

В.Б. Буланов, И.Е. Семенов-Ежов,
А.А. Ширшов

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОУШИНАХ И БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ НА КАФЕДРЕ «ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА»

Изложены результаты исследований сотрудниками кафедры «Прикладная механика» концентрации напряжений в проушинах и болтовых соединениях за последние 35 лет.

E-mail: chirchovaa@mail.ru

Ключевые слова: проушина, шарнирное соединение, болтовое соединение, концентрация напряжений.

В 1960-х годах с появлением широкофюзеляжных большегрузных самолетов остро встала проблема долговечности их планера. Перспективным оказался переход от заклепочных соединений в несущих элементах конструкции планера к болтовым соединениям с гарантированным радиальным натягом. Актуальной также была проблема выносливости шарнирных соединений, широко используемых во многих агрегатах летательных аппаратов (шасси, узлы поворота крыла, механизмы перекоса и управления лопастями винта вертолетов и др.). В авиационной промышленности это привело к развитию исследований различных аспектов работоспособности данных соединений и, в том числе, концентрации напряжений, которая является одним из основных факторов, определяющих долговечность таких соединений.

В силу тесного сотрудничества МВТУ им. Н.Э. Баумана с предприятиями авиационной промышленности к таким исследованиям подключился коллектив кафедры «Прикладная механика» (в то время — «Динамика и прочность машин. Сопротивление материалов»). Инициаторами работ в этом направлении стали заведующий кафедрой С.Д. Пономарев и его аспирант И.П. Сухарев, тогда сотрудник лаборатории испытаний конструкций (ЛИК) ММЗ «Опыт». В дальнейшем д-р техн. наук И.П. Сухарев стал начальником ЛИК АНТК им. А.Н. Туполева и в течение многих лет преподавал на кафедре. На разных этапах исследований к работе подключались многие сотрудники и аспиранты кафедры.

В монографии [1] дан подробный анализ исследований напряженного состояния в шарнирных узлах машин, в некоторых прессовых соединениях, приведена исчерпывающая библиография (до

1975 г.) по данному вопросу, а также сформулированы три основные задачи, связанные с их расчетом:

1) определение коэффициентов концентрации напряжений (ККН) в шарнирных соединениях, в которых нагрузка передается через штифт (болт), вставленный в отверстие детали без натяга или с малым зазором;

2) определение ККН в соединениях с натягом, включая болтовые соединения;

3) определение ККН в болтовых соединениях с радиальным натягом при совместном действии натяга и рабочей нагрузки.

Шарнирные соединения. Работы [2, 3], подготовленные в развитие монографии [1], содержат данные о ККН в моделях плоских проушин (рис. 1) и прямоугольной пластине с круговым отверстием при их нагружении через диск, моделирующий болт. В работе [3] описана также методика оптимизации симметричных проушин по критерию минимума массы и напряжений. Показано, что значения ККН существенно зависят от выбора номинального напряжения.

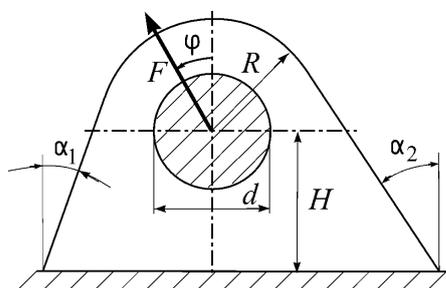


Рис. 1. Модель плоской проушины

Рекомендации по выбору номинального напряжения для различных типов соединений даны в статье [4]. Результаты экспериментальных исследований ККН в плоских симметричных и несимметричных проушинах при боковых нагрузках приведены в [5, 6].

Напряженное состояние в узкой ступице двуплечего рычага при поперечном изгибе (рис. 2) методом фотоупругости рассмотрено в работе [7], а в публикациях [8, 9] численным методом проведено исследование влияния геометрических параметров, натяга (зазора), изгибающего момента и силы на концентрацию напряжений.

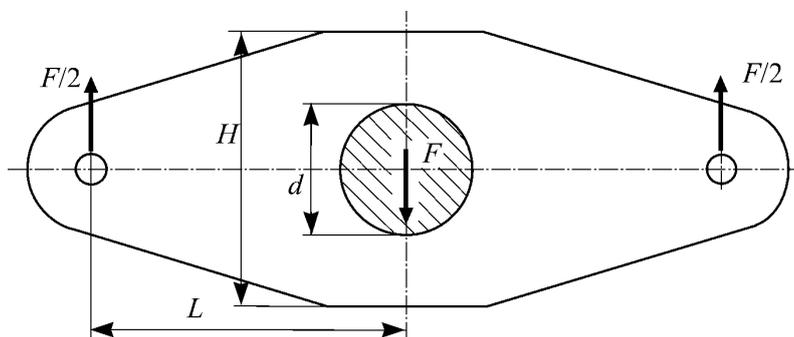


Рис. 2. Модель двуплечего рычага

Логическим продолжением экспериментальных работ [2—6] явились исследования выносливости проушин аналитическими методами [10—12]. В [10] приведены результаты определения относительных градиентов напряжений в прямых проушинах при использовании метода граничных элементов и сравнение с результатами экспериментального исследования. В работах [9, 12] изложена современная методика расчета долговечности проушин с учетом фреттинг-коррозии. Рассмотрены стальные и алюминиевые проушины при произвольном нагружении в их плоскости. Приведен пример расчета, показывающий преимущество данной методики по сравнению с методами Хейвуда и Ларссона.

Вопросы, связанные с зарождением и ростом трещины в проушинах при растяжении и боковой нагрузке, исследованы в [13].

Соединения с натягом. Достаточно полный обзор теоретических и экспериментальных работ по исследованию напряженного состояния в соединениях с натягом приведен в [14]. Большинство экспериментальных исследований выполнено поляризационно-оптическим методом, при использовании которого точность получаемых результатов зависит в том числе и от реологических свойств материала модели. Поэтому в одной из первых работ [15], выполненных на кафедре, исследовано влияние реологических свойств материала модели на напряженно-деформированное состояние прессового соединения. Результаты этой работы были использованы при разработке методики моделирования контактных напряжений в соединениях с натягом [16]. Графики ККН в прессовых соединениях, в пластине с запрессованной шайбой при различных геометрических параметрах приведены в работах [17—19].

Результаты сравнения концентрации напряжений в соединении с натягом при постановке болтов с круговой и волнообразной цилиндрической поверхностью приведены в работе [20].

Методом объемной фотоупругости (метод оптически чувствительных клеек) изучено влияние формы заходной части болта и глубины его внедрения в массивную деталь на концентрацию напряжений [21] (рис. 3). Аналогичным методом проведено исследование концентрации напряжений в толстостенном цилиндре при запрессованном в него абсолютно жестком диске [22].

Совместное действие натяга и рабочей нагрузки. Классический пример расчета широкой полосы при совместном действии натяга и сосредоточенной силы, приложенной к болту, приведен в работе [1]. Решение было получено теоретически с использованием метода суперпозиции и экспериментально методом электротензометрирования. В той же публикации введено понятие и разработана методика определения предельной внешней нагрузки для соедине-

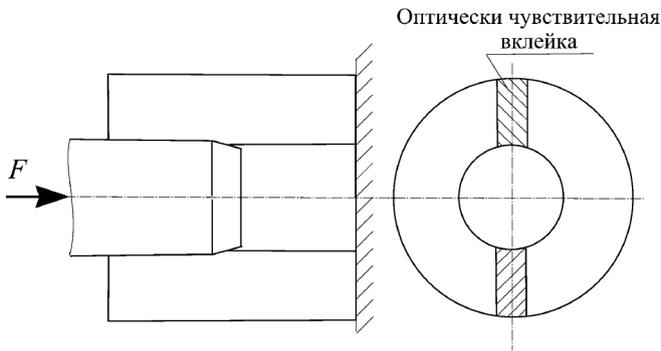


Рис. 3. Модель с оптически чувствительной клейкой

ния — нагрузки, при которой в соединении появляется зазор, т. е. исчезает контактное давление.

Методом фотоупругости по разработанной методике исследована концентрация напряжений в моделях соединений с радиальным натягом на одноточечных образцах [23, 24]: в плоском образце на пересечении осей симметрии установлен с натягом только один штифт (болт). При растяжении, сжатии и сдвиге рассмотрены два варианта соединений:

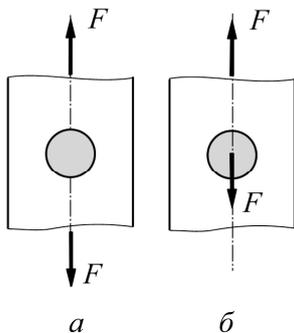


Рис. 4. Схема нагружения низкосдвигового (а) и высокосдвигового (б) соединений

низкосдвиговое (рис. 4, а) — образец нагружен, штифт не нагружен; высокосдвиговое (рис. 4, б) — нагрузка передается через штифт. В работах [25—27] исследована концентрация напряжений в моделях многорядных соединений. В [2] изложен приближенный метод расчета соединения с радиальным натягом при комбинированном нагружении.

Исследованию влияния высоты головки болта и ее перекося на концентрацию напряжений после затяжки соединения посвящены работы [28, 29]. На модели пакета методом оптически чувствительных клеек [30, 31] изучено влияние усилия затяжки соединения, а также способа постановки болта (заталкивание или втягивание) на величину ККН.

Для определения ККН в потайной и выступающей головках болта был использован метод замораживания объемных и плоских моделей [32]. В той же работе исследовано влияние эксцентриситета приложения нагрузки к болту при его постановке на концентрацию напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сухарев И.П. Прочность шарнирных узлов машин. – М.: Машиностроение, 1977. – 168 с.
2. Сухарев И.П. Концентрация напряжений в деталях машин // Справочник. Инженерный журнал. – 1997. – № 5. – С. 22–24.
3. Сухарев И.П. Концентрация напряжений в деталях машин // Справочник. Инженерный журнал. – 1997. – № 6. – С. 27–31.
4. Буланов В.Б., Семенов-Ежов И.Е., Ширшов А.А. Применение коэффициентов концентрации напряжений при расчетах на статическую и усталостную прочность // Изв. вузов. Машиностроение. – 2003. – № 8. – С. 25–29.
5. Семенов-Ежов И.Е., Сухарев И.П., Степанов Н.А. Контактные напряжения при несимметричном нагружении проушин кронштейнов // Тр. Всесоюзной конф. по методу фотоупругости. – Таллин, 1979. – Т. IV. – С. 135–138.
6. Семенов-Ежов И.Е. Исследование контактных напряжений в проушинах шарнирных узлов // Расчеты на прочность. – М.: Машиностроение, 1986. – Вып. 26. – С.43–49.
7. Семенов-Ежов И.Е., Степанов Н.А., Сухарев И.П. Напряженно-деформированное состояние ступицы двуплечего рычага // Изв. вузов. Машиностроение. – 1990. – № 7. – С. 26–31.
8. Семенов-Ежов И.Е., Степанов Н.А., Сухарев И.П. Изгиб полосы с заполненным отверстием // Изв. вузов. Машиностроение. – 2012. – № 6. – С. 25–29.
9. Семенов-Ежов И.Е., Степанов Н.А., Сухарев И.П. Концентрация напряжений около заполненного отверстия при поперечном изгибе полосы в ее плоскости // Изв. вузов. Машиностроение. – 2012. – № 10. – С. 26–31.
10. Сильверстов И.Н. Применение метода граничных элементов для определения относительных градиентов напряжений в элементах конструкций // Вестник машиностроения. – 2002. – № 4. – С. 50–52.
11. Сильверстов И.Н., Сухарев И.П. Расчет проушин на усталость с учетом фреттинг-фактора // Вестник машиностроения. – 1997. – № 5. – С. 16–20.
12. Сухарев И.П., Сильверстов И.Н. Усталость проушин и соединений // Вестник машиностроения. – 1999. – № 11. – С. 3–14.
13. Сухарев И.П. Коэффициенты интенсивности напряжений для проушин и болтовых соединений // Вестник машиностроения. – 1999. – № 11. – С. 27–29.
14. Семенов-Ежов И.Е. Проблема концентрации напряжений в соединениях с натягом // Вестник машиностроения. – 2001. – № 4. – С. 37–40.
15. Семенов-Ежов И.Е., Ширшов А.А. Неустановившаяся ползучесть в диске из вязкоупругого материала // Изв. вузов. Машиностроение. – 1974. – № 6. – С. 28–31.

16. Семенов-Ежов И.Е. Моделирование контактных напряжений в прессовых соединениях // Изв. вузов. Машиностроение. – 1979. – № 5. – С. 20–24.
17. Семенов-Ежов И.Е. Контактные напряжения в прессовых соединениях // Расчеты на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – Вып. 22. – С. 65–71.
18. Семенов-Ежов И.Е. Концентрация напряжений в соединениях с натягом // Справочник. Инженерный журнал. – 2000. – № 4. – С. 21–25.
19. Семенов-Ежов И.Е., Саков В.А., Старшинин В.И. Контактные напряжения в прессовых соединениях // Расчеты на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – Вып. 22. – С. 65–71.
20. Ушаков Б.Н., Дунаев В.В. Напряжения в болтовых соединениях // Изв. вузов. Машиностроение. – 1978. – № 10. – С. 20–24.
21. Дунаев В.В., Семенов-Ежов И.Е., Ширшов А.А. Экспериментальное исследование концентрации напряжений при постановке болтов с натягом // Расчеты на прочность. – М.: Машиностроение, 1982. – Вып. 23. – С. 122–126.
22. Семенов-Ежов И.Е., Старшинин В.И. Напряженно-деформированное состояние упругого цилиндра при посадке в него с натягом жесткого диска // Расчеты на прочность. – М.: Машиностроение, 1986. – Вып. 27. – С. 52–56.
23. Ушаков Б.Н., Даширабданов В.Д., Дунаев В.В. Исследование поляризации оптическим методом напряжений в болтовых соединениях с натягом // Изв. вузов. Машиностроение. – 1983. – № 3. – С. 14–18.
24. Даширабданов В.Д., Ушаков Б.Н., Дунаев В.В. Напряженное состояние в болтовых соединениях с натягом при сдвиговых нагрузках // Изв. вузов. Машиностроение. – 1984. – № 9. – С. 30–34.
25. Даширабданов В.Д., Ушаков Б.Н. Исследование напряжений в многорядных низкосдвиговых болтовых соединениях с натягом // Изв. вузов. Машиностроение. – 1983. – № 10. – С. 21–25.
26. Ушаков Б.Н., Даширабданов В.Д., Дунаев В.В. Исследование напряжений в многорядных высокосдвиговых соединениях с натягом // Изв. вузов. Машиностроение. – 1984. – № 8. – С. 39–43.
27. Коновалов Л.В., Семенов-Ежов И.Е., Сухарев И.П. Концентрация напряжений около заполненных отверстий в пластинах, проушинах и рычагах при различных условиях на границе контакта // Вестник машиностроения. – 2001. – № 8. – С. 30–32.
28. Дунаев В.В., Карачурин Р.С., Ушаков Б.Н. Концентрация напряжений в цилиндрических головках болтов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1987. – № 6. – С. 32–36.
29. Дунаев В.В., Карачурин Р.С., Ушаков Б.Н. Влияние перекоса головки болта на концентрацию напряжений // Изв. вузов. Машиностроение. – 1987. – № 9. – С. 20–23.

30. Дунаев В.В., Семенов-Ежов И.Е. Влияние усилия затяжки на концентрацию напряжений в болтовых соединениях с натягом // Изв. вузов. Машиностроение. – 1983. – № 8. – С. 19–23.
31. Дунаев В.В., Ушаков Б.Н., Ширшов А.А. Расчет усилия постановки болтов с радиальным натягом при затягивании и вталкивании // Расчеты на прочность. – М.: Машиностроение, 1980. – Вып. 21. – С. 29–39.
32. Ушаков Б.Н., Шарыгин Ю.М., Дунаев В.В. Концентрация напряжений в конических головках крепежных элементов // Расчеты на прочность. – М.: Машиностроение, 1980. – Вып. 21. – С. 40–52.

Статья поступила в редакцию 28.09.2012