

3.3 Технологические средства обеспечения ресурса деталей

Как было показано в предыдущих лекциях, к снижению выносливости конструкций приводит ряд технологических факторов.

3.3 Технологические средства обеспечения ресурса деталей

Усталостно-опасные зоны деталей

- конструктивные элементы с технологическими и эксплуатационными концентраторами напряжений или их сочетаниями,
- точечные концентраторы напряжений
- части конструкции, работающие в условиях растяжения, растяжения-сжатия, изгиба и кручения,
- места с геометрическими концентраторами напряжений, работающие при сжимающих нагрузках, вызывающих напряжения, превосходящие предел текучести материала,
- поверхности деталей из высокопрочных материалов с концентрацией напряжений, независимо от вызвавшей её причины,
- поверхности, в области которых действуют остаточные растягивающие напряжения большой величины

Повреждение и разрушение материала усталостно-опасных зон происходит тогда, когда затраты приложенной внешней энергии превзойдут запас внутренней энергии на определенную величину.

$A = A_e - A_c$, где A – энергия, необходимая для повреждения поверхностного слоя; A_e – энергия внешнего воздействия; A_c – внутренняя энергия,

$A_c = A_{c0} \pm \Delta A_c$, A_{c0} – внутренняя энергия материала в ненапряженном состоянии через, а ΔA_c – энергия от воздействия технологии.

Эти факторы, прежде всего, проявляются в усталостно-опасных зонах, к которым следует отнести:

- конструктивные элементы, где проявляются технологические и эксплуатационные концентраторы напряжений или их сочетания,
- точечные концентраторы напряжений (в первую очередь, заклепочные и болтовые соединения),
- части конструкции, работающие в условиях растяжения, растяжения-сжатия, изгиба, иногда кручения,
- места с геометрическими концентраторами напряжений, работающие при сжимающих нагрузках, которые вызывают напряжения, превосходящие предел текучести,
- все поверхности деталей из высокопрочных материалов с концентрацией напряжений, независимо от её причины,
- поверхности, в области которых действуют остаточные растягивающие напряжения большой величины (т.е. близкие к половине предела текучести материала).

Повреждение и разрушение материала усталостно-опасных зон происходит тогда, когда затраты приложенной внешней энергии превзойдут запас внутренней энергии на определенную величину.

Энергию, необходимую для повреждения поверхностного слоя, можно считать постоянной при определённых механических свойствах материала. Её можно определить через разность энергии внешнего воздействия, которая зависит от условий эксплуатации, и внутренней энергии, определяющей сопротивление материала повреждению. Последняя закладывается в конструкцию при изготовлении, расходуется в процессе эксплуатации и дополняется при ремонтах.

Технологическое воздействие может уменьшить или увеличить значение внутренней энергии, т.е. эту энергию можно представить суммой энергии материала в ненапряженном состоянии и энергии от воздействия технологии.

Очевидно, что задачей технологического обеспечения ресурса является устранение всех влияний технологии, снижающих внутреннюю энергию, а в усталостно-опасных зонах – увеличение этой энергии.

3.3 Технологические средства обеспечения ресурса деталей

Способы увеличения внутренней энергии в усталостно-опасных зонах

- Создание в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия, сдвигающим среднее напряжение в сторону сжимающих нагрузок.
- Ограничение деформации, действующей при нагружении, путем формирования остаточного деформированного состояния, снижающего амплитуду напряжений при нагружении

Действие остаточных напряжений при переменном нагружении аналогично действию средних напряжений цикла (С.В. Серенсен).

$\sigma'_a = \sigma_{a0} - \psi\sigma_{экс}$, где σ'_a , σ_{a0} – пределы выносливости при наличии и в отсутствии остаточных напряжений; ψ – коэффициент, характеризующий чувствительность материала к асимметрии цикла нагружения,

$\psi = (2\sigma_1 - \sigma_0) / \sigma_0$, здесь σ_1 и σ_0 – пределы выносливости при симметричном и отнулевом циклах;

$\sigma_{экс}$ – эквивалентное напряжение, учитывающее релаксацию остаточных напряжений в процессе испытания.

При напряжениях, не превышающих условный предел выносливости

$$\sigma'_a = \sigma_{a0} - \psi\sigma_{ост}$$

При напряжениях, превышающих условный предел выносливости

$$\sigma_{экс} \sim (0,3 \dots 0,5)\sigma_{ост}$$

Это может быть достигнуто,

- во-первых, созданием напряженности поверхностного слоя остаточным сжатием, сдвигающим среднее напряжение в сторону сжимающих нагрузок;

- и, во-вторых, ограничением деформации, действующей при нагружении, путем формирования соответствующего остаточного деформированного состояния.

Академик академии наук Украинской ССР Сергей Владимирович Серенсен обосновал возможность учета действия остаточных напряжений так же, как и действия средних напряжений цикла переменного нагружения.

Предел выносливости при наличии остаточных напряжений он предложил определять через разность предела выносливости в их отсутствии и эквивалентного напряжения, учитывающего релаксацию напряжений в процессе испытания.

Из приведенной формулы следует, что остаточные напряжения сжатия, знак которых отрицательный, увеличивают предел выносливости, т.е. повышают сопротивляемость деталей переменным нагрузкам.

Для учета влияния чувствительности материала к асимметрии цикла нагружения в формулу был введен соответствующий коэффициент.

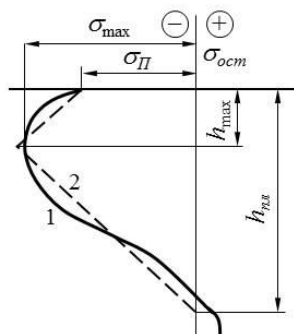
Как нам известно, при напряжениях, не превышающих условный предел выносливости таких материалов, как алюминиевые сплавы, при нормальных температурах остаточные напряжения практически не релаксируют.

Тогда предел выносливости при наличии остаточных напряжений сжатия можно определить, используя их начальную величину.

Если величина действующих напряжений превышает предел выносливости, то по данным ОКБ имени Туполева эквивалентные напряжения можно принять равными 0,3...0,5 от значения остаточных напряжений.

3.3 Технологические средства обеспечения ресурса деталей

Сущность **поверхностного пластического деформирования (ППД)** заключается в создании неравномерной упруго-пластической деформации поверхностного слоя, после которой при разгрузке возникает эпюра остаточного сжатия высокой интенсивности, уравниваемая остаточным растяжением низкой интенсивности в срединных слоях материала.



Истинная (1) и схематизированная (2) эпюры остаточного напряжения сжатия в поверхностном слое после ППД: σ_{\max} – максимальные остаточные напряжения; $\sigma_{\text{П}}$ – поверхностные остаточные напряжения; h_{\max} – расстояние от поверхности до пика остаточного напряжения; $h_{\text{пл}}$ – глубина распространения остаточных напряжений

Остаточные напряжения сжатия должны перекрывать толщину поверхностного слоя. При наличии геометрических концентраторов напряжений необходимо обеспечивать величину остаточных напряжений сжатия на уровне предела текучести материала.

Основным технологическим средством создания остаточных напряжений сжатия является упрочнение поверхностным пластическим деформированием или ППД. Сущность ППД заключается в создании неравномерной деформации поверхностного слоя в упругопластической и пластической областях, после которой при разгрузке в этом слое возникает эпюра остаточного сжатия высокой интенсивности, уравниваемая остаточным растяжением низкой интенсивности в срединных слоях материала.

Рассмотрим схематизированную эпюру остаточных напряжений сжатия, формируемую процессами ППД. Параметрами данной эпюры являются поверхностное и максимальное напряжения, расстояние от поверхности до пика остаточного напряжения, глубина, и площадь эпюры.

Для того чтобы оказывать влияние на усталость, остаточные напряжения сжатия должны перекрывать толщину поверхностного слоя, т.е. слоя с измененными свойствами.

При наличии геометрических концентраторов напряжений необходимо обеспечивать величину максимального остаточного напряжения сжатия на уровне предела текучести материала.

Наилучшую корреляцию с ростом предела выносливости имеет площадь эпюры остаточных напряжений.

3.3 Технологические средства обеспечения ресурса деталей

Задачи, решаемые упрочнением ППД

- Повышение долговечности в условиях малоциклового усталости
- Повышением предела выносливости материала
- Обеспечение противодействия коррозии, в первую очередь, коррозии под напряжением и фреттинг-коррозии
- Компенсация воздействия на выносливость и коррозионную стойкость механических повреждений поверхностного слоя и защитных покрытий в эксплуатации
- Снижение чувствительности высокопрочных материалов к геометрической и технологической концентрации напряжений

Для решения данных задач необходимо обеспечить

- Повсеместность упрочняющей обработки с целью компенсации коррозионных воздействий и концентрации напряжений
- Достаточную глубину сжатого слоя для противодействия образованию и распространению поверхностных трещин

Глубина упрочненного слоя должна быть

- > *на гладких поверхностях* *не менее 0,2-0,3 мм*
- > *на поверхностях концентраторов напряжений* *0,3-0,8 мм*
- > *при наличии подповерхностных дефектов*
(пор в сварных швах или литье) *до 1,0 мм*

Применение технологий ППД для упрочнения деталей позволяет решить следующие задачи.

Во-первых, вследствие того, что самолетные конструкции работают в основном, в условиях малоциклового усталости, необходимо добиться повышения долговечности именно в этой области с одновременным повышением предела выносливости материала.

Во-вторых, т.к. самолеты эксплуатируются в течение длительного времени в контакте с внешней средой, упрочнение должно противодействовать всем видам коррозии, в первую очередь, коррозии под напряжением и фреттинг-коррозии.

В-третьих, упрочнение должно устранять или компенсировать воздействие механических повреждений поверхностного слоя и защитных покрытий на выносливость и коррозионную стойкость деталей.

И в-четвертых, поскольку большинство применяемых в самолетостроении материалов являются высокопрочными, задачей упрочнения является снижение их чувствительности к концентрации напряжений.

Таким образом, упрочняющая обработка деталей авиационных конструкций должна обеспечивать

1. **Повсеместность** воздействия с целью компенсации технологических и эксплуатационных концентраторов напряжений, а также коррозионных воздействий, наличие и расположение которых не всегда можно определить заранее.

2. **Достаточную глубину** упрочненного (т.е. сжатого) слоя для обеспечения противодействия образованию и распространению поверхностных трещин.

Глубина упрочненного слоя должна быть не менее 0,2-0,3 мм на гладких поверхностях и 0,3-0,8 мм на поверхностях геометрических концентраторов напряжений. В случае наличия подповерхностных дефектов, например пор в сварных швах или литье, глубину упрочненного слоя желательно увеличить до 1,0 мм.

Исключением из этого требования является упрочнение тонкостенных деталей типа обшивок с толщиной полотна до 3 мм.

В данном случае упрочнение на большую глубину может вызвать высокие значения реактивных остаточных напряжений растяжения в сердцевине материала, а также привести к короблению деталей.

В связи с этим, тонкие обшивки в местах, где отсутствуют геометрические концентраторы напряжений, или вообще не упрочняются, или упрочняются с получением толщины сжатого слоя до 0,1 мм.

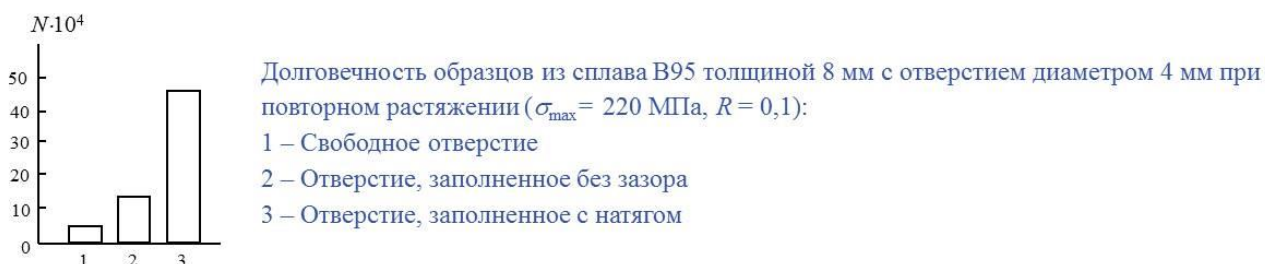
3.3 Технологические средства обеспечения ресурса деталей

Обеспечение выносливости конструкций с отверстиями под установку крепежных изделий

Долговечность болтовых и заклепочных соединений обеспечивается заполнением отверстий, что ограничивает деформацию их стенок и снижает амплитуду действующих напряжений.

Заполнение отверстий под заклепки обеспечивается повышением их точности до 10-11 квалитетов.

Основным технологическим мероприятием по повышению долговечности болтовых соединений являются постановка болтов с натягом (допуск на диаметр отверстия не более 50 мкм; на стержень болта не более 13 мкм).



Второй вариант решения задачи повышения выносливости путем поддержания необходимого уровня внутренней энергии применяют в конструкциях с отверстиями под установку крепежных изделий. Он вытекает из взаимосвязи напряжений и деформаций.

Создав условия для ограничения действующей при нагружении деформации, можно снизить **амплитуду** возникающих напряжений.

Данное средство может быть применено в конструкции совместно с деформационным упрочнением.

Известно, что сопротивление усталости конструкции с заполненным неработающим отверстием выше, чем со свободным отверстием.

Это объясняется тем, что крепёж, поставленный в отверстие без зазора, ограничивает деформацию стенок отверстия, а следовательно, снижает амплитуду действующих на них напряжений.

Таким образом обеспечивается долговечность болтовых и заклепочных соединений.

В заклепочных соединениях это достигается повышением точности отверстий до 10-11 квалитетов.

Основным технологическим мероприятием по повышению долговечности болтовых соединений являются постановка болтов с натягом. Для этого необходимо обеспечить высокую точность в посадке. Так, допуск на диаметр отверстия не должен превышать 0,05 мм, а допуск на изготовление стержня болта – 13 мкм независимо от диаметра.

На рисунке мы видим данные по долговечности образцов с отверстиями в свободном состоянии, с заполнением без зазора и с натягом.

Заполнение отверстие без натяга повышает долговечность примерно в три раза. Применение же крепежа с натягом еще более эффективно: в этом случае долговечность возрастает в 10 раз.

3.3 Технологические средства обеспечения ресурса деталей

Дополнительные меры по обеспечению выносливости конструкций с отверстиями под установку крепежных изделий

- Упрочнение поверхности отверстий раскатыванием и дорнованием
- Упрочнение переходных зон от конического гнезда потайной головки к отверстию раскаткой, обжатием пуансонами или технологическими болтами
- Обжатием материала вокруг головок крепежа методом МГПД (местное глубокое пластическое деформирование)



Дополнительными мерами по повышению ресурса соединений является создание остаточных напряжений сжатия в материале у стенок отверстий; в переходной зоне от конического гнезда потайной головки к отверстию, а также вокруг головок крепежа.

Основными методами деформационного упрочнения поверхности отверстий является раскатывание и дорнование.

Раскатывание может выполняться шариковым или роликовым инструментом.

Основными разновидностями дорнования являются упрочнение дорном, непосредственно пропускаемым через отверстие, и дорнование через промежуточные разрезные, впоследствии удаляемые, и цельные втулки, оставляемые в отверстии. Об особенностях данных технологий мы расскажем вам позднее.

Упрочнение переходных кромок может выполняться роликовыми раскатниками, а также обжатием пуансонами или технологическими болтами.

На рисунке показано сравнение данных методов по эффективности при упрочнении болтовых стыков. Как видим наибольший эффект достигается при комбинации операций дорнования и обжатия кромок.

Сопротивление усталости соединений также может быть повышено применением кольцевого или точечного обжатия материала вокруг отверстия методом местного глубокого пластического деформирования или МГПД.

В качестве оборудования для реализации этого метода применяются универсальные гидравлические и клепальные прессы, гидропневмоскобы и пневмомолотки. Метод весьма эффективен, так как повышает долговечность в десятки раз, однако, его применение ограничено в связи глубокими остаточными отпечатками на поверхности деталей, что неприемлемо для наружной поверхности обшивок.

К тому же метод отличается высокой трудоемкостью, так как в отличие от процессов дорнования и обжатия кромок, которые производятся в собранных пакетах, он осуществляется на отдельных деталях.

Поэтому метод МГПД применим лишь в некоторых критических по усталости местах, а также при ремонтных работах.