FSLIST,ALL,,ALL,ALL,

Приведем результаты действия команды:

LIST FATIGUE STRESSES FOR LOCATIONS 1 TO 5 IN STEPS OF 1
EVENTS 1 TO 10 - LOADS 1 TO 3

*** POST1 FATIGUE STRESSES ***

LOCATION 1 NODE 171

EVENT 1

(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7) LOCATION 1 EVENT 1 LOAD 1
SX,SY,SZ 0.20000E+09 0.11097E+06 0.0000
SXY,SYZ,SXZ,TEMP 0.90206E-04 0.0000 0.0000 0.0000

(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7) LOCATION 1 EVENT 1 LOAD 2
SX,SY,SZ -0.20000E+09 -0.11097E+06 0.0000
SXY,SYZ,SXZ,TEMP -0.90206E-04 0.0000 0.0000 0.0000

(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7) LOCATION 1 EVENT 1 LOAD 3
SX,SY,SZ 0.68269E-04 0.37878E-07 0.0000
SXY,SYZ,SXZ,TEMP 0.29613E-16 0.0000 0.0000 0.0000

7 шаг. По условию задачи надо оценить поврежденность после ста циклов нагружения. Поэтому число повторений события равно 100. Соответствующая команда имеет вид

FE,1,100,1,

8 шаг. Команда запуска процедуры расчета в модуле **Fatigue** в данном случае имеет вид

FTCALC, ,171

Первый параметр пропущен, так как он задается, если расчет ведется для точки, а не для узла.

Второй параметр появляется, только если расчет ведется для узлов и определяет номер узла (в данном случае 171). Результаты работы данного модуля, содержащие все амплитуды эквивалентных напряжений за историю нагружения, выглядят следующим образом:

```
PERFORM FATIGUE CALCULATION AT LOCATION 0 NODE 171
```

```
*** POST1 FATIGUE CALCULATION ***
```

```
LOCATION 1 NODE 171
```

```
*** NOTE *** CP = 34.594 TIME= 22:02:17
```

```
No N values defined. Fatigue evaluation will not include usage  
factors.
```

```
EVENT/LOADS 1 1 AND 1 2
```

```
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.20000E+09 WITH TEMP = 0.0000
```

```
EVENT/LOADS 1 2 AND 1 3
```

```
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.10000E+09 WITH TEMP = 0.0000
```

```
EVENT/LOADS 1 1 AND 1 3
```

```
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.10000E+09 WITH TEMP = 0.0000
```

9 шаг. Задание кривой усталости, данные для которой были взяты из таблицы 2, было осуществлено следующим набором команд

```
FP,1,100,1000,10000,100000,1000000,10000000
```


FP,21,400e6,350e6,300e6,250e6,200e6,150e6

10 шаг. Команда та же, что и на 8 шаге. Приведем результаты вычислений:

PERFORM FATIGUE CALCULATION AT LOCATION 0 NODE 171

*** POST1 FATIGUE CALCULATION ***

LOCATION 1 NODE 171

EVENT/LOADS 1 1 AND 1 2

PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.20000E+09 WITH TEMP = 0.0000

CYCLES USED/ALLOWED = 100.0 / 0.9999E+06 = PARTIAL USAGE = 0.00010

CUMULATIVE FATIGUE USAGE = 0.00010

С учетом найденного значения повреждения, накопленного за 100 циклов нагружения, найдем число циклов до разрушения изучаемого элемента конструкции. Найденное повреждение равнялось 0,0001 (см. результаты 10-го шага), тогда по формуле (25) число блоков данной длины составит 10000. С учетом того, что в блоке 100 циклов число циклов до разрушения будет равняться 1000000. Так как в данном случае нагружение было регулярным, то можно оценить точность вычислений. Согласно результатам 8-го шага амплитуда эквивалентного цикла нагружения равняется 200 МПа. С учетом данных табл. 2 полученная долговечность является правильной.

Пример 3. Дан стальной стержень круглого поперечного сечения, закрепленный одним концом (рис. 27). К другому концу элемента конструкции приложена осевая сила F , изменяющаяся во времени нерегулярным образом. Кривая усталости стали, из которой изготовлен стержень, задана в табличном виде (табл. 2). По результатам оценки процесса нагружения было получено, что для нормальных напряжений, возникающих в поперечных сечениях стержня, закон изменения во времени является блочным. В каждом блоке можно выделить пять наборов максимальных и минимальных значений напряжений, которые приведены в табл. 4. Известно среднее по всему процессу нагружения число появлений

этих наборов в каждом блоке (также приведено в табл. 4). Данные наборы в блоке могут быть перемешаны хаотично.

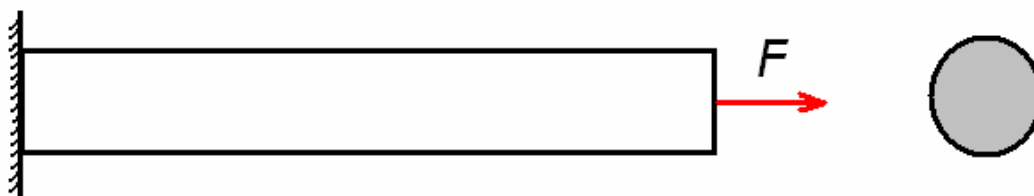


Рис. 27.

Таблица 2

Номер набора	1	2	3	4	5
σ_{max} , МПа	200	600	400	100	100
σ_{min} , МПа	-200	100	-100	-400	-200
Число повторений набора	10	1000	100	300	20

Оценить величину усталостного повреждения, возникающего за блок нагружения.

Решение. Перед началом решения необходимо сделать ремарку. При описании истории нагружения базовым является предположение о том, что наборы в блоке перемешаны хаотически, так как если бы данного предположения не было бы, то наборы бы шли последовательно, и используемая в модуле **Fatigue** процедура схематизации процесса нагружения привела бы к ошибке¹⁷. В данном случае следовало бы каждый набор рассмотреть с использованием указанного модуля самостоятельно и затем полученные повреждения суммировать вручную.

Каждый набор рассмотрим как отдельное событие. Так как событий больше одного, то событие можно составить только из двух нагружений.

Напряженное состояние является одноосным растяжением.

¹⁷ Подробнее данный вопрос будет разобран при анализе результатов оценки суммарного усталостного повреждения за блок нагружения.

Проведем расчет оценки степени поврежденности, сохраняя порядок и номера шагов из пункта 4.1.

1 шаг.

FTSIZE,5,10,3,

2 шаг. Из замечаний приведенных выше следует, что процесс накопления повреждений можно рассмотреть в одной точке. Остальные точки будут равноопасны. Соответствующая команда имеет вид

FL, ,1,,,

3 шаг.

FS,1,1,1,1,-200e6,,,,,

FS,1,1,2,1,200000000,,,,,

FS,1,2,1,1,100000000,,,,,

FS,1,2,2,1,600000000,,,,,

FS,1,3,1,1,400000000,,,,,

FS,1,3,2,1,-100000000,,,,,

FS,1,4,1,1,100000000,,,,,

FS,1,4,2,1,-400000000,,,,,

FS,1,5,1,1,100000000,,,,,

FS,1,5,2,1,-200000000,,,,,

6 шаг. Команда вывода всех компонент напряженного состояния для всех точек и всех событий имеет вид

FSLIST,ALL,,,ALL,ALL,

Результаты действия команды выглядят следующим образом:

LIST FATIGUE STRESSES FOR LOCATIONS 1 TO 5 IN STEPS OF 1
EVENTS 1 TO 10 - LOADS 1 TO 3

*** POST1 FATIGUE STRESSES ***

LOCATION 1 NODE 1

EVENT 1

(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7)	LOCATION 1	EVENT 1	LOAD 1
SX,SY,SZ	-0.20000E+09	0.0000	0.0000
SXY,SYZ, SXZ,TEMP	0.0000	0.0000	0.0000

(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7)	LOCATION 1	EVENT 1	LOAD 2
SX,SY,SZ	0.20000E+09	0.0000	0.0000
SXY,SYZ, SXZ,TEMP	0.0000	0.0000	0.0000

EVENT 2

(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7)	LOCATION 1	EVENT 2	LOAD 1
SX,SY,SZ	0.10000E+09	0.0000	0.0000
SXY,SYZ, SXZ,TEMP	0.0000	0.0000	0.0000

(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7)	LOCATION	1	EVENT	2	LOAD	2
SX,SY,SZ	0.60000E+09	0.0000	0.0000			
SXY,SYZ,SXZ,TEMP	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		

EVENT 3

(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7)	LOCATION	1	EVENT	3	LOAD	1
SX,SY,SZ	0.40000E+09	0.0000	0.0000			
SXY,SYZ,SXZ,TEMP	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		

(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7)	LOCATION	1	EVENT	3	LOAD	2
SX,SY,SZ	-0.10000E+09	0.0000	0.0000			
SXY,SYZ,SXZ,TEMP	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		

EVENT 4

(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7)	LOCATION	1	EVENT	4	LOAD	1
SX,SY,SZ	0.10000E+09	0.0000	0.0000			
SXY,SYZ,SXZ,TEMP	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		

(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7)	LOCATION	1	EVENT	4	LOAD	2
SX,SY,SZ	-0.40000E+09	0.0000	0.0000			
SXY,SYZ,SXZ,TEMP	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		

EVENT 5

(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7)	LOCATION	1	EVENT	5	LOAD	1
SX,SY,SZ	0.10000E+09	0.0000	0.0000			
SXY,SYZ,SXZ,TEMP	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		

(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7)	LOCATION	1	EVENT	5	LOAD	2
SX,SY,SZ	-0.20000E+09	0.0000	0.0000			

SXY,SYZ,SXZ,TEMP 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

7 шаг. По условию задачи надо оценить поврежденность за блок нагружения. Число повторений каждого набора, а следовательно и соответствующих им событий приведено в табл. 4. Набор команд, устанавливающий свойства каждого события, имеет вид

FE,1,10,1,

FE,2,1000,1,

FE,3,100,1,

FE,4,300,1,

FE,5,20,1,

8 шаг. Команда запуска процедуры расчета в модуле **Fatigue** в данном случае имеет вид

FTCALC,1

Приведем результаты работы данного модуля, содержащие все амплитуды эквивалентных напряжений за историю нагружения:

PERFORM FATIGUE CALCULATION AT LOCATION 1 NODE 0

*** POST1 FATIGUE CALCULATION ***

LOCATION 1 NODE 1

*** NOTE *** CP = 10.250 TIME= 02:44:00

No N values defined. Fatigue evaluation will not include usage factors.

EVENT/LOADS 2 2 AND 4 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.50000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 1 1 AND 2 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.40000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 2 2 AND 5 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.40000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 3 1 AND 4 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.40000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 2 2 AND 3 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.35000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 1 1 AND 3 1
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.30000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 1 2 AND 4 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.30000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 3 1 AND 5 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.30000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 3 1 AND 3 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.25000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 2 2 AND 5 1
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.25000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 4 1 AND 4 2

PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.25000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 2 1 AND 4 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.25000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 2 1 AND 2 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.25000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 4 2 AND 5 1
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.25000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 2 2 AND 4 1
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.25000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 1 1 AND 1 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.20000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 1 2 AND 2 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.20000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 1 2 AND 5 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.20000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 1 1 AND 5 1
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.15000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 3 1 AND 5 1
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.15000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 5 1 AND 5 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.15000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 1 1 AND 2 1
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.15000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 4 1 AND 5 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.15000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 2 1 AND 5 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.15000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 3 2 AND 4 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.15000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 3 1 AND 4 1
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.15000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 1 1 AND 4 1
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.15000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 1 2 AND 3 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.15000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 2 1 AND 3 1
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.15000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 3 2 AND 5 1
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.10000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 1 2 AND 3 1
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.10000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 2 2 AND 3 1
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.10000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 4 2 AND 5 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.10000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 1 1 AND 4 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.10000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 3 2 AND 4 1
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.10000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 2 1 AND 3 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.10000E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 3 2 AND 5 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.50000E+08 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 1 2 AND 2 1
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.50000E+08 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 1 2 AND 4 1
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.50000E+08 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 1 1 AND 3 2
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.50000E+08 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 1 2 AND 5 1
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.50000E+08 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 4 1 AND 5 1
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.0000 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 2 1 AND 4 1

PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.0000 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 1 1 AND 5 2

PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.0000 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 2 1 AND 5 1

PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.0000 WITH TEMP = 0.0000

9 шаг. Задание кривой усталости, данные для которой были взяты из табл. 2, было осуществлено следующим набором команд

FP,1,100,1000,10000,100000,1000000,10000000

FP,21,400e6,350e6,300e6,250e6,200e6,150e6

10 шаг. Команда та же, что и на 8 шаге. Приведем результаты вычислений:

PERFORM FATIGUE CALCULATION AT LOCATION 1 NODE 0

*** POST1 FATIGUE CALCULATION ***

LOCATION 1 NODE 1

EVENT/LOADS 2 2 AND 4 2

PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.50000E+09 WITH TEMP = 0.0000

CYCLES USED/ALLOWED = 300.0 / 100.0 = PARTIAL USAGE = 3.00000

EVENT/LOADS 1 1 AND 2 2

PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.40000E+09 WITH TEMP = 0.0000

CYCLES USED/ALLOWED = 10.00 / 100.0 = PARTIAL USAGE = 0.10000

EVENT/LOADS 2 2 AND 5 2

PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.40000E+09 WITH TEMP = 0.0000
CYCLES USED/ALLOWED = 20.00 / 100.0 = PARTIAL USAGE = 0.20000

EVENT/LOADS 2 2 AND 3 2

PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.35000E+09 WITH TEMP = 0.0000
CYCLES USED/ALLOWED = 100.0 / 1000. = PARTIAL USAGE = 0.10000

EVENT/LOADS 2 1 AND 2 2

PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.25000E+09 WITH TEMP = 0.0000
CYCLES USED/ALLOWED = 570.0 / 0.1000E+06 = PARTIAL USAGE = 0.00570

CUMULATIVE FATIGUE USAGE = 3.40570

Согласно полученным данным, появился цикл с амплитудой 500 МПа, то есть в данном случае рассмотрено смещение минимального значения из четвертого набора и максимального значения из второго набора. Цикл с данной амплитудой повторяется 300 раз. Если же, как было указано выше, наборы в блоке шли последовательно, то такой цикл должен был бы появиться только один раз. Указанный цикл нагружения внес максимальный вклад в накопление повреждений. Повреждение, возникшее вследствие данной амплитуды, в три раза превысило значение, соответствующее критерию разрушения. Поэтому при описании истории нагружения перед ее подготовкой при работе в модуле **Fatigue** необходимо очень внимательно относиться к первоначальной подготовке данных, так как в противном случае может оказаться, что система оценит повреждение не от реальной, а от некоторой виртуальной системы нагружения.

Пример 4. Рассматривается деталь, изображенная на рис. 28. Константы, описывающие размеры данной детали, приведены в таблице 5. Деталь изготовлена из стали 38ХА с пределом прочности $\sigma_B = 1050$ МПа. Поверхность детали обработана путем тонкого точения. Деталь нагружена действием осевой силы, приложенной к каждому из боковых торцов и изменяющейся по синусоидальному закону $F = F_a \sin \omega t$ с амплитудой $F_a = 20$ кН. Кривая усталости, полученная для образцов из данной стали диаметром 5 мм в условиях консольного изгиба с вращением, приведена в табличном виде (таблице 6).

Оценить максимальное повреждение, возникающее в детали после 1000 циклов нагружения и число подобных блоков, которое может выдержать рассматриваемая деталь.

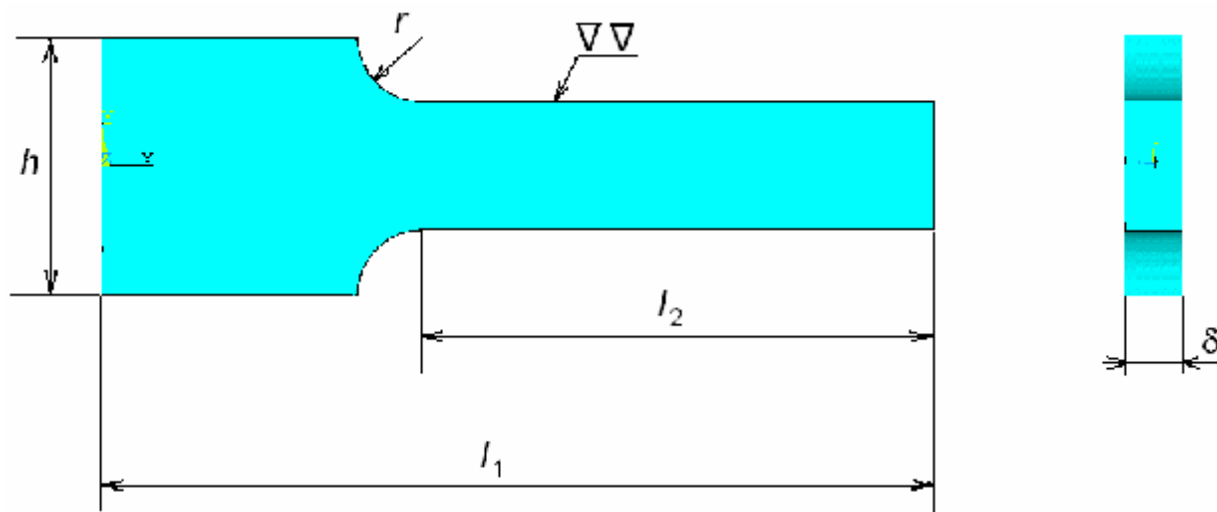


Рис. 28.

Таблица 5

l_1 , мм	l_2 , мм	r , мм	h , мм	δ , мм
65	40	5	20	4

Таблица 6

N	50000	100000	500000	1000000	5000000	10000000
σ_a , МПа	1000	950	900	850	800	500

Решение. При нахождении распределения напряжений в данной задаче используем трехмерные конечные элементы (тип Solid 185 с усеченным интегрированием). Поэтому историю нагружения будем брать из файла результатов.

Исходя из вида геометрии и вида внешней нагрузки, в элементе конструкции присутствуют две плоскости симметрии (X – Y и X – Z), поэтому при расчетах будем

рассматривать только одну четвертую часть конструкции, выделенную указанными выше плоскостями. На плоскостях рассматриваемого элемента, по которым было проведено сечение, зададим условия симметрии. Схема нагружения представлена на рис. 29.

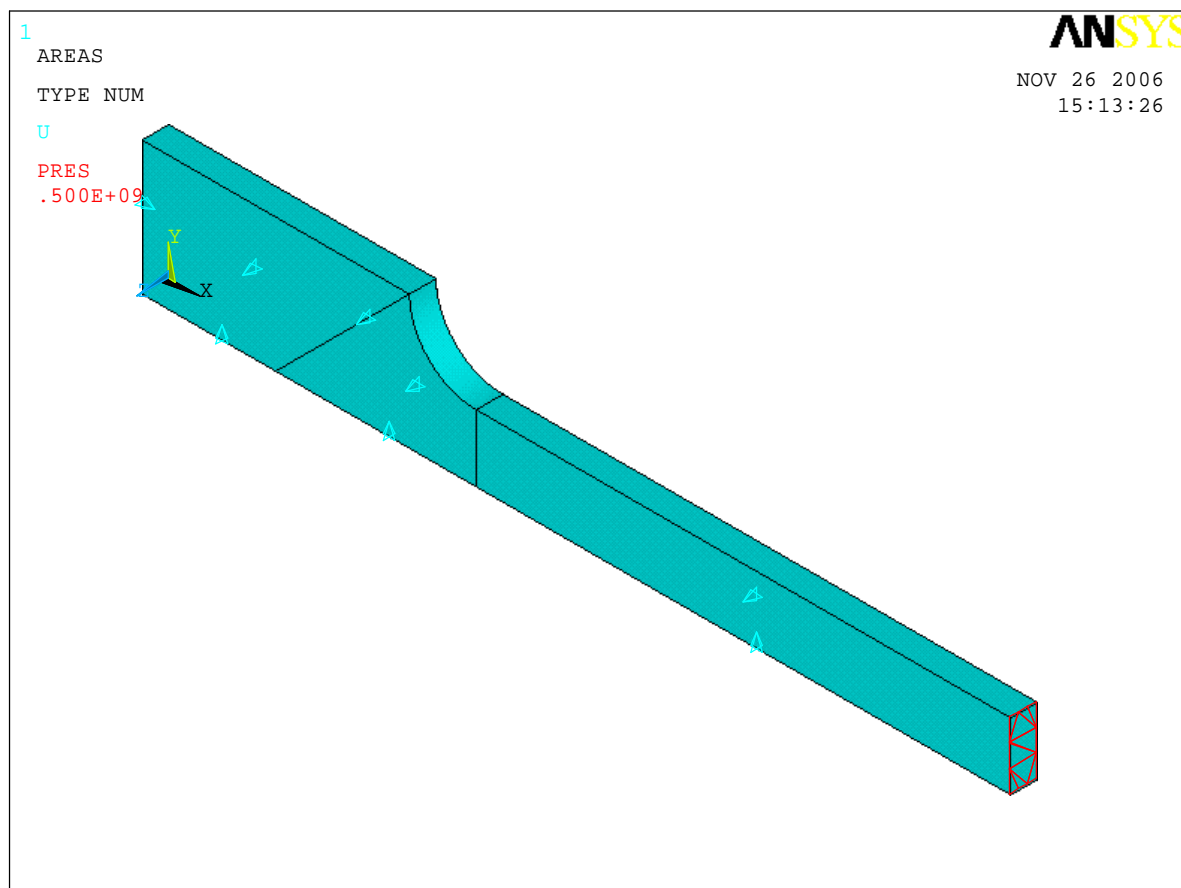


Рис. 29.

На рис. 30 представлена конечно-элементная сетка для данной конструкции.

Результаты статического расчета данной конструкции при результирующей нагрузке равной $F_a = 20$ кН приведены на рис. 31 и рис. 32. На данных рисунках представлено распределение нормальных напряжений σ_{xx} и эквивалентных напряжений, полученных по гипотезе Треска-Сен-Венана (1), соответственно.

На основании результатов, показанных на рис. 31, можно сделать вывод о том, что в области концентратора напряжений (область перехода от высоты образца 20 мм к высоте

образца 10 мм) максимальное нормальное напряжение равняется $\sigma_{\max} = 636$ МПа , а номинальное напряжение в той же области (согласно правилу Сен-Венана, примененному к рассматриваемой детали, равняется напряжению в указанном (на рис. 31 помечено красным) сечении) равняется $\sigma_{\text{НОМ}} = 500$ МПа .

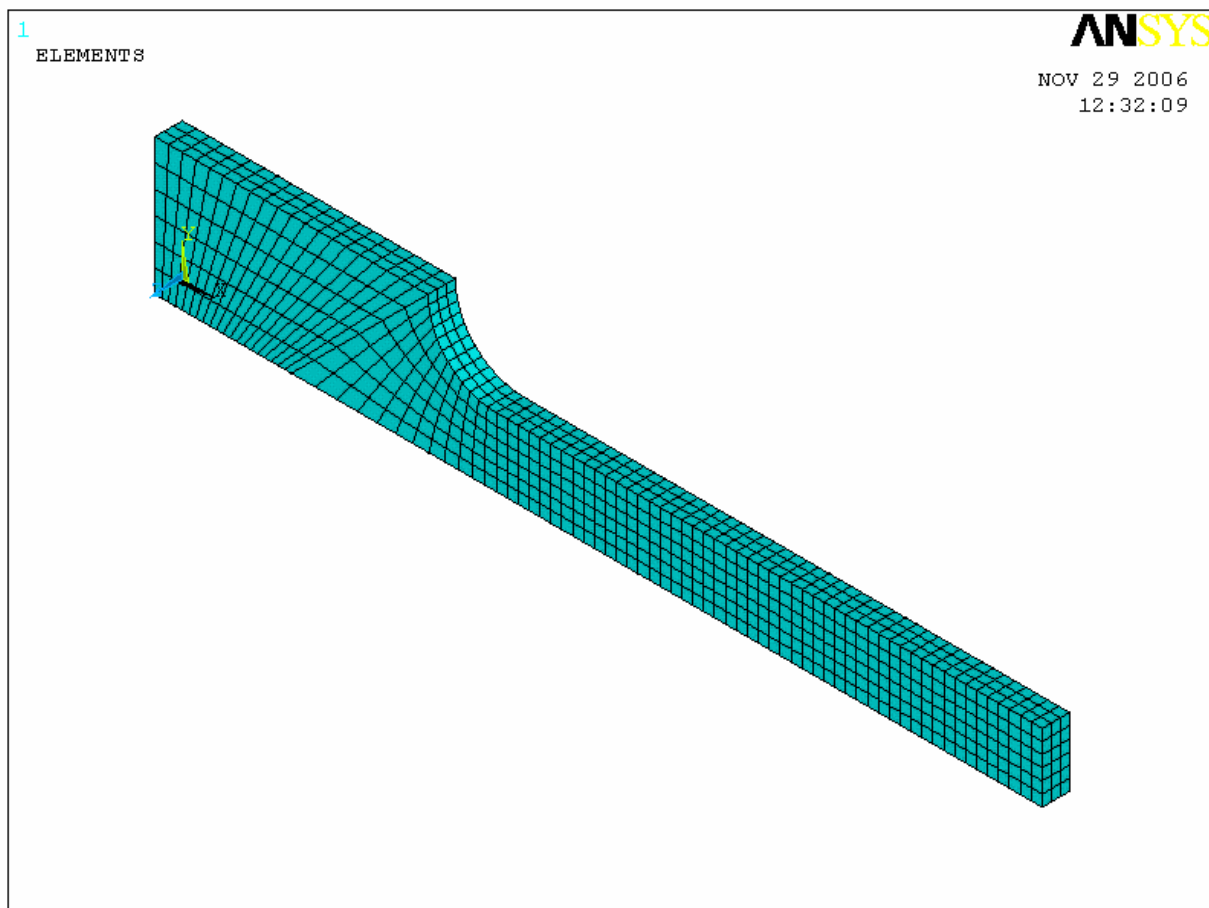


Рис. 30.

По определению теоретический коэффициент концентрации напряжений есть

$$\alpha_{\sigma} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{НОМ}}} . \quad (34)$$

С учетом известных нам значений максимального напряжения и номинального напряжения в случае изучаемой конструкции теоретический коэффициент концентрации напряжений равняется $\alpha_{\sigma} = 1,272$.

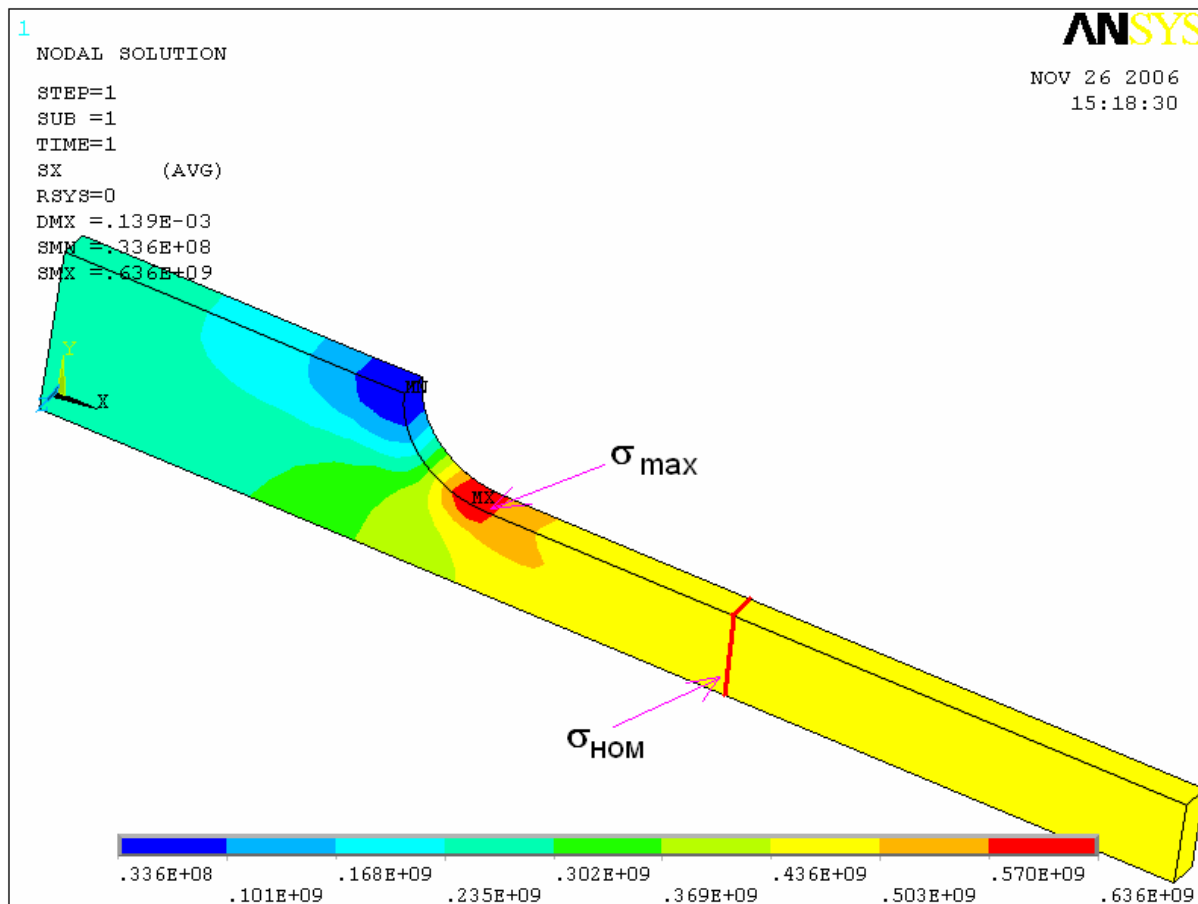


Рис. 31

Материал, из которого изготовлена деталь, сталь 38ХА относится к классу конструкционных легированных сталей. Тогда согласно, таблице 1 коэффициент чувствительности к концентрации напряжений равняется $q = 0,6$.

Тогда эффективный коэффициент концентрации напряжений в соответствии с формулой (19) равняется $K_{\sigma} = 1,163$.

Определим, какие еще факторы влияют на сопротивление многоциклового усталости в случае изучаемой детали, и вычислим соответствующие данным факторам коэффициенты пересчета, применяемые в формуле (18).

Указанная формула (18) позволяет учесть влияние на сопротивление усталости следующих факторов:

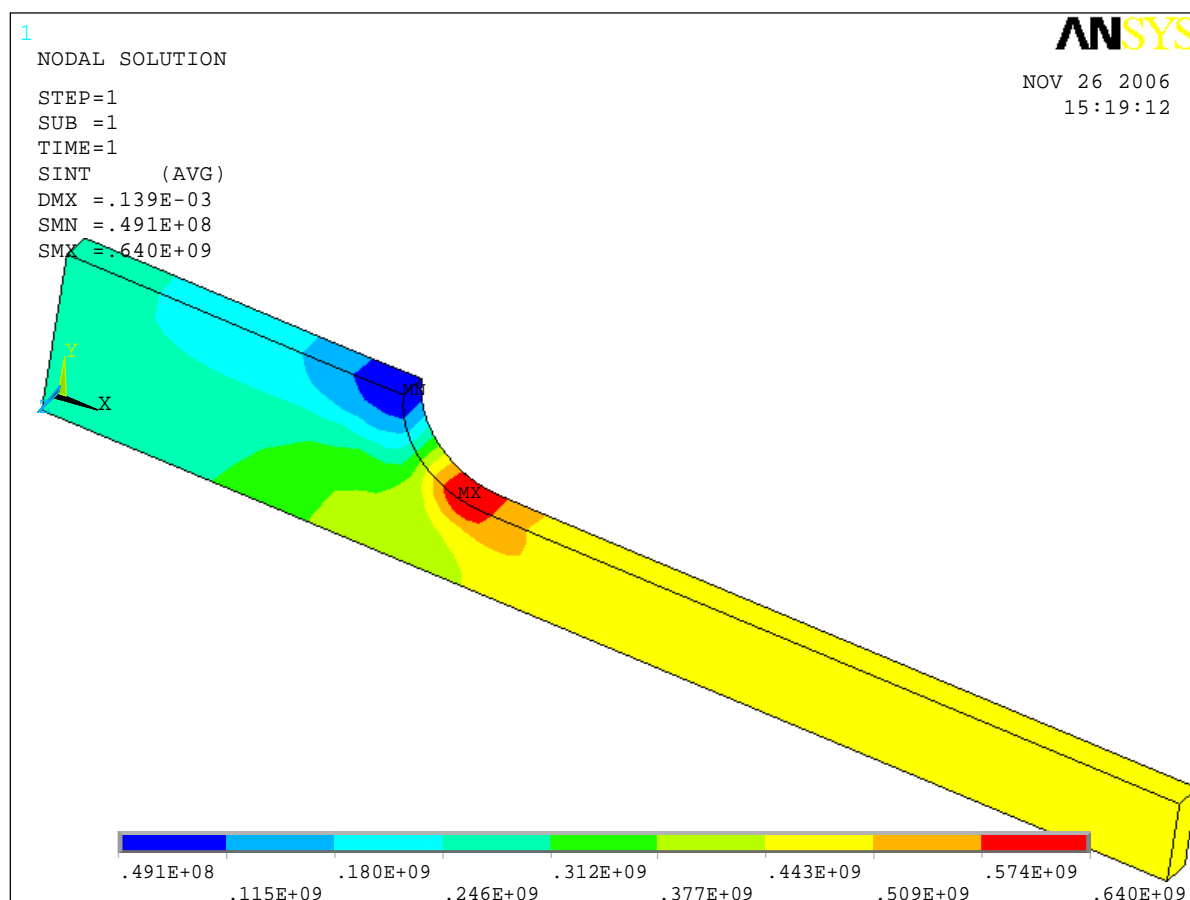


Рис.32

- концентрации напряжений,
- абсолютных размеров поперечного сечения,
- качество обработки поверхности,
- поверхностное упрочнение.

Влияние концентрации напряжений было рассмотрено выше. По условиям задачи поверхностное упрочнение отсутствует, но присутствует влияние качества обработки поверхности, так как в условии задачи указано, что поверхность детали обработана путем тонкого точения. И возможно наличие влияния размеров поперечного сечения (данный

фактор надо установить, сравнив площадь поперечного сечения в опасном сечении изделия с площадью стандартного образца).

Два последние фактора определяются с использованием номограмм. Продемонстрируем использование указанных объектов при нахождении коэффициентов пересчета. Иллюстрацию проведем на примере определения коэффициента влияния качества обработки поверхности K_F .

На рис. 33 приведена номограмма для определения коэффициента влияния качества обработки поверхности для углеродистых и легированных сталей [17]. На рисунке введены обозначения: линия 1 – обработка поверхности путем полирования, линия 2 – обработка поверхности путем шлифования, линия 3 – обработка поверхности путем тонкого точения, линия 4 – обработка поверхности путем грубого точения, линия 5 – наличие окалины на поверхности.

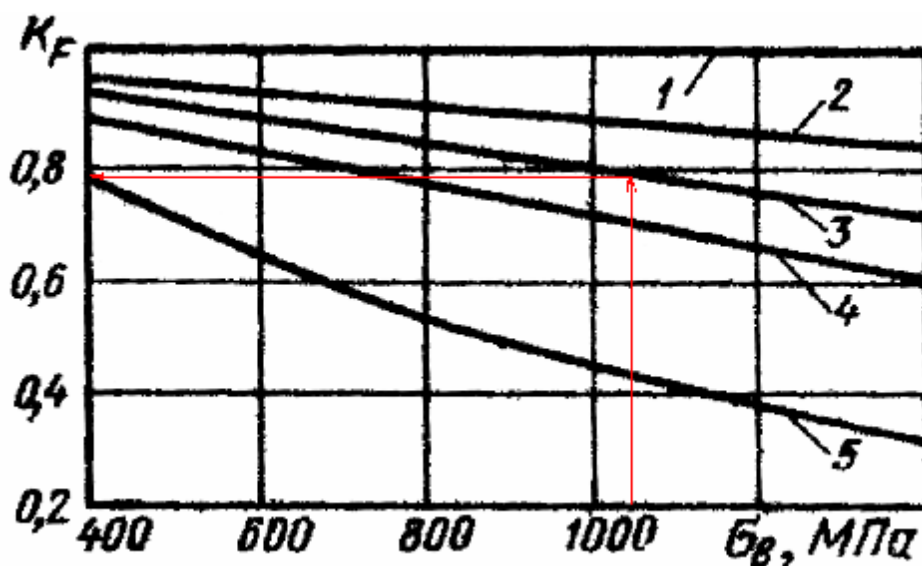


Рис. 33.

При использовании номограммы применяется следующая последовательность шагов:

- ищут на оси абсцисс значение, соответствующее изучаемому изделию;
- из этого значения восстанавливают перпендикуляр до пересечения с линией, соответствующей искомому свойству изучаемого изделия;
- из найденной точки пересечения проводят горизонтальную линию до пересечения с осью ординат;
- точка пересечения с осью ординат и будет искомым значением.

В нашем случае по оси абсцисс на номограмме отложено значение предела прочности материала изучаемой конструкции. Рассматриваемая сталь имеет предел прочности равный $\sigma_B = 1050$ МПа . Откладываем это значение на оси абсцисс. Поверхность детали обработана путем тонкого точения, поэтому восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с линией 3. Затем проводим горизонтальную линию и получаем значение коэффициента влияния качества обработки поверхности равное $K_F = 0,78$. Приведенная выше последовательность действий на рис. 33 отражена красными линиями.

Оценим влияние абсолютных размеров поперечного сечения на сопротивление усталости.

Поперечное сечение изучаемой детали имеет форму прямоугольника. Традиционно при построении номограмм, используемых для определения влияния абсолютных размеров поперечного сечения, применяются образцы круглого поперечного сечения и по оси абсцисс данных номограмм откладываются диаметры образцов. Поэтому получим диаметр эквивалентного поперечного сечения. Площадь поперечного сечения рассматриваемой детали в опасном сечении определяется по формуле

$$A = (h - 2r)\delta , \quad (35)$$

и равняется $A = 40 \text{ мм}^2$. Диаметр эквивалентного по площади образца круглого поперечного сечения будет определяться по формуле

$$d_{\text{ЭКВ}} = 2\sqrt{A} , \quad (36)$$

и равняется $d_{\text{ЭКВ}} = 7 \text{ мм}$. С использованием данного значения и, применяя номограмму, приведенную в [17] на странице 35, коэффициент влияния абсолютных размеров поперечного сечения равняется $K_d = 0,98$.

Тогда согласно формуле (18) коэффициент пересчета равен $K_D = 1/1,469$.

При применении подобного коэффициента пересчета в расчетах, согласно [17, 20], надо использовать номинальные значения напряжений. В случае рассматриваемой детали нахождение номинальных напряжений не составляет труда. Но при рассмотрении более

сложных деталей, тяготеющих по своей геометрии к массивным телам, и нагруженных в различных направлениях одновременно (в телах возникает трехмерное напряженное состояние) определение номинальных напряжений затруднительно и как, следствие, во-первых, затруднительно определение теоретического коэффициента концентрации напряжений, и, во-вторых, затруднительно проводить расчеты с использованием номинальных напряжений. Поэтому в рамках данного примера помимо расчета по номинальным напряжениям проведем также расчет по максимальным напряжениям и сравним полученные результаты. Согласно экспериментально-теоретическим работам [18, 20] расчет по максимальным напряжениям является консервативным – дает заниженные значения долговечности.

В случае расчета по максимальным напряжениям эффективный коэффициент концентрации напряжений равен $K_{\sigma} = 1$. Тогда коэффициент пересчета равен $K_D = 1/1,302$

Согласно данным, приведенным на рис. 31, 32, и с учетом формулы (16) напряженное состояние является растяжением.

Кривая усталости для данной стали (таблица 6) получена в результате экспериментов на консольный изгиб с вращением, поэтому для возможности ее применения при расчете анализируемого изделия надо с ее использованием получить кривую усталости в случае растяжения-сжатия.

С учетом коэффициента пересчета, приведенного в формуле (13), и данных, приведенных в таблице 7, искомая кривая Велера примет следующий табличный вид

Таблица 7

N	50000	100000	500000	1000000	5000000	10000000
σ_a , МПа	800	760	720	680	640	400

Проведем оценку максимального повреждение, возникающее в детали после 1000 циклов нагружения и числа подобных блоков, которое может выдержать рассматриваемая деталь сначала используя для вычислений максимальные напряжения без учета концентрации напряжений, а, затем, по номинальным напряжениям с учетом

концентрации напряжений. Расчет осуществим, сохраняя порядок и номера шагов из пункта 4.1.

Случай вычислений по максимальным напряжениям.

1 шаг. Согласно рис. 32 максимальное эквивалентное напряжение по гипотезе Треска-Сен-Венана достигается в одной точке конструкции, поэтому может быть использована размерность задачи по умолчанию. Тогда соответствующая команда имеет вид

FTSIZE,5,10,3,

2 шаг. Из замечаний, приведенных выше, следует, что процесс накопления повреждений можно рассмотреть в одной точке. Эта точка обозначена на рис. 31 и рис. 32 буквами **MX**. Соответствующая команда имеет вид

FL,1,701,1.302,,,

Параметры данной команды следующие: «1» – номер точки, «701» – номер узла в конечно-элементной модели соответствующий данной точке, «1.302» - значение коэффициента пересчета¹⁸.

4 шаг. Так как нагружение является регулярным, то для описания истории нагружения достаточно одного события. Цикл нагружения в общем случае может быть охарактеризован максимальным и минимальным значением напряжения в цикле. Но в случае модуля **Fatigue**, если событие только одно, то для его описания три нагружения. Поэтому к двум указанным выше значениям напряжения цикла добавим еще одно – среднее значение напряжения в цикле. Для получения каждого из трех нагружений были решены три статические задачи, в которых внешнее усилие принимало максимальное, минимальное и среднее значение в цикле. Все три решения были записаны в один файл результатов. Набор команд, позволяющий получить историю нагружения в данном случае, имеет вид

SET,1,LAST,1,

¹⁸ Коэффициент пересчета в данной команде равен $1/K_d$.

FSNODE,701,1,1,

SET,2,LAST,1,

FSNODE,701,1,2,

SET,3,LAST,1,

FSNODE,701,1,3,

Команда **SET** служит для задания номера шага нагружения (первый параметр данной команды), чтобы результаты данного шага нагружения могли быть извлечены из файла результатов.

В команде **FSNODE** первый параметр – номер узла, для которого извлекаются данные; второй параметр – номер события; третий параметр – номер нагружения.

6 шаг. Команда вывода всех компонент напряженного состояния для всех точек и всех событий имеет вид

FSLIST,ALL,,,ALL,ALL,

Приведем результаты действия команды:

```
LIST FATIGUE STRESSES FOR LOCATIONS 1 TO 5 IN STEPS OF 1
EVENTS 1 TO 10 - LOADS 1 TO 3
```

```
*** POST1 FATIGUE STRESSES ***
```

```
LOCATION 1 NODE 701
```

```
EVENT 1
```

```
(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7) LOCATION 1 EVENT 1 LOAD 1
SX,SY,SZ 0.63648E+09 0.47021E+08 0.11041E+08
```

SXY,SYZ,SXZ,TEMP -0.91146E+08 0.69225E+06 -0.15461E+07 0.0000

(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7) LOCATION 1 EVENT 1 LOAD 2

SX,SY,SZ -636.48 -47.021 -11.041

SXY,SYZ,SXZ,TEMP 91.146 -0.69225 1.5461 0.0000

(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7) LOCATION 1 EVENT 1 LOAD 3

SX,SY,SZ -0.63648E+09 -0.47021E+08 -0.11041E+08

SXY,SYZ,SXZ,TEMP 0.91146E+08 -0.69225E+06 0.15461E+07 0.0000

7 шаг. По условию задачи надо оценить поврежденность после ста циклов нагружения. Поэтому число повторений события равно 1000. Соответствующая команда имеет вид

FE,1,1000,1,

8 шаг. Команда запуска процедуры расчета в модуле **Fatigue** в данном случае имеет вид

FTCALC, ,701

Первый параметр пропущен, так как он задается, если расчет ведется для точки, а не для узла.

Второй параметр появляется, только если расчет ведется для узлов и определяет номер узла (в данном случае 701). Результаты работы данного модуля, содержащие все амплитуды эквивалентных напряжений за историю нагружения, выглядят следующим образом:

PERFORM FATIGUE CALCULATION AT LOCATION 1 NODE 0

*** POST1 FATIGUE CALCULATION ***

LOCATION 1 NODE 701

*** NOTE ***

CP = 16.625 TIME= 12:56:01

No N values defined. Fatigue evaluation will not include usage factors.

EVENT/LOADS 1 1

AND 1 3

PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.82816E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 1 1

AND 1 2

PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.41408E+09 WITH TEMP = 0.0000

EVENT/LOADS 1 2

AND 1 3

PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.41408E+09 WITH TEMP = 0.0000

9 шаг. Задание кривой усталости, данные для которой были взяты из таблицы 7, было осуществлено следующим набором команд

FP,1,5e4,1e5,5e5,1e6,5e6,1e7

FP,21,800e6,760e6,720e6,680e6,640e6,400e6

10 шаг. Команда та же, что и на 8 шаге. Приведем результаты вычислений:

PERFORM FATIGUE CALCULATION AT LOCATION 1 NODE 0

*** POST1 FATIGUE CALCULATION ***

LOCATION 1 NODE 701

EVENT/LOADS 1 1

AND 1 3

PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.82816E+09 WITH TEMP = 0.0000

CYCLES USED/ALLOWED = 1000. / 0.5000E+05 = PARTIAL USAGE = 0.02000

CUMULATIVE FATIGUE USAGE = 0.02000

С учетом найденного значения повреждения, накопленного за 1000 циклов нагружения, найдем число блоков такой же длины до разрушения изучаемого элемента конструкции. Найденное повреждение равнялось 0,02 (см. результаты 10-го шага), тогда по формуле (25) число блоков данной длины составит 50. учетом того, что в блоке 1000циклов число циклов до разрушения будет равняться 50000. При этом необходимо обратить внимание на то, что ANSYS в модуле Fatigue не экстраполирует кривую усталости: максимальный уровень амплитуды напряжения в табл. 7 равнялся 800 МПа, а при вычислениях амплитуда напряжений в изучаемой точке составила 828 МПа, но долговечность для этой амплитуды была взята равной долговечности для 800 МПа (50000 циклов нагружения).

Случай вычислений по номинальным напряжениям.

1 шаг. Согласно рис. 31 номинальное напряжение достигается в любой точке сечения обведенного красной линией. Выберем некоторую точку данного сечения. Тогда соответствующая команда имеет вид

FTSIZE,5,10,3,

2 шаг. Из замечаний, приведенных выше, следует, что процесс накопления повреждений можно рассмотреть в одной точке. Эта точка обозначена на рис. 31 как $\sigma_{\text{ном}}$. Соответствующая команда имеет вид

FL,2,1302,1.469,,,

Параметры данной команды следующие: «2» – номер точки, «1302» – номер узла в конечно-элементной модели соответствующий данной точке, «1.469» - значение коэффициента пересчета.

4 шаг. Так как нагружение является регулярным, то для описания истории нагружения достаточно одного события. Цикл нагружения в общем случае может быть охарактеризован максимальным и минимальным значением напряжения в цикле. Но в случае модуля **Fatigue**, если событие только одно, то для его описания три нагружения. Поэтому к двум указанным выше значениям напряжения цикла добавим еще одно – среднее значение напряжения в цикле. Для получения каждого из трех нагружений были

решены три статические задачи, в которых внешнее усилие принимало максимальное, минимальное и среднее значение в цикле. Все три решения были записаны в один файл результатов. Набор команд, позволяющий получить историю нагружения в данном случае, имеет вид

SET,1,LAST,1,

FSNODE,1302,1,1,

SET,2,LAST,1,

FSNODE,1302,1,2,

SET,3,LAST,1,

FSNODE,1302,1,3,

Команда **SET** служит для задания номера шага нагружения (первый параметр данной команды), чтобы результаты данного шага нагружения могли быть извлечены из файла результатов.

В команде **FSNODE** первый параметр – номер узла, для которого извлекаются данные; второй параметр – номер события; третий параметр – номер нагружения.

6 шаг. Команда вывода всех компонент напряженного состояния для всех точек и всех событий имеет вид

FSLIST,ALL,,,ALL,ALL,

Приведем результаты действия команды:

```
LIST FATIGUE STRESSES FOR LOCATIONS  1 TO  5 IN STEPS OF  1
      EVENTS  1 TO 10 - LOADS  1 TO  3
```

```
*** POST1 FATIGUE STRESSES ***
```

LOCATION 1 NODE 701

EVENT 1

LOCATION 2 NODE 1302

EVENT 1

(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7) LOCATION 2 EVENT 1 LOAD 1
SX,SY,SZ 0.49999E+09 -830.71 -677.40
SXY,SYZ,SXZ,TEMP -583.57 -542.61 -1102.3 0.0000

(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7) LOCATION 2 EVENT 1 LOAD 2
SX,SY,SZ -499.99 0.83071E-03 0.67740E-03
SXY,SYZ,SXZ,TEMP 0.58357E-03 0.54261E-03 0.11023E-02 0.0000

(TOTAL STRESS - ITEMS 1-7) LOCATION 2 EVENT 1 LOAD 3
SX,SY,SZ -0.49999E+09 830.71 677.40
SXY,SYZ,SXZ,TEMP 583.57 542.61 1102.3 0.0000

7 шаг. По условию задачи надо оценить поврежденность после ста циклов нагружения. Поэтому число повторений события равно 1000. Соответствующая команда имеет вид

FE,1,1000,1,

8 шаг. Команда запуска процедуры расчета в модуле **Fatigue** в данном случае имеет вид

FTCALC, ,1302

Первый параметр пропущен, так как он задается, если расчет ведется для точки, а не для узла.

Второй параметр появляется, только если расчет ведется для узлов и определяет номер узла (в данном случае 1302). Результаты работы данного модуля, содержащие все амплитуды эквивалентных напряжений за историю нагружения, выглядят следующим образом:

```
PERFORM FATIGUE CALCULATION AT LOCATION 2 NODE 0
```

```
*** POST1 FATIGUE CALCULATION ***
```

```
LOCATION 2 NODE 1302
```

```
*** NOTE *** CP = 29.578 TIME= 13:06:03
```

```
No N values defined. Fatigue evaluation will not include usage factors.
```

```
EVENT/LOADS 1 1 AND 1 3
```

```
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.73449E+09 WITH TEMP = 0.0000
```

```
EVENT/LOADS 1 1 AND 1 2
```

```
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.36725E+09 WITH TEMP = 0.0000
```

```
EVENT/LOADS 1 2 AND 1 3
```

```
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.36725E+09 WITH TEMP = 0.0000
```

9 шаг. Задание кривой усталости, данные для которой были взяты из таблицы 7, было осуществлено следующим набором команд

```
FP,1,5e4,1e5,5e5,1e6,5e6,1e7
```

```
FP,21,800e6,760e6,720e6,680e6,640e6,400e6
```

10 шаг. Команда та же, что и на 8 шаге. Приведем результаты вычислений:

PERFORM FATIGUE CALCULATION AT LOCATION 2 NODE 0

*** POST1 FATIGUE CALCULATION ***

LOCATION 2 NODE 1302

EVENT/LOADS 1 1 AND 1 3

PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.73449E+09 WITH TEMP = 0.0000

CYCLES USED/ALLOWED = 1000. / 0.2763E+06 = PARTIAL USAGE = 0.00362

CUMULATIVE FATIGUE USAGE = 0.00362

С учетом найденного значения повреждения, накопленного за 1000 циклов нагружения, найдем число блоков такой же длины до разрушения изучаемого элемента конструкции. Найденное повреждение равнялось 0,003622 (см. результаты 10-го шага), тогда по формуле (25) число блоков данной длины составит 276. С учетом того, что в блоке 1000 циклов число циклов до разрушения будет равняться 276000.

Сравнение числа блоков до разрушения, полученных при расчете по максимальным напряжениям, с числом блоков до разрушения при расчете по номинальным напряжениям показало, что расчет по максимальным напряжениям является консервативной оценкой. Данный результат полностью соответствует теоретическим и экспериментальным выкладкам [1, 18, 20].

На основании приведенного выше можно высказать три основные рекомендации:

- если нагружение является блочным и в пределах каждого блока есть некоторые регулярные отрезки, то при расчете повреждения вносимого блоком необходимо каждый из этих регулярных отрезков рассмотреть по отдельности (описывать одним событием, повторяющимся несколько раз, см. пример 1, 2), а затем самостоятельно просуммировать вручную полученные повреждения;
- если нагружение является блочным и в пределах блока наборы пиковых значений параметров нагрузки расположены хаотично, то каждый набор пиковых значений можно рассмотреть в виде события, а все их вместе рассмотреть в модуле **Fatigue**;

- если рассматривается сложная конструкция, в которой возникает трехмерное напряженное состояние, и нельзя отнести напряженное состояние ни к одному из видов нагружения, то целесообразно при расчетах использовать кривую усталости, полученную в условиях циклического растяжения-сжатия.

ГЛАВА 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Элемент конструкции представляет собой вал, находящийся под действием знакопеременного во времени крутящего момента, имеющего постоянную во времени скручивающую составляющую. Будет ли при оценке поврежденности данного конструктивного элемента с использованием методики модуля **Fatigue** возникать ошибка? Если да, то оцените ее величину.

2. Ответьте на предыдущий вопрос в предположении, что элемент конструкции нагружен симметричным циклом изгиба при постоянном кручении.

3. Влияет ли порядок приложения разных по величине эквивалентных амплитуд напряжений циклов нагружения на величину накопленного повреждения, если процесс накопления повреждений описывать формулой (24)?

4. Может ли для описания всей кривой Велера для цветных металлов, их сплавов и нержавеющей сталей применяться уравнение Басквина? Если да, то приведите способ определения параметров данного уравнения на основе кривой усталости.

5. При каких условиях, накладываемых на процесс нагружения, корректна методика схематизации процесса нагружения, используемая в модуле **Fatigue** и описанная в пункте 2.2?

6. В предположении, что зависимость Сайнса полностью адекватна экспериментальным данным, проверьте присутствует или нет погрешность при вычислении повреждения в примере 3. Если присутствует, то оцените ее величину.

ГЛАВА 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Дан стальной стержень круглого поперечного сечения (рис. 34) площадью $A = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Один торец стержня закреплен. К другому концу стержня приложена осевая сила F , изменяющаяся во времени по синусоидальному закону $F = F_m + F_a \sin \omega t$ с амплитудой $F_a = 50 \text{ кН}$, и средним усилием $F_m = 5 \text{ кН}$. Определить усталостное повреждение, накопленное в стержне в ходе десяти циклов нагружения. Диаграмма усталости представлена в виде таблицы – табл. 8.

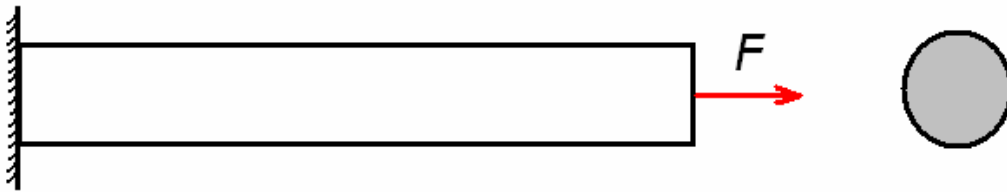


Рис. 34

Таблица 8

N	100	1000	10000	100000	1000000	10000000
σ_a , МПа	450	400	350	300	250	200

2. Решить предыдущую задачу с учетом масштабного эффекта: учесть, что данные в табл. 3 получены для образцов диаметром 5 мм.
3. Решить задачу 1 в предположении, что в стержне сделана круговая выточка радиусом 1 мм и глубиной 1 мм.
4. Оценить число блоков нагружения, которое стержень из примера 3 выдержит до разрушения, с учетом предположения, что наборы в блоках идут последовательно.
5. Решить пример 3 с учетом предположения о том, что поверхность стержня получена в результате точения, а образцы, которые были использованы при получении данных в табл. 2, имели полированную поверхность. Предел прочности стали $\sigma_B = 600 \text{ МПа}$.

6. Дана стальная пластина с круглым вырезом (рис. 35). Длина пластины $l = 0,5$ м, ширина $b = 0,05$ м, толщина $h = 0,001$ м, диаметр отверстия $d = 0,02$ м. Один торец пластины жестко закреплен. К другому торцу пластины приложена изменяющаяся во времени синусоидальному закону $F = F_a \sin \omega t$ с амплитудой $F_a = 10$ кН. Поверхность образца получена путем фрезерования. Предел прочности стали $\sigma_B = 600$ МПа. Диаграмма усталости стали, представлена в табл. 9. Образцы, которые были использованы при получении данных в табл. 9, имели полированную поверхность. Оценить число циклов до разрушения пластины.

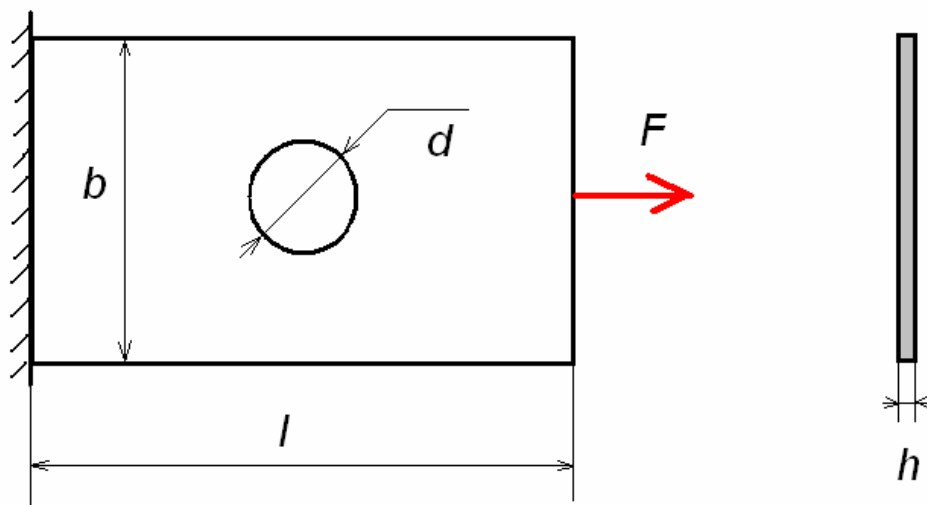


Рис. 35.

Таблица 9

N	100	500	1000	10000	100000	500000	1000000
σ_a , МПа	550	450	350	250	190	150	139

7. Рассмотреть пример 2 в предположении, что поверхность образца получена путем грубого точения. Проверить необходимость учета влияния абсолютных размеров поперечного сечения детали. Кривая усталости стали, полученная на основе экспериментов по циклическому симметричному консольному изгибу, задана в виде уравнения Басквина

$$\sigma_a = CN^m,$$

$$C = \sigma_{-1} N_G^{-m},$$

где $\sigma_{-1} = 140$ МПа – предел усталости, $N_G = 5 \cdot 10^6$ – абсцисса точки перегиба на кривой усталости (рис. 1), $m = -0,14$ – показатель в уравнении Басквина. Предел прочности стали, из которой изготовлена балка, равен $\sigma_B = 620$ МПа .

8. Решить задачу 1 в предположении, что в стержне сделана круговая выточка радиусом 1 мм и глубиной 1 мм. Кривая усталости материала стержня задана в таблице 10.

Таблица 10

N	100	1000	10000	100000	1000000	10000000
σ_a , МПа	550	500	450	400	300	220

ЛИТЕРАТУРА

1. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
2. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.
3. Морозов Е.М., Г.П. Никишков. Метод конечных элементов в механике разрушения в. – М.: Наука, 1980. – 256 с.
4. Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения – СПб.: Политехника, 1993. – 391с.
5. Newman J.C. Jr. FASTRAN-II – A fatigue crack growth structural analysis program// NASA TM 104159, February 1992. – 21 p.
6. Newman J.C. Jr. Finite-element analysis of crack growth under monotonic and cyclic loading// Cyclic stress-strain and plastic deformation aspects of fatigue crack growth, ASTM STP 637, American Society for Testing and Materials. – 1977. – p. 56 – 80.
7. Gullerud A.S., Dodds R.H. Jr., Hampton R.W., Dawicke D.S. 3-D finite element modeling of ductile crack growth in thin aluminum materials// Fatigue and Fracture Mechanics: 30th Volume/ eds. K.L. Jerina, P.C. Paris, American Society for Testing and Materials. – 1998. – p.104 – 111
8. Казаков Д.А., Капустин С.А., Коротких Ю.Г. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 1999. – 226 с.
9. ANSYS theoretical manual.
10. ABAQUS User's Manuals. Version 5.5//Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., 1995
11. MSC/NASTRAN User's Manuals. Version 70.5//MacNeal-Schwendler Corp., 1999
12. Hanq D.A., Walters A.J., Beuth J.L. Development of an object-oriented fatigue tool//Engineering with computers. – V. 16, 2000. – p. 131 – 144/
13. Ozen, M. Analysis of interfacial cracks in ANSYS // Proceedings ANSYS Conference 2000. – 2000.
14. Sharma V.B., Sardana B. Elimination of bandage roll failures of roller press at cement plant // Proceedings ANSYS Conference 2000. – 2000.

15. Peters M., Hoppe U., Hackl K. Simulation of crack-propagation using embedded discontinuities // Proceedings of the second international conference Lifetime-oriented design concepts, Bochum, Germany, 1–3 March 2004. Bochum, 2004. – P. 141–147.
16. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. – М.: Высш. шк., 1995. – 560с.
17. Расчеты на прочность деталей машин: Справочник/Биргер И.А., Шор Б.Ф., Иосилевич Г.Б.. – М. Машиностроение, 1993. – 640 с.
18. Форрест, П. Усталость металлов. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.
19. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.
20. Когаев, В.П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени. – М.: Машиностроение, 1993. – 364 с.
21. Павлов, П.А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность. – Л.: Машиностроение, 1988. – 321 с.
22. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1967. – 552 с.
23. Failure of Materials Under Combined Repeated Stresses with Superimposed Stresses: Tech. Note / NASA; G. Sines – 3495. – Langley, 1955. – 23 p.
24. Трощенко, В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наукова думка, 1981. – 344 с.
25. Wöhler A. Report on test of the Königl Niederschleesich-Märkkischen Eisenbahn made with apparatus for the measurement of the bending and torsion of railway axles in service (in German)//Zeitsch.Bauwesen. – 1858, N8. – p. 642 – 651.
26. Basquin O.H. The exponential law of endurance test//Proc. Am. Soc. For testing Materials. – 1910, V. 10
27. Сопротивление усталости металлов и сплавов / В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский. – Киев: Наукова думка. Ч. 1. 1987. – 520 с.
28. Беляев Н.М. В.И. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1976. – 608 с.
29. Физические величины: Справочник/ под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
30. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. – М.: Машиностроение, 1985. – 563 с.