

УЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В РАСЧЕТЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПО НОМИНАЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ

Введение

При проведении расчетов ресурса силовую конструкцию рассматривают состоящей из так называемых регулярных зон и зон конструктивной нерегулярности. К регулярным зонам относят участки конструкции, содержащие неустранимые концентраторы напряжений в виде отверстий под заклепки или болты в сборных конструкциях, сварные точки или продольные швы в сварных конструкциях. В регулярных зонах наблюдается полное включение в работу продольных силовых элементов, крепежные элементы или не нагружены или нагружены только от сдвига.

В современных конструкциях болты и заклепки ставят с натягом, увеличивающим долговечность соединения за счет остаточных напряжений сжатия на поверхности отверстия под крепеж. Тем не менее, проверочные расчеты долговечности регулярных зон часто проводят без учета натяга. Это связано с тем, что вероятность установки крепежного элемента с технологическим дефектом при массовой клепке в реальной панели достаточно велика. Кроме того, повышенные нагрузки в эксплуатации могут приводить к локальному пластическому деформированию материала на контуре отверстия под крепеж и уменьшать остаточные напряжения от натяга.

Многочисленные испытания реальных панелей позволили подобрать геометрию образцов со свободным отверстием, долговечность которых в условиях одноосного циклического растяжения совпадает с долговечностью регулярных зон конструкции. Такие образцы стандартизованы в авиационной отрасли и имеют отношение ширины образца к диаметру отверстия $B/d = 6$. Коэффициент концентрации напряжений при упругом деформировании по напряжениям «нетто» равен 2.6, а по «брутто» составляет 3.12. Напряжения «брутто» находят без учета ослабления поперечного сечения образца по отверстию. Диаметр отверстия зависит от применяемого крепежа, обычно он равен 6...8 мм. Испытывают стандартные плоские образцы в испытательных машинах по отнулевому циклу нагружения. Получаемую при этом кривую называют базовой кривой усталости. Испытания проводят для всех конструкционных материалов, состояний поставки, термообработки.

Долговечность регулярных зон определяет ресурс конструкции «сверху». Возникновение усталостных трещин в регулярных зонах обычно имеет массовый характер, не допускает ремонта, так как

постановка усиления приводит к дополнительной концентрации напряжений и, как следствие, преждевременному прекращению эксплуатации самолета.

К нерегулярным зонам относят участки конструкции с повышенной концентрацией напряжений, а именно:

- поперечные стыки панелей и обшивок;
- различные вырезы и дренажные отверстия в панелях;
- участки панелей в зонах окончания стрингеров;
- места установки усиливающих накладок;
- поперечные стыки стрингеров;
- скачкообразные переходы толщины в продольных силовых элементах и обшивке с механическим или химическим фрезированием;
- участки конструкции с локальным приложением нагрузок.

Повышенная концентрация напряжений приводит к раннему возникновению трещин по отношению к регулярным зонам. Нерегулярные зоны стремятся «довести» по долговечности до уровня регулярных зон путем снижения концентрации напряжений в наиболее нагруженных местах или уменьшения номинальных напряжений. Правильный подбор усиления определяет необходимость проведения расчетов долговечности прежде всего при проектировании конструкции. В качестве исходных данных служат базовая кривая усталости и эффективные коэффициенты концентрации напряжений в элементах конструкции. В общем случае эти коэффициенты находят экспериментально, при этом необходимы предварительные испытания конкретных конструктивных нерегулярностей. Такой подход затрудняет выбор рациональных конструктивных решений на этапе проектирования.

Развитие вычислительной техники привело к широкому внедрению в практику инженерных расчетов метода конечных элементов (МКЭ), реализованного в ряде специализированных программных продуктов типа NASTRAN, ANSYS и др. Разработанные методы расчета напряженного состояния конструкций позволяют достаточно точно решать задачи о концентрации напряжений, включая и контактные задачи, на основе метода конечных элементов. В результате решения таких задач можно определить величину теоретического коэффициента концентрации напряжений как отношение максимальных напряжений в вершине концентратора при упругом деформировании материала к номинальным напряжениям, вычисляемым по формулам сопротивления материалов:

$$K_T = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{НОМ}}}.$$

Теоретический коэффициент концентрации не зависит от свойств материала, величины нагрузки и определяется только геометрией концентратора напряжений.

Для оценки влияния концентрации напряжений на долговечность элемента конструкции введено понятие об эффективном коэффициенте концентрации напряжений. Эффективный коэффициент концентрации напряжений показывает, во сколько раз номинальное напряжение цикла нагружения элемента конструкции или образца с концентратором меньше соответствующего напряжения в гладком образце (без концентратора) при условии одинаковой их долговечности:

$$K_{эф} = \frac{\sigma_{эл}}{\sigma_{НОМ}} \text{ при } N_{эл} = N_K.$$

Эффективный коэффициент концентрации есть величина экспериментальная. Помимо геометрии он зависит от локальной пластической деформации материала в вершине концентратора напряжений. Так как упругопластические напряжения в концентраторе всегда меньше упругих при одинаковой нагрузке, эффективный коэффициент концентрации напряжений всегда меньше теоретического. Отличие этих коэффициентов тем меньше, чем менее пластичен материал. На величину $K_{эф}$ влияют градиент напряжений в вершине концентратора, асимметрия нагружения и ряд других факторов.

Значение эффективного коэффициента концентрации напряжений для базовой кривой усталости округленно принимают равным $K_{эф0} = 3$. Для регулярных зон конструкции характерны значения $K_{эф} = 3 \dots 3,2$, для нерегулярных – $K_{эф} > 3,2$, что объясняется не только теоретическим коэффициентом концентрации напряжений, но и геометрией стыка, градиентом напряжений, нагруженностью отверстий, их зенковкой и др.

Методика расчета долговечности

В методе расчета долговечности по номинальным напряжениям уравнение кривой усталости принято задавать в виде

$$N\sigma_H^m = C, \quad (1)$$

где σ_H - максимальное номинальное напряжение цикла нагрузок;

N - число циклов до разрушения при регулярных нагрузках с напряжением σ_H ;

m, C - параметры уравнения.

Уравнение кривой усталости стандартного образца (регулярной зоны) с учетом эффективного коэффициента концентрации напряжений можно представить так:

$$N_0 (K_{эф0} \sigma_H)^m = C_1, \quad (2)$$

где $K_{эф_0}$ - эффективный коэффициент концентрации напряжений стандартного образца;

N_0 - число циклов до разрушения при регулярном нагружении стандартного образца с напряжением σ_H .

Уравнение кривой усталости элемента конструкции запишем аналогично (2):

$$N(K_{эф}\sigma_H)^m = C_1, \quad (3)$$

где $K_{эф}$ - эффективный коэффициент концентрации напряжений элемента конструкции.

Поскольку правые части уравнений (2) и (3) равны, приравняем левые, тогда

$$N = N_0(\sigma_H) \cdot \left(\frac{K_{эф_0}}{K_{эф}} \right)^m. \quad (4)$$

В работе [1] отмечено, что для малопластичных авиационных конструкционных материалов эффективные коэффициенты концентрации напряжений близки к теоретическим. Тогда отношение эффективных коэффициентов концентрации можно заменить отношением теоретических коэффициентов концентрации напряжений:

$$\frac{K_{эф_0}}{K_{эф}} = \frac{K_{T_0}}{K_T} \quad (5)$$

В этом случае уравнение (4) примет вид

$$N = N_0(\sigma_H) \cdot \left(\frac{K_{T_0}}{K_T} \right)^m, \quad (6)$$

где K_{T_0} и K_T - теоретические коэффициенты концентрации напряжений стандартного образца и элемента конструкции. Коэффициент концентрации стандартного образца для сечения «брутто» составляет $K_{T_0} = 3,12$. Число циклов N_0 найдем по уравнению (1):

$$N_0 = \frac{C}{\sigma_H^m}, \quad (7)$$

в котором коэффициенты C и m следует находить по экспериментальной кривой усталости стандартного образца с отверстием при отнулевых нагрузках.

Применение уравнения (6) позволяет на этапе проектирования выполнить расчет долговечности элемента конструкции при регулярном нагружении по предварительно вычисленному значению K_T . В случае

расчета соединения для нахождения K_T необходимо решать контактную задачу взаимодействия крепежного и соединяемого элементов.

Учитывая степенную зависимость числа циклов нагружения до разрушения от величины номинального напряжения, формулу (6) можно преобразовать и вычислить N элемента конструкции с использованием характеристик выносливости регулярной зоны по величине приведенного напряжения

$$\sigma_{пр} = \sigma_H \cdot \frac{K_T}{K_{T0}}. \quad (8)$$

Для стандартного образца приведенное напряжение равно номинальному.

Из формулы (8) следует, что числа циклов до разрушения элемента конструкции и стандартного образца будут совпадать, если одинаковы произведения номинальных напряжений на теоретические коэффициенты концентрации напряжений. В случае упругого деформирования материала это произведение равно окружным напряжениям в надрезе:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_H \cdot K_T. \quad (9)$$

По всей видимости, впервые такое предположение было сформулировано В.П. Павелко [2] в результате обработки большого количества экспериментальных данных по усталостной долговечности заклепочных соединений из сплава Д16Т. Им было показано, что долговечность образцов со свободным отверстием, заклепочных соединений с обычной технологией изготовления и высоко ресурсных соединений с натягом совпадает при условии равенства окружных напряжений, найденных в предположении линейного физического закона. Следует отметить, что такие окружные напряжения являются фиктивными, они могут значительно превосходить не только предел текучести, но и временное сопротивление материала.

В работе [1] представлены результаты испытаний образцов из сплава Д16Т (лист) с различными геометрическими концентраторами напряжений, но различными диаметрами отверстий. Коэффициенты концентрации напряжений по сечению «нетто» находились в диапазоне 2.6 – 3.9. Отмечено, что показатели степени кривых усталости образцов не имеют заметного различия, а сами кривые в координатах «приведенные напряжения – число циклов до разрушения» по долговечности отличаются не более чем в два раза.

Методика экспериментальных исследований, характеристики образцов

В целях проверки зависимости (6) выполнены экспериментальные исследования образцов из сплава В95пчТ2. Испытаны образцы со свободным отверстием, заполненным отверстием, проушины трех типоразмеров.

Образцы типа "проушина" испытывались в специальных приспособлениях, в которых нагрузка на стенки отверстий передавалась через свободно вставленные в них стальные болты (зазор $\approx 0,05...0,1$ мм) без осевой затяжки. В зазор между болтом и стенками отверстий внедряли смазку ЦИАТИМ.

Усталостные испытания образцов проведены:

- при мягком нагружении, по синусоидальному закону изменения силы;
- при осевом растяжении с отнулевым циклом внешней нагрузки;
- при частоте нагружения 15 Гц;
- в обычных атмосферных условиях (по ГОСТ 15150 - 69).

Число циклов до разрушения N фиксировали в момент разрушения образца.

В табл. 1 приведены геометрические размеры испытанных образцов и значения теоретических коэффициентов концентрации напряжений для сечений «брутто» K_T и «нетто» α_σ , полученные методом конечных элементов в результате решения контактной задачи взаимодействия болта и образца. В этой таблице введены следующие обозначения: D – диаметр отверстия, B – ширина образца, A – для проушин - расстояние от центра отверстия до торца образца по направлению прикладываемой к болту нагрузки.

Таблица 1 – Размеры и коэффициенты концентрации напряжений испытанных образцов

Образец	D , мм	B , мм	A , мм	α_σ	K_T	m
Свободное отверстие	6	36		2.6	3.12	4.13
Заполненное отверстие	6	36		2.28	2.736	6
Проушина	6	26	16	4.37	5.681	3.66
Проушина	8	26	16	3.42	4.94	3.534
Проушина	10	26	16	2.85	4.631	3.4

В образцах со свободным или заполненным стальным болтом отверстием, поставленным без зазора и без натяга, концентрация

напряжений возникает от обтекающих отверстие напряжений, в образцах типа «проушина» внешняя нагрузка передается на стенки отверстия через напряжения смятия.

Соотношения между номинальными напряжениями и коэффициентами концентрации напряжений в сечениях «брутто» и «нетто» для испытанных образцов имеют вид

$$\sigma_H^{\text{брутто}} = \sigma_H^{\text{нетто}} (1 - D/B),$$

$$K_T = \alpha_\sigma / (1 - D/B).$$

В качестве примера на рис. 1 приведены граничные условия и МКЭ модели для свободного и заполненного отверстий, проушины с диаметром болта 10 мм.

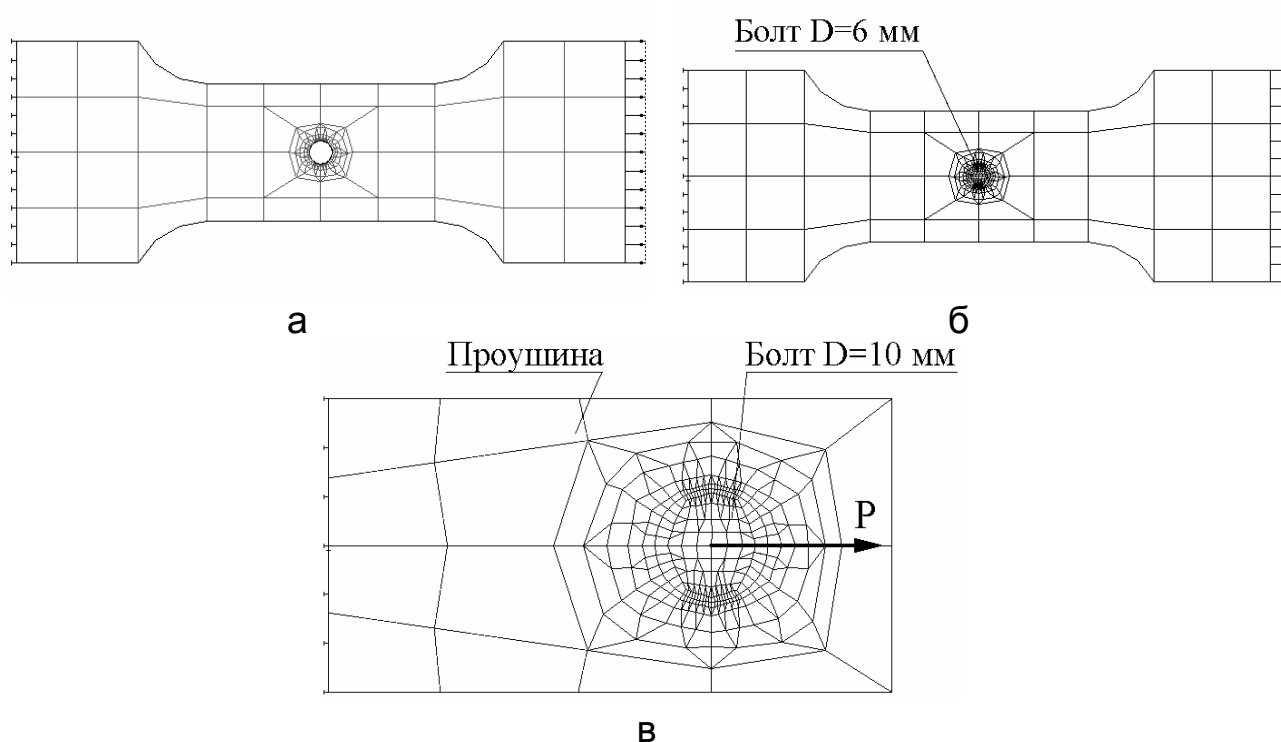


Рисунок 1 – Граничные условия и МКЭ модели испытанных образцов:
а – со свободным отверстием; б – заполненным отверстием;
в - проушины, D = 10 мм

Результаты экспериментальных исследований

Результаты испытаний образцов со свободным и заполненным отверстиями, трех типов проушин в виде зависимостей чисел циклов до разрушения от номинальных напряжений для сечений «нетто» приведены на рис. 2.

В табл. 1 указаны значения показателей степени m уравнения кривой усталости (1), полученные по результатам статистической обработки усталостных испытаний каждого типа образцов. Для проушин величины m близки и изменяются в узком диапазоне. Можно отметить,

что зависимость m от теоретического коэффициента концентрации напряжений качественно согласуется с данными работы [1], в которой отмечено, что значения m уменьшаются с увеличением α_σ для образцов из сплава В95пчТ2.

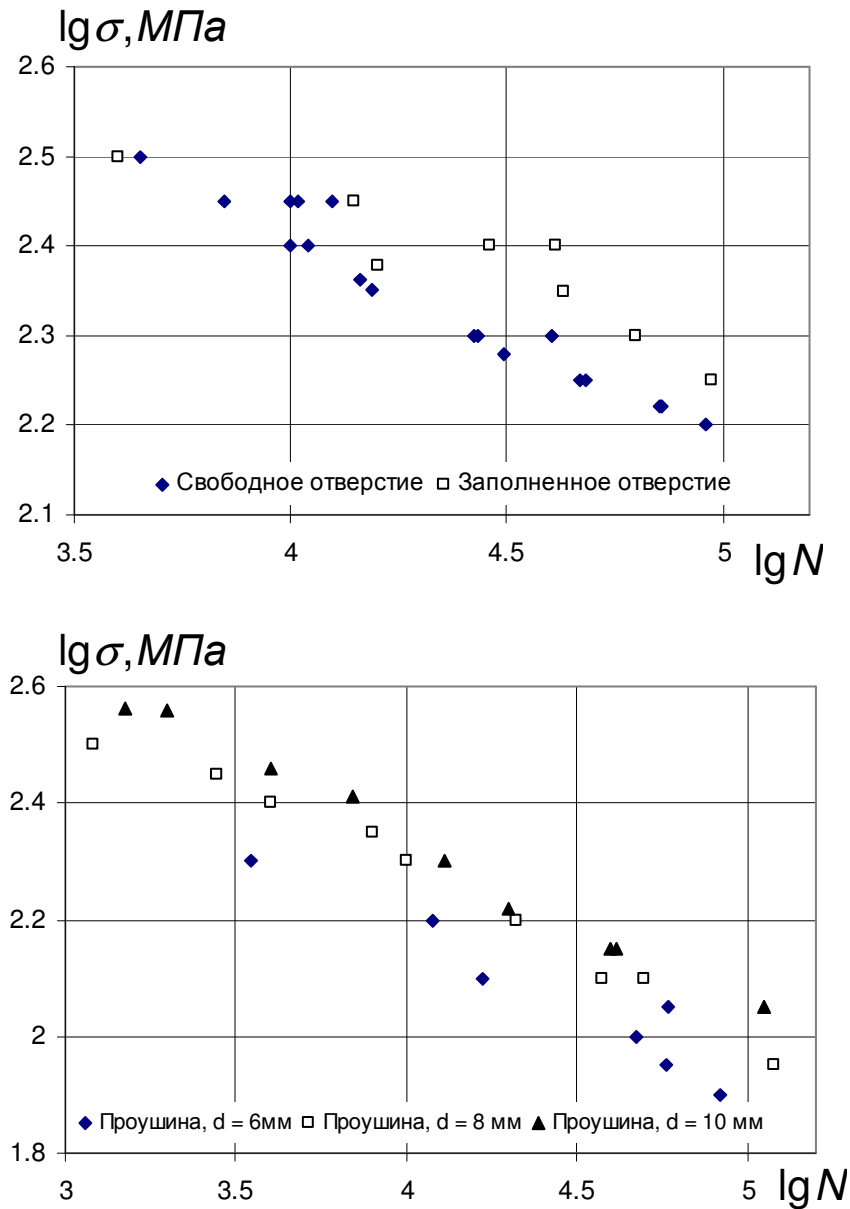


Рисунок 2 – Кривые усталости образцов с концентраторами напряжений

Кривые усталости образцов в виде зависимости долговечности от упругих окружных напряжений в точках максимальной концентрации напряжений показаны на рис. 3. Там представлены также результаты испытаний пяти видов полномасштабных панелей крыла самолета. Эти панели включали в себя два вида поперечных стыков с различными конструктивными исполнениями, продольные стыки панелей с болтовыми и заклепочными соединениями, монолитные панели с

люками-лазами. Испытания проведены при отнулевом цикле регулярного нагружения. Коэффициенты концентрации напряжений в панелях найдены в результате решения контактных задач взаимодействия крепежных и соединяемых элементов в плоской постановке методом конечных элементов. Для сборных панелей расчет проведен в два этапа. На первом - определено распределение усилий по крепежным элементам с учетом податливости связей, на втором этапе решены контактные задачи взаимодействия наиболее нагруженных соединяемых и крепежных элементов. При этом концентрация напряжений была связана как с обтекающими напряжениями, так и напряжениями от смятия.

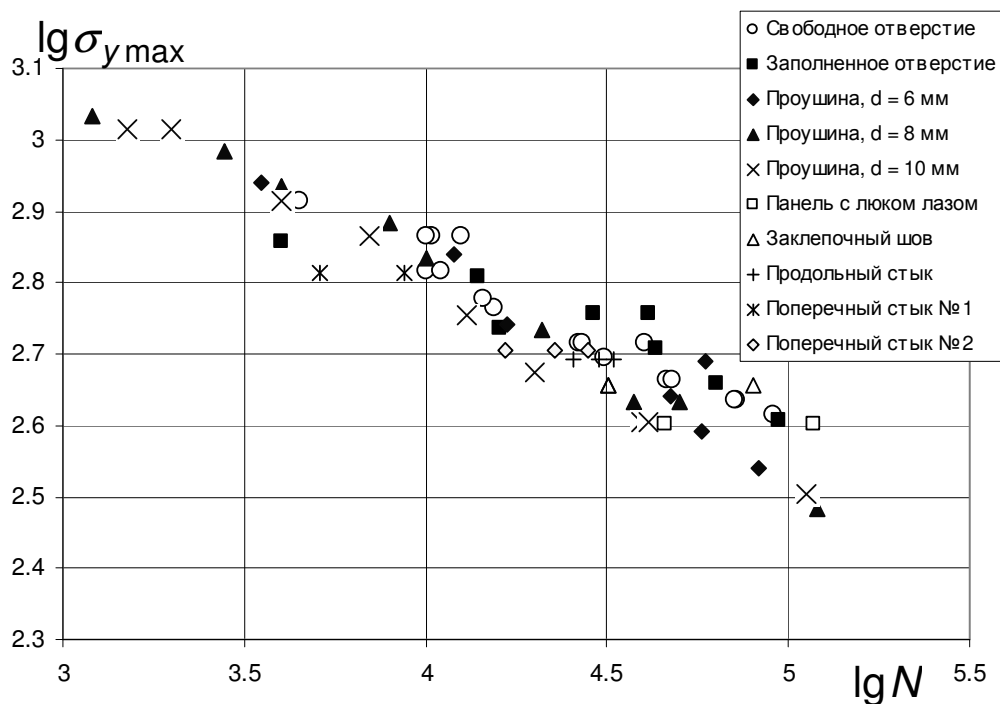


Рисунок 3 – Зависимость долговечности от упругих окружных напряжений

Как и в экспериментах В.П. Павелко, полученные для сплава В95пчТ2 данные принадлежат одной статистической совокупности. Тем не менее упругие (фиктивные) окружные напряжения лишены какого-либо физического смысла, поскольку значительно превосходят не только предел текучести сплава, но и его временное сопротивление.

Зависимость числа циклов до разрушения от величины приведенных напряжений, найденных по формуле (8), показана на рис. 4. В панелях крыла приведенные напряжения получены путем деления окружных напряжений, вычисленных в результате решения контактной задачи в физически линейной постановке при действующих нагрузках, на теоретический коэффициент концентрации напряжений стандартного образца.

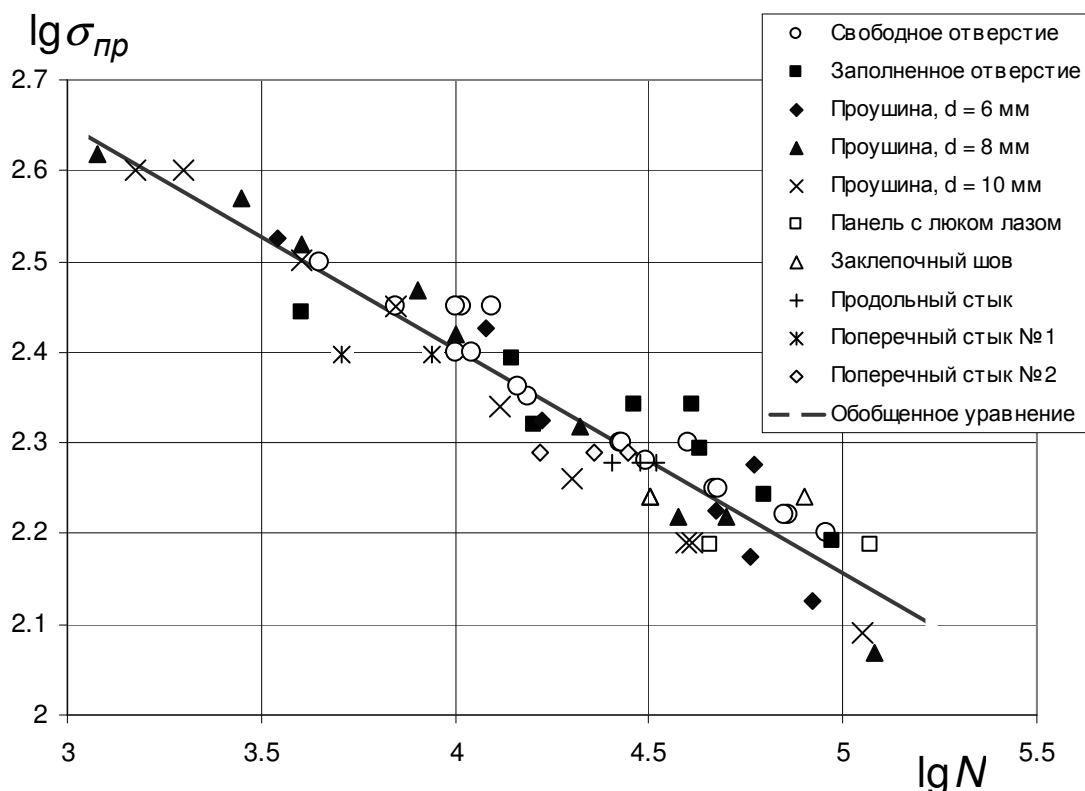


Рисунок 4 – Результаты испытаний проушин, образцов со свободным и заполненным отверстиями и панелей крыла

Прямая линия соответствует аппроксимации всех приведенных на рисунке экспериментальных данных (обобщенному уравнению). Показатель степени этого уравнения $m = 4,05$ практически совпадает с показателем степени для образцов со свободным отверстием, а сама прямая проходит по левой границе усталостных характеристик таких образцов. Величина среднеквадратического отклонения логарифмов чисел циклов нагружения до разрушения составляет $S_{LnN} = 0,16$, а коэффициент вариации $V_{LnN} = 0,0375$.

Для сопоставления приведем опубликованные данные о величинах S_{LnN} при испытаниях образцов из сплава В95 с отверстием при числе циклов до разрушения $5 \cdot 10^4$. Образцы, изготовленные из листа, имеют $S_{LnN} = 0,08$, из плиты - $S_{LnN} = 0,1 - 0,12$, рассеяние же долговечности элементов конструкций в 1,2 – 1,5 раза больше, чем образцов с отверстием [1].

Применительно к анализируемым результатам испытаний образцов и панелей крыла из сплава В95пчТ2 получены следующие значения среднего квадратичного отклонения логарифмов долговечности в диапазоне $10^4 - 10^5$ циклов до разрушения относительно собственных кривых усталости: для образцов со

свободным отверстием $S_{LnN} = 0,092$, с заполненным отверстием $S_{LnN} = 0,196$, проушин с болтами 6, 8 и 10 мм – соответственно 0,146, 0,091 и 0,065. По результатам испытаний панелей $S_{LnN} = 0,162$. Повышенная величина S_{LnN} для образцов с заполненным отверстием может быть объяснена технологическими отклонениями диаметра отверстия, в которое без натяга вставляется болт. В таком случае незначительное увеличение диаметра отверстия приводит к изменению концентрации напряжений.

Рассеяние результатов испытаний образцов и панелей, показанных на рис. 4 относительно обобщенного уравнения, не превосходит рассеяние долговечности элементов конструкций.

Полученные для образцов и панелей экспериментальные данные принадлежат к одной статистической совокупности. Такая аппроксимация удобна в плане количественной оценки рациональности того или иного конструктивного решения на основе анализа напряженного состояния в линейной постановке.

Таким образом, имея результаты испытаний стандартных образцов и решение задачи о концентрации напряжений, можно определить число циклов до разрушения элемента конструкции.

Следует отметить, что расчет долговечности по формуле (6) можно проводить, если:

- цикл нагружения отнулевой;
- нагружение регулярное;
- диаметры отверстий в стандартном образце и элементе конструкции близки.

Список использованных источников

1. Соппротивление усталости элементов конструкций / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебенев и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
2. Павелко В.П. Основы прикладной теории усталостного разрушения заклепочных соединений / В.П. Павелко // Динамика, выносливость и надежность авиационных конструкций и систем: сб. науч. тр. НИИГА. – М., 1980. – С. 14 – 24.

Поступила в редакцию 05.11.2009 г.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Гайдачук,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*