

Исследование факторов, влияющих на повреждаемость и разрушение лопаток компрессоров авиационных двигателей

Белоусов М. Г. *, Цуркаль А. А.

Московский государственный технический университет гражданской авиации (МГТУ ГА)

Кронштадский бульвар 20, 125993, Москва, Россия

**e-mail: Skyeuroeline@yandex.ru*

Аннотация

В статье детально описываются усталостные поломки лопаток компрессоров. Установлено, что все лопатки ГТД разрушаются в четко ограниченных зонах, что свидетельствует о наличии общих закономерностей динамического нагружения лопаток. Методика позволяет определить зоны возникновения и последующего развития усталостных трещин до окончательной поломки.

Ключевые слова

компрессор высокого давления, авиадвигатель, лопатки компрессора, усталостные поломки, форма колебаний, максимальные номинальные напряжения

Введение

С усталостными поломками лопаток компрессоров столкнулись в эксплуатации с начала использования ГТД. За прошедший период времени была накоплена представительная статистика по двигателям гражданской авиации и двигателям специального назначения. При этом наблюдались поломки лопаток вентиляторов, КНД и КВД различных ступеней. Фиксировались поломки лопатки в районе замка, на спинке в зоне 2/3 длины пера, на кромках в верхней трети и на торце.

Эти поломки свойственны, как показывает практика, всем типам двигателей. [1].

На рис. 1 приведен спектр поломок лопаток различных ступеней двигателей гражданской авиации.

В 2002 году с целью получения объективной картины повреждаемости ПЧ АД было введено обязательное фотодокументирование всех выявленных дефектов, обнаруженных при

осмотрах. А за 3 года до этого начался переход в ГА на новое эндоскопическое оборудование и видеосистемы.

К настоящему времени накоплена объективная представительная статистика повреждений различных лопаток в условиях эксплуатации как для старых двигателей так и для нового поколения (ПС-90А).

Из рассмотрения характера всех приведенных усталостных разрушений видно, что все лопатки независимо от их размера и материала изготовления разрушаются в четко ограниченных зонах на спинке, кромках, торце. При этом относительные координаты расположения трещин примерно одинаковы. [2].



Рис. 1. Поломки лопаток различных ступеней двигателей гражданской авиации

Из рассмотрения характера всех приведенных усталостных разрушений видно, что все лопатки независимо от их размера и материала изготовления разрушаются в четко ограниченных зонах на спинке, кромках, торце. При этом относительные координаты расположения трещин примерно одинаковы. [2].

Это свидетельствует о наличии общих закономерностей динамического нагружения лопаток и возникающей в них напряженности при резонансных колебаниях. Причем наличие эксплуатационных повреждений на лопатках не влияет на эти закономерности. [3].

1. Разрушение лопаток компрессоров зарубежных авиадвигателей

Широкое внедрение в ГА зарубежных самолетов и получение результатов смотровых работ, включая материалы фотодокументирования различных дефектов, позволяет произвести сравнительный анализ повреждаемости и выявить возможные отличия.

На рис. 2 показаны типичные поломки лопаток КВД различных ступеней двигателей.

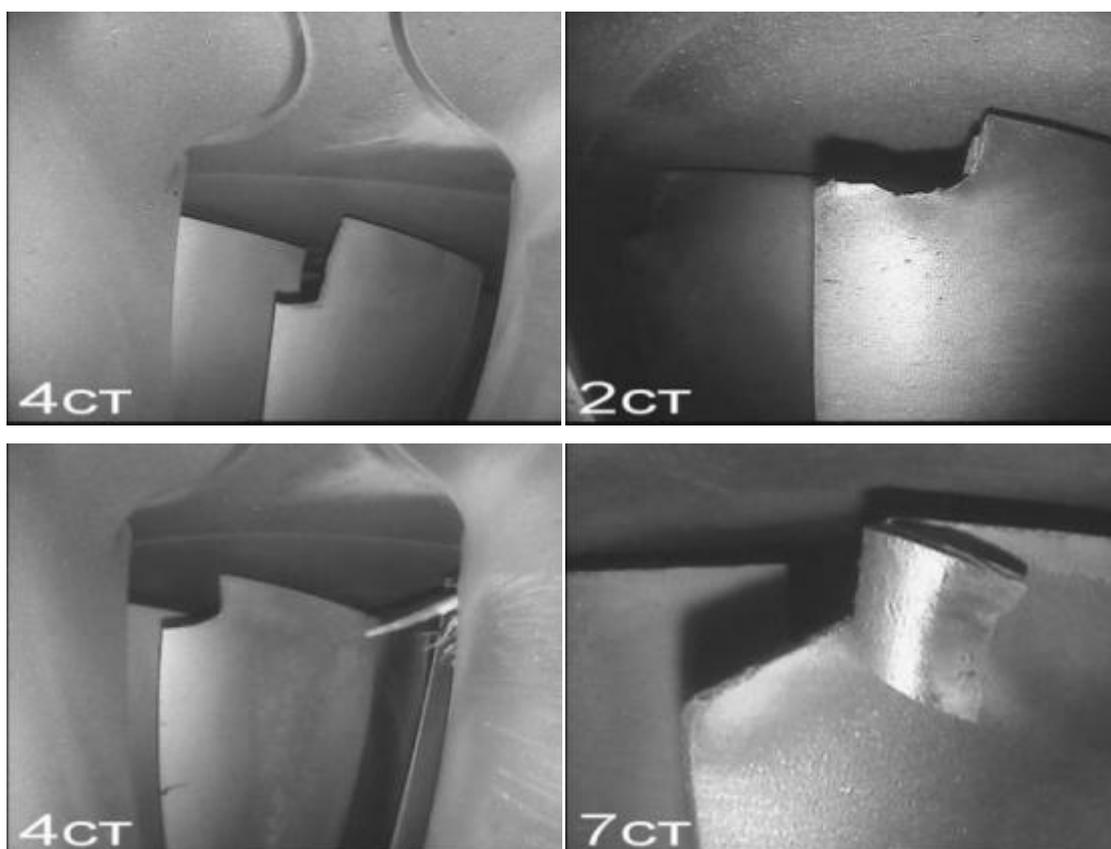


Рис. 2 Поломки лопаток КВД двигателя CFM-56 и PW-4000-94

Видно, что эти лопатки также разрушаются в районе замка, на спинке, кромках и торце. Причем общий характер и вид поломок совпадает с приведенными на первых рисунках.

Однако и есть существенные отличия. Последним лопаткам свойственны большие отделяющиеся фрагменты пера со стороны входных кромок. Иногда встречаются фрагменты прямоугольной или квадратной формы, резкие линии излома развивающихся трещин.

Кроме того, в одной ступени часто наблюдаются по две или три подряд сломанных лопатки. И более – в последующих ступенях наблюдается такая же картина. Т.е. общее количество сломанных лопаток КВД может достигать до десятка. Что совершенно не является характерным для отечественных двигателей.

Приведенные факты свидетельствуют о существенно более высокой динамической нагруженности лопаток компрессоров зарубежных двигателей. Это, очевидно, безопасности полетов не способствует.

Как известно из печального опыта эксплуатации, попадание даже одного небольшого фрагмента разрушившейся лопатки зазор между корпусом и торцом другой лопатки может привести к титановому пожару. Очевидно, наличие множества таких фрагментов эту вероятность увеличивают в несколько раз и в лучшем случае однозначно выводит двигатель из строя.

Напротив, у всех типов отечественных двигателей в эксплуатации фиксируются за очень редким исключением единичные усталостные поломки лопаток разных ступеней. Это свидетельствует о их меньшей динамической напряженности и больших запасах прочности $K_{\text{в}}$, чем у зарубежных двигателей.

2. Распределение напряжений на лопатке

Для исследования использованы результаты расчетов распределений напряжений по спинке и корыту лопатки 2-й ступени КНД двигателя Д-30 II серии.

Расчеты выполнялись по программе В.А. Рудава и Б.Ф. Шорра (ЦИАМ). Первоначальной целью расчетов являлась теоретическая оценка влияния условий закрепления указанной лопатки (шарнирное, консольное, жесткое) и влияния поля центробежных сил на расположение максимумов динамических напряжений на входной и выходной кромках.

Из расчетов следует, что положение номинального максимума и вторичных максимумов напряжений сохраняется независимо от частоты вращения для всех рассмотренных форм колебаний.

Определялись напряжения при колебаниях лопаток по 1-4 изгибных, 1-4 крутильным, 1 пластинчатой формам (по 140 точкам на спинке и корыте). Эти формы, как показывает практика эксплуатации определяют большинство усталостных поломок.

Однако сравнение расчетных данных с экспериментальными показало, что имеются существенные для практики отличия собственных частот и распределений напряжений на кромках.

Т.е. расчетные данные могут использоваться лишь для качественных оценок частот характера напряжений, но не для фактических оценок запасов прочности $K_{\text{вм}}$, K_{σ} , сопротивления усталости и долговечности лопаток.

Поэтому при нормировании допустимых повреждений необходимо пользоваться только экспериментальными данными.

Однако представляется возможным сделать более глубокий анализ полученных расчетных данных $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_{12}$, сопоставить с экспериментальными данными, а так же результатами материалов фотодокументирования поломок лопаток выявляемых в эксплуатации при смотровых работах.

Для удобства результаты расчетов $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_{12}$ представлены в виде соответствующих графиков, рис. 3, соответственно для 1 изгибной формы. Также можно выделить наиболее опасные участки представив их в цветной градации (рис. 4) где четко видно место концентрации максимальных напряжений, выделенных красной зоной. Эти формы наиболее часто являются потенциально опасными.

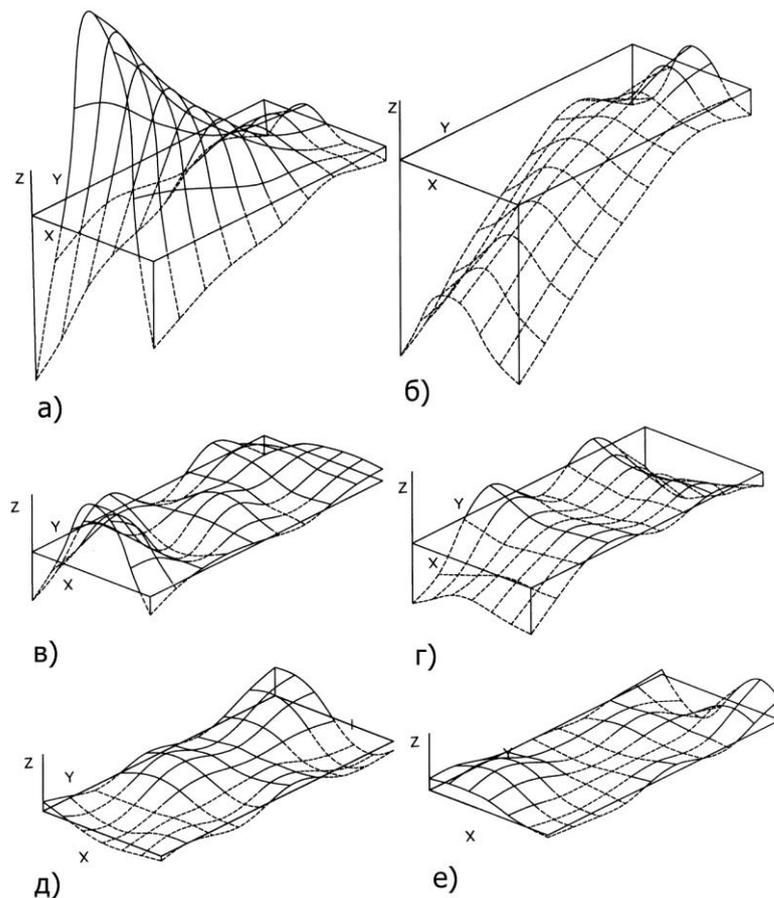


Рис. 3. распределение напряжений σ_1 при колебаниях лопатки по 1-й изгибной форме $f_p = 244$ Гц а) на спинке, б) на корыте;

Распределение напряжений σ_2 в) на спинке, б) на корыте;

Распределение напряжений σ_{12} д) на спинке, е) на корыте.

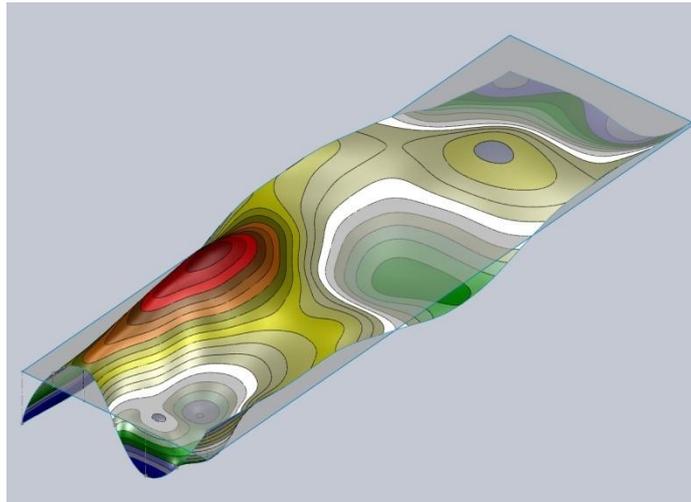


Рис. 4. Максимумы напряжений при колебаниях лопатки

Графики дают наглядную качественную картину распределений напряжений по перу лопатки и влияние на них форм колебаний.

3. Образование усталостных трещин на лопатках компрессоров

Основное влияние на начальное образование трещин оказывают, как видно, напряжения σ_1 , на спинке и кромках. Однако по мере развития трещин увеличивается объемность напряженного состояния из-за влияния σ_2 . Наибольшее влияние σ_2 проявится в теле лопатки, о чем свидетельствует характер трещины и изменение положения ее плоскости.

Скорость роста на начальной стадии образовавшейся трещины $\frac{dl}{dN}$ определяет значение σ_1 и σ_2 в зоне номинального максимума (σ_1), местоположение которого обусловлено конкретной формой колебаний [4].

Далее скорость роста будет зависеть от изменения главным образом от σ_1 по её траектории,

Т.е.
$$\frac{dl}{dN} = f(\sigma_1) \quad 1.1$$

Или
$$\frac{dl}{dN} = f(\sigma_1, \sigma_2) \quad 1.2$$

Характер распределений резонансных напряжений по фронту трещин при колебаниях по первым трем изгибным формам существенно отличен, как видно из графиков, от распределений напряжений на крутильных формах. Это поясняет рис. 5, где приведены графики изменения напряжений для этих форм по двум поперечным сечениям в призмковой зоне и на пере.

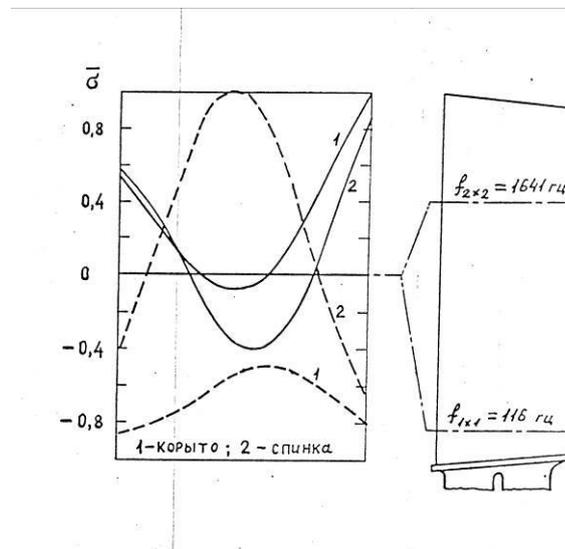


Рис. 5. Графики изменения напряжений в призмковом зоне и на пере

Отсюда очевидны опасности резонансных колебаний по трем первым изгибным формам.

При колебаниях по 2-й крутильной форме, как правило, образуется ветвящаяся трещина в вид буквы Y. Разделение трещин связано с двумя вторичными амплитудами напряжений на входной кромке.

Точка образования (будем такие точки считать особыми) двух трещин – начала ветвления расположена на границе раздела сред с различными упругими свойствами (Ю. Мураками) и сингулярность напряжений в вершине больше не описывается степенным законом с показателем $1/2$, тогда коэффициент интенсивности рассчитывается

$$K_1 = F_1 \sigma \sqrt{\pi} (l/2)^\beta \quad 1.3$$

При колебаниях по 3й и 4й крутильным формам номинальные максимумы расположены на входной кромке в верхней трети пера ближе к торцу. Вторичные максимумы, большие к ним по амплитуде

$$\sigma_M \cong (0,6 - 0,9)\sigma_H \quad 1.4$$

расположены на торце.

Развивающиеся трещины идут от кромки к торцу. Однако существует вероятность образования трещина у последней формы и от торца, т.е.

$$P_{OM}(\sigma_M) \cong P_{OH}(\sigma_H) \quad 1.5$$

Это наблюдается и в эксплуатации. За разные трещины отвечает одна потенциально опасная форма, а не две, как часто полагают. Такими же свойствами обладают 4я, 5е изгибные и 1я пластинчатая форма колебаний.

Так, по геометрической форме разрушения лопатки практически однозначно можно указать потенциально опасную форму колебаний. Поломки лопаток по 2-й, 3-й изгибным формам в условиях эксплуатации весьма частое явление на всех типах двигателей. Характерный вид трещин показан на рис. 6. Трещины образуются на спинке. [5, 6].

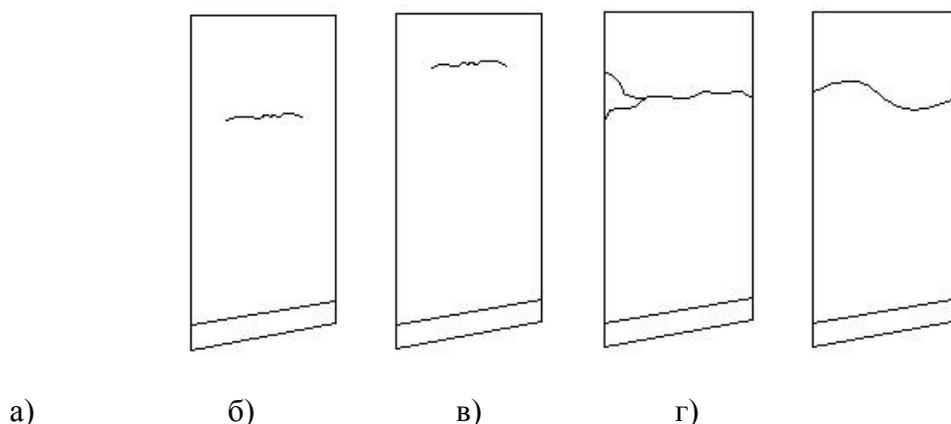


Рис. 6. Усталостные трещины при колебаниях по 2-й и 3-й изгибным формам. а) 2-я изгибная форма; б) 3-я изгибная форма; в) конечный вид поломки – 2-я изгибная форма; г) конечный вид поломки – 3-я изгибная форма.

Большие отделяющиеся фрагменты ($\frac{1}{3}$ пера; $\frac{1}{4}$ пера) наносят множественные повреждения лопаткам последующих ступеней.

Характерным диагностическим признаком проявления колебаний лопатки по нескольким формам является резкое изменение траектории развивающейся трещины (до 90°), трещина имеет три участка, рис. 7.

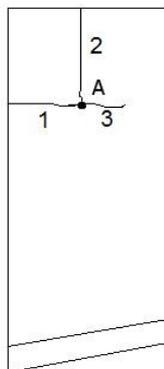


Рис. 7. Поломка при воздействии нескольких форм колебаний

Участки 1, 2 могут иметь некоторую кривизну, однако имеется особая точка перегиба *А* и трещина 3 в этой точке.

По наблюдениям в эксплуатации разрушения происходят в несколько этапов. На первом этапе трещина зарождается на входной (выходной) кромке, идет в тело до точки *А*. На втором этапе в точке *А* происходит резкое изменение направления движения в сторону торца. Трещина развивается до отделения прямоугольно фрагмента от пера лопатки.

Через некоторый период эксплуатации (если не выявлено разрушение), происходит образование новой трещины в точке *А* и распространение трещины по хорде в сторону противоположной кромки.

Описанные модели разрушения подтверждаются экспериментом в лабораторных условиях, рис. 8, 9. На рисунке показаны усталостные трещины, полученные воздействием на лопатку 4-й изгибной ($f_p = 2100$ Гц), 1-й пластинчатой ($f_p = 4500$ Гц) и 3-й крутильной ($f_p = 2760$ Гц) формами. Часто выделяются особые точки резкого перелома трещин. Их сопоставление с реальными поломками лопаток показывает полное совпадение[7].

Таким образом, по результатам смотровых работ в эксплуатации характер обнаруженных поломок позволяет выделить опасные резонансы и определить частоты, гармоники возбуждения. Более сложный последующий анализ с привлечением данных тензометрирования дает возможность оценить практические уровни вибронапряжений, запасы прочности и ресурс лопаток.

Достигается и основная цель – выявление причин разрушений. Что позволяет разрабатывать меры по подавлению дефектов.

Описанные результаты и их анализ применимы ко всем типам лопаток компрессоров отечественных и зарубежных двигателей, выполненных из стальных, алюминиевых и титановых сплавов.

Некоторые отличия в характере разрушения имеют широкохордные лопатки. У них в эксплуатации чаще всего наблюдаются высокочастотные колебания по крутильным и пластинчатым формам. Причем с входных кромок.

Такие колебания более опасны, т.к. в эксплуатации посторонними предметами повреждаются чаще всего именно входные кромки.

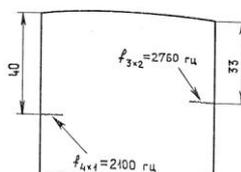


Рис. 8. Усталостные трещины, полученные на одной лопатке при её колебаниях по формам 3x2 и 4x1

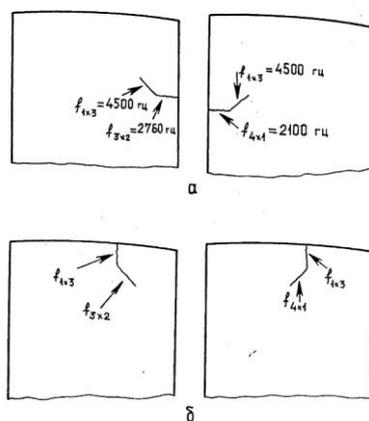


Рис. 9. Влияние форм колебаний на направление усталостных трещин: а-формы 1x3 на трещину, полученную по форме 3x2 или 4x1; б – формы 3x2, а также 4x1 на трещину, полученную по форме 1x3

В процессе эксплуатации посторонние предметы попадают в проточную часть (ПЧ) двигателей как при движении самолета по взлетно-посадочной полосе, так и в полете. По

влиянию на работу двигателя посторонние предметы делят на две группы. Двигатель проходит испытания, если при попадании в его проточную часть предметов I группы не возникает пожара, взрыва или разрушения. При этом оторвавшиеся детали не должны пробивать стенки корпуса, а необходимость выключения должна контролироваться.

Предметы II группы влияют на работу всех силовых установок при единичном попадании. Поэтому принято считать, что в течение 5 минут двигатели должны создавать не менее 75% расчетной тяги без значительных перебоев в работе.

При нахождении самолета в воздухе, особенно на низких высотах, возможно повреждение лопаток из-за попадания птиц в проточную часть компрессора, а также града. Согласно статистическим данным, на долю двигателей, снятых по причине попадания в воздушный тракт птиц, приходится до 40% от общего досрочно съема вследствие забоин. Как правило, до настоящего времени подлежали досрочному съему и такие двигатели, которые после столкновения с птицами не имели видимых повреждений или имели незначительные повреждения.

Неся значительный экономический ущерб от повреждения двигателей птицами, фирма Пратт-Уитли ввела специальные испытания своих двигателей на их устойчивость к попаданию птиц.

Например, сертификационные испытания по нормам ФАУ двигателя Т9D-70 предусматривали забрасывание на вход в двигатель до сотни ледяных шариков диаметром 25 и 50 мм; кусков льда; несколько птиц массой около 0,7 кг одновременно и одну птицу массой около 2 кг.

Засасывание механических частиц с поверхности аэродрома обусловлено возникновением вихревых жгутов, характера захвата частиц ядром жгута. Захвату посторонних предметов способствуют трещины, щели, разности высот плит покрытия. Размеры зоны захвата зависят от расхода воздуха через воздухозаборник, направления и скорости ветра относительно движущегося самолета. При попадании льда или не достаточном прогреве входного аппарата авиадвигателя в зимний период времени возможно образование загибов уголков и при низком качестве смотровых работ в районе загиба может произойти усталостное разрушение лопатки либо отделиться загнутая часть рис. 10.

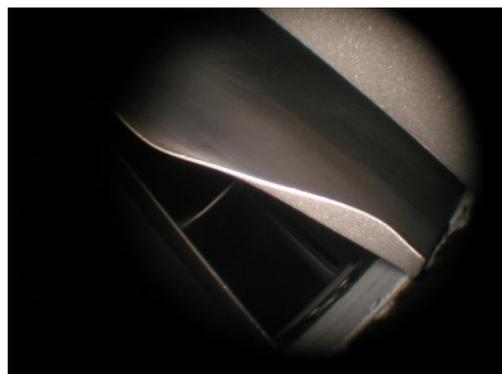
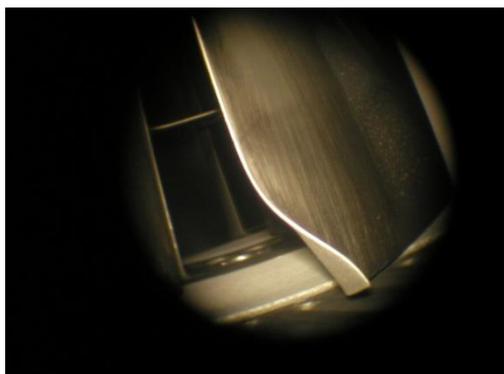


Рис. 10. Загибы уголков двигателя ПС-90А

Ветер выделяется в качестве определяющего фактора (при его отсутствии частицы практически не засасываются). Причем наиболее опасным является боковой и заднебоковой ветер по отношению к направлению движения самолета. Между скоростью потока на входе в воздухозаборник и боковой составляющей скорости ветра существует закономерная связь, при которой образуется интенсивные вихревые жгуты. Натурными аэродромными экспериментами установлено, что вихревое засасывание происходит только при работе двигателя на месте и движении самолетов со скоростью, не превышающей критической для данного самолета.

Нередкими в эксплуатации являются случаи попадания в компрессор (при снятой заглушке) посторонних предметов, поднятыми с полосы очистительными машинами, или проволоки от щеточных очистителей или контрольной проволоки, забытой техническим персоналом. Загибы уголков, которые часто встречаются на лопатках вентилятора, обусловлены попаданием крупных кусков твердого снега или льда, собранных в кучу при очистке полос зимой, а также из-за примерзания соответствующей температуре воздуха и попадания воды или снега в воздухозаборнике. Меры, применяемые по уборке ВПП и рулежных дорожек также недостаточно эффективны.

Нельзя исключить и ошибки обслуживающего технического персонала, забывающие посторонние предметы во входном устройстве (например, шайбы, болты, контрольную проволоку, перчатки, инструмент и т.п.)

Невозможно также избавиться от попадания птиц, подобрать оптимальную скорость движения самолета по ВПП и время включения реверсивных устройств.

Т.е. исследуя и влияя только на конструктивные, эксплуатационные факторы не является достаточным условием для решения проблемы уменьшения ДСД по забоинам.

Появление самолетов с низко расположенными двигателями, имеющими большую степень двухконтурности и, естественно, большой расход воздуха. Способствующий интенсивному вихревому засасыванию посторонних предметов, создает предпосылки к увеличению досрочного съема двигателей по причине забоин на компрессорных лопатках. Это подтверждает уже накопленный опыт эксплуатации самолетов Ил-96, Ту-204.

Как видно из изложенного, проблема повреждаемости компрессоров ГТД посторонними предметами многоаспектна. Большая сложность процессов и явлений, многообразие одновременно действующих и связанных между собой факторов, часто противоречивых, затрудняют ее полное решение.

При анализе причин разрушения лопаток в эксплуатации и выявления опасных форм колебаний следует производить анализ частот возбуждающих сил (по вероятным гармоникам) и спектр собственных форм и частот исследуемой лопатки.

В целом полученные результаты позволяют определить характер образования и развития усталостных трещин, примерную геометрию разрушающихся фрагментов. Возможно решение и обратных задач возникающих при анализе эксплуатационных поломок.

В связи с этим существенно возрастает роль и качество проведения смотровых работ, своевременного выявления эксплуатационных повреждений и их устранение. Что не всегда реализуется в эксплуатации.

Предложенная методика исследования динамической напряженности лопаток компрессоров при резонансных колебаниях по высокочастотным формам позволяет определить зоны возникновения и последующего развития усталостных трещин до окончательной поломки, даёт возможность выявлять и анализировать причины поломок лопаток в условиях эксплуатации, разрабатывать и проверять меры по их подавлению.

Библиографический список

1. *Белоусов Г.Г., Пивоваров В.А* Влияние форм колебаний на сопротивление усталости рабочих лопаток компрессоров ГТД. В сборн. «Динамика, выносливость и надежность авиационных конструкций» М.: РИО МИИГА, 1980.
2. *Белоусов Г.Г.* Некоторые результаты исследования сопротивления усталости лопаток компрессоров при колебаниях по высокочастотным формам «Тезисы доклада Международного симпозиума «Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения» 25-28 сентября 1984 г. Из-во «Наукова думка» Академия наук УССР. Институт проблем прочности. К; с. 24-25.

3. *Белоусов Г.Г.* Теоретико-экспериментальная оценка динамической нагруженности лопаток направляющего аппарата КНД двигателей Д-30КУ, Д-30КП, Д-30КУ-154. В сб. «Эксплуатационная прочность и надежность авиационных конструкций. – М.: МГТУ ГА, 1997, с. 50-56.
4. Проблемы концентрации напряжений в авиационных конструкциях. Труды УАИ, выпуск 40, УФА, 1973.
5. Исследование вибраций рабочих лопаток компрессора первого каскада двигателя Д-30КУ на самолете ТУ-154М, Отчет № 81-198.- п/я В-2877, 1981.- 17 с.
6. *Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И.* Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей М., «Машиностроение»: 1976, 216 с.
7. Развитие усталостных трещин в материалах и конструкциях. Под общей редакцией д-ра техн. наук М.Э. Гарфа. Киев «Наукова Думка» 1980. – 148 с.