

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

---

Б.А. Чичков

**РАБОЧИЕ ЛОПАТКИ АВИАЦИОННЫХ ГТД. Часть 1.**

**ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ РАБОЧИХ ЛОПАТОК.**

Пособие по дисциплинам “Конструкция и техническое обслуживание ЛА и АД”, “Конструкция и прочность авиационных двигателей”, “Конкретная АТ” для студентов 5 и 4 курсов специальности 160901 всех форм обучения;  
курсового и дипломного проектирования

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА РОССИИ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

---

**Кафедра двигателей летательных аппаратов**

**Б.А.Чичков**

**РАБОЧИЕ ЛОПАТКИ АВИАЦИОННЫХ ГТД. Часть 1.  
ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ РАБОЧИХ ЛОПАТОК.  
Пособие по дисциплинам “Конструкция и техническое обслуживание  
ЛА и АД”, ”Конструкция и прочность авиационных двигателей”,  
“Конкретная АТ” для студентов 5 и 4 курсов специальности 160901 всех  
форм обучения; курсового и дипломного проектирования**

Москва

Научный редактор, рецензент: д.т.н., проф. Коняев Е.А.  
к.т.н. Метелкин М.Б.

## ВВЕДЕНИЕ

Компрессоры и турбины авиационных ГТД - основные узлы, определяющие характеристики двигателей (газодинамические, геометрические, весовые, экономичности, технологичности, надежности и др.).

Компрессоры и турбины есть лопаточные машины, элементами которых являются лопатки роторной группы, называемые иначе рабочими лопатками.

В межлопаточных каналах рабочих колес компрессоров происходит преобразование механической работы в кинетическую энергию движения воздуха и в потенциальную энергию давления.

В межлопаточных каналах рабочих колес турбин осуществляется преобразование энергии газового потока в механическую энергию вращения ротора.

Конструктивные и технологические особенности рабочих лопаток оказывают принципиальное влияние на газодинамические характеристики двигателей (подробнее, напр., [3]) и устойчивость (надежность) их работы. Прочностные (подробнее, напр., [4]) характеристики рабочих лопаток также оказывают принципиальное влияние на характеристики надежности, так как обрыв рабочих лопаток может привести к нелокализованному разрушению двигателя и катастрофе. Нелокализованные отказы из-за обрыва лопаток относятся к такому типу отказов, по которым двигатель должен удовлетворять международным нормам: оторвавшиеся части лопатки (-ок) должны оставаться внутри корпуса двигателя. Однако необходимо учитывать, что обрывы лопаток могут инициировать другие тяжелые отказы: разрушение диска, пожар и др. Рабочие лопатки турбин работают при высоких температурах, испытывают большие статические, вибрационные и температурные напряжения. Они подвергаются одновременно коррозионному и эрозионному действию газов. Учитывая тяжелые условия работы рабочих лопаток и их роль в двигателе (надежность и ресурс лопаток турбин обычно являются определяющими надежность и ресурс двигателя), к конструктивным формам рабочих лопаток турбин, к способу их крепления в диске, к их

материалам, технологии изготовления и контролю в эксплуатации предъявляют особо жесткие требования.

Таким образом вопросам проектирования, изготовления и эксплуатации рабочих лопаток должно уделяться значительное внимание.

*Замечания.*

1. Данное пособие посвящено вопросам эксплуатационной повреждаемости и технического обслуживания рабочих лопаток двигателей "на крыле" (на самолете, вертолете).

2. Пособие состоит из трех частей: в первой части рассматриваются основные общие вопросы эксплуатационной повреждаемости рабочих лопаток и ее влияния на характеристики двигателей; во второй - вопросы контроля работоспособности рабочих лопаток и лопаточных венцов в целом; в третьей - вопросы ремонта и замены рабочих лопаток.

3. Вопросы конструкции и прочности рабочих лопаток, крепления их к дискам, особенностям производства и применяемым материалам рассматриваются в минимально необходимом объеме для раскрытия содержания лишь основных вопросов пособия (предполагается что перечисленные вопросы изучены студентами при изучении соответствующих курсов дисциплин). При необходимости более углубленного ознакомления с указанными вопросами можно воспользоваться литературой из списка, приводимого в конце пособия.

*4. Нормативные вопросы следует уточнять с привлечением действующей, на момент изучения, технической документации по конкретному типу двигателя.*

5. С образцами лопаток, имеющих некоторые из рассматриваемых типов повреждений, можно ознакомиться в лабораториях кафедры.

Под повреждаемостью лопаток далее понимается совокупность характеристик, описывающая изменение их геометрических, весовых характеристик, физико-химических свойств основного материала и покрытия (и т.п.), вызванное воздействиями в процессе использования двигателя по назначению. Иначе, под поврежденностью можно понимать степень изменения работоспособности лопаток (напомним [9], что работоспособность характеризуется таким состоянием объекта, при котором значения всех его

параметров соответствуют требованиям нормативно-технической документации).

Повреждаемость отдельных рабочих лопаток и лопаточных венцов оказывает существенное влияние на характеристики двигателей (расход топлива, устойчивость работы, затраты на техническое обслуживание (см. Часть 3 настоящего пособия) и т.д.) и систему технического обслуживания в целом [1, 9], а также безопасность полетов.

Многие фирмы, научно-исследовательские организации проводят широкомасштабные работы по анализу повреждаемости рабочих лопаток и установлению факторов, оказывающие отрицательное влияние на характеристики различных узлов двигателей. Например, в ходе реализации программы исследований для двигателей типа JT8D [6], были установлены следующие, наиболее часто встречающиеся, повреждения рабочих лопаток (характерны и для большинства других типов двигателей).

По вентилятору:

- эрозия передней кромки рабочих лопаток (изменение радиуса скругления передней кромки, уменьшение длины хорды профиля);
- повреждение посторонними предметами (значительное искажение профиля);
- изменение формы концов лопаток;
- чрезмерная шероховатость поверхности лопаток.

По компрессору низкого давления:

- выработка наружных торцев при трении рабочих лопаток о корпус;
- эрозия передней кромки рабочих лопаток;
- повреждение посторонними предметами рабочих (изменение формы передней и задней кромок);
- загрязнение рабочих лопаток;
- существенное увеличение шероховатости поверхности лопаток.

По компрессору высокого давления:

- эрозия рабочих лопаток (уменьшение длины хорды);
- искажение формы (заострение) передней и задней кромок рабочих лопаток;
- существенное увеличение шероховатости поверхности лопаток, загрязнение;
- увеличение концевых зазоров лопаток вследствие их износа.

По турбине:

- эрозия, точечная коррозия и прогар рабочих лопаток.

Перейдем к рассмотрению основных вопросов повреждаемости рабочих

лопаток и влияния повреждаемости на некоторые эксплуатационные характеристики двигателей.

## 1. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ РАБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРОВ

В эксплуатации кроме силовых факторов, определяемых конфигурацией лопаток и действием внешних сил (статических, газодинамических и вибрационных), на лопатки действует ряд других факторов, связанных с особенностями влияния среды, в которой эксплуатируется двигатель: попадание посторонних предметов, коррозия, изменение температуры, эрозия, износ, фреттинг-коррозия и т. д.

Силовые факторы, за исключением вибрационных и, в какой-то мере, циклических, достаточно точно прогнозируются и учитываются на стадии проектирования; остальные факторы сложно предсказуемы. (В целом расчетные методы не дают возможности с достаточной достоверностью оценить работоспособность лопаток компрессора, которая в основном проверяется в процессе доводки путем широких исследований напряженности, а также испытаниями в натуральных условиях на экспериментальном компрессоре и другими стендовыми испытаниями [6].)

В наибольшей степени на работоспособность лопаток оказывают влияние:

а) "обычная" усталость (переменные напряжения, связанные с вибрациями, превосходят усталостную прочность материала);

б) снижение усталостной прочности материала случайными забоинами, вызываемыми попаданием посторонних предметов (птицы, град, предметы, оставленные при обслуживании, частицы поверхности и т. п.

в) повреждения (нарушение формы) из-за попадания крупных

посторонних предметов;

г) эрозия мелкими частицами (песок);

д) коррозия (оказывает в основном влияние на сопротивление усталости).

Наибольшее число [3,4,5,6] неисправностей компрессоров связано с попаданием в двигатель посторонних предметов и вызываемых ими механических повреждений. По ряду статистических данных [6] о летных происшествиях, вызванных попаданием в двигатели посторонних предметов, в среднем на 100000 полетных циклов приходилось 5.4 случая попадания при максимальной частоте 9.7 случая, а минимальной - 3.4. Федеральное Авиационное Управление США разделяло посторонние предметы на две основные категории. В первую группу включались предметы, влияющие на работу только одного двигателя многодвигательного самолета. Это - обтирочная ветошь, ручной инструмент, болты или гайки, куски протекторов авиашин и т.п. - на взлетном режиме; птицы массой до 1.8 кг - на максимальном крейсерском (набор высоты). Во вторую группу были отнесены предметы, которые могут влиять на работу всех двигателей многодвигательного самолета при единичном попадании. Это- песок и гравий (28 г на 645 см<sup>2</sup> площади сечения входного устройства двигателя) на взлетном режиме, градины, птицы массой до 0.68 кг, лед на входном устройстве воздухозаборника и т.п. При попадании предметов первой группы в двигателе перед контролируемым выключением двигателя не должно возникать пожара, взрыва или "глобального" разрушения. Оборвавшиеся рабочие лопатки не должны пробивать стенки корпуса. При попадании предметов второй группы двигатель должен быть способен создавать 75% расчетной тяги без значительных перебоев в течении 5 мин.

Исходя из особенностей условий нагружения пера лопаток типичного вентилятора, наиболее опасными с точки зрения повреждаемости считаются случаи: забоины (или др. нарушения формы) и трещины (или др. нарушения целостности) тонкой входной кромки лопатки и разрушение лопатки под действием изгибающих моментов относительно оси минимальных моментов инерции.

На характер повреждаемости лопаток оказывают влияние как геометрические характеристики лопаточной решетки в целом, так и

собственно характеристики пера лопаток. Недостаток, связанный с применением лопаток с короткой хордой, заключается в том, что число лопаток, "разворачивающих" части постороннего предмета, увеличивается. Так, обычно, в крупногабаритных двигателях при попадании птицы повреждаются входные кромки трех - четырех лопаток, а в малоразмерных - кромки восьми - десяти лопаток. Малоразмерные двигатели оказываются также более уязвимы с точки зрения сопротивляемости лопаток изгибу при повреждении посторонними предметами.

Некоторые характерные виды механических повреждений (забоина, вмятина, погнутость) и геометрические характеристики повреждений кромок и концевых частей рабочих лопаток приведены на рис. 1.1.

Также возможны забоины собственно на центральной части пера рабочих лопаток. Эти забоины характеризуются глубиной и диаметром, взаимным расположением, а также тем, имеется, или нет, выпучивание в их зоне материала с обратной стороны пера лопатки.

(См. также прил. 2-4.)

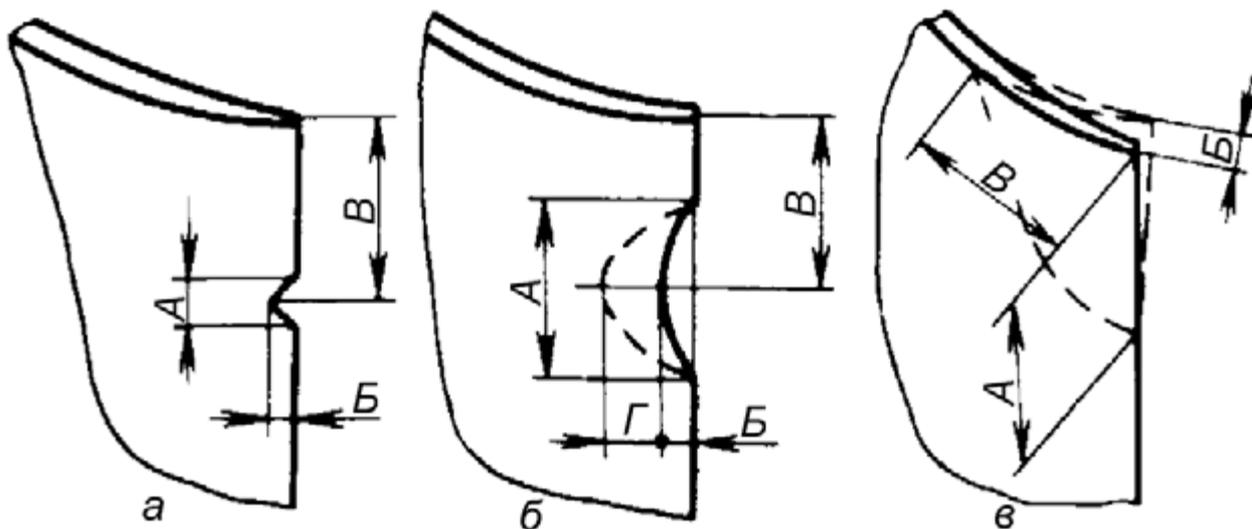


Рис. 1.1. Виды повреждений кромок, вершущек (концевых частей) лопаток и их характеристики

(а -забоина: (характерные размеры) А - длина забоины; Б - глубина забоины, измеряемая по хорде профиля; В - расстояние от периферийного торца лопатки до середины забоины.

б -вмятина: А - длина вмятины, измеряемая вдоль входной кромки

лопатки; Б - максимальная глубина вмятины (измеряется в плоскости профиля пера лопатки перпендикулярно входной кромке); В - расстояние от периферийного торца лопатки до середины вмятины (измеряется вдоль входной кромки лопатки); Г - максимальная ширина вмятины (измеряется по поверхности профильной части со стороны спинки или корыта перпендикулярно входной кромке лопатки).

*в* - погнутость: А - величина отогнутой части профиля лопатки, измеряемая вдоль входной (выходной) кромки; Б - величина отклонения вершины угла лопатки; В - величина отогнутой части профиля лопатки, измеряемая по периферийной кромке лопатки)

Наибольшая повреждаемость в эксплуатации лопаток компрессора приходится на 1 ступень [5] (около 21%), 72% повреждений - на входную кромку и 17% - на выходную (до 90% лопаток имеет лишь одно повреждение), чаще повреждается верхняя половина пера лопатки.

Повреждения лопаток в эксплуатации носят случайный характер как по виду повреждений, так и по распределению повреждений по перу лопатки.

Испытания [5] на усталость поврежденных лопаток компрессора показали, что степень снижения предела выносливости зависит от исходных механических свойств материала, режима термообработки и относительной глубины повреждения.

Предел выносливости поврежденных стальных лопаток может снижаться до 200 МПа.

Предел выносливости поврежденных титановых лопаток может снижаться с 270-520 МПа до 100 МПа. Наиболее чувствительны к повреждениям лопатки из титановых сплавов, подвергнутых высокотемпературной термомеханической обработке.

Изучение закономерностей влияния повреждений забоинами на усталость лопаток также показало, что за параметр, характеризующий величину повреждения, целесообразнее принимать не абсолютную глубину забоины, а глубину, отнесенную к толщине кромки лопатки (толщина кромок лопатки определяется как минимальный размер профиля поперечного сечения, взятый от входной или выходной кромок на длине, равной радиусу кромки).

Сравнение чувствительности к повреждениям стальных и титановых лопаток одной конструкции показывает, что более чувствительными к повреждениям являются титановые лопатки. При этом коэффициент снижения длительной прочности лопаток из титановых сплавов пропорционален коэффициенту снижения длительной прочности стальных лопаток с коэффициентом пропорциональности, равным корню квадратному из отношения модулей упругости стали и титанового сплава.

Следует отметить, что при изменении относительной глубины забоины от 0 до 1 более чувствительными к повреждениям являются лопатки из сплава ВТ8, подвергнутые высокотемпературной термомеханической обработке с последующей пневмодробеструйной обработкой, а минимальной чувствительностью - лопатки из сплава ВТ9 с такой же обработкой. При значениях относительной глубины забоины от 1 до 2 чувствительность к повреждениям титановых лопаток, изготовленных по различным технологическим вариантам независимо от типа сплава, выравнивается и при относительной глубине забоины более 2 она асимптотически приближается к максимальному значению.

В общем случае вопрос об установлении норм на допустимые механические повреждения обычно решается на основании данных о:

распределении напряжений в лопатках при колебаниях по основному и высокочастотным формам колебаний (по кромкам, спинке, корыту, торцу пера);

максимальных амплитудах напряжении, полученные по результатам тензометрирования;

пределах выносливости для различных зон профильной части неповрежденных лопаток;

распределении местных запасов прочности в лопатке с учетом статических напряжений и температуры по результатам тензометрирования и сведениям о пределах выносливости.

Повреждения, превышающие допустимые, могут выводиться по специально разработанной технологии (см. Часть 3 пособия, пп. 3.1, [7]) при условии, что значение коэффициента снижения предела выносливости для восстановленных лопаток не должно превышать 1.2.

Надежность работы лопаток с повреждениями и эффективность мероприятий по восстановлению их прочности устранением повреждения может

быть проверена усталостными испытаниями лопаток и одним из видов стендовых испытаний двигателей (длительными, технологическими, эквивалентными или специальными резонансными).

Конкретные нормы величин забоин на пера рабочих лопаток, допускаемых без зачистки и нормы зачистки забоин и вершушек лопаток приводятся в эксплуатационной документации двигателей.

Однако можно отметить ряд общих принципов назначения норм:

1. В корневой части лопатки (15-25% от высоты пера) обычно не допускается никаких повреждений или допускаются забоины очень малой глубины (до 0.05-0.1 мм) и диаметра (до 0.3 мм).
2. Не допускаются повреждения на пера в области антивибрационных полок.
3. Ограничивается количество и размеры забоин по кромкам и перу.
4. Ограничивается количество мест зачистки и размеры забоин, подлежащих зачистке.
5. Ориентировочно длина  $l$  (в мм) при зачистке забоин глубиной до 2 мм может быть определена по зависимости  $l=30+25*\Gamma$  (где  $\Gamma$ -глубина забоины в мм). При глубине забоины от 2 до 5 мм -  $l=80-100$  мм.

Примеры норм величин забоин на пера лопаток, допускаемых без зачистки, и норм зачистки забоин и вершушек рабочих лопаток компрессоров приводятся в прил. 2-3. (См. также Часть 3, пп. 3.1)

Рассматриваемые повреждения лопаток приводят к нарушению расчетной формы проточной части компрессора, что сопровождается падением его КПД, увеличением удельного расхода топлива и температуры газа перед турбиной.

(Ухудшение характеристик двигателей достаточно часто рассматривают для трех характерных периодов наработки: менее 1000 ч, от 1000 до 3000 ч и свыше 3000 ч - см. рис. 1.2 (на примере изменения удельного расхода топлива) [6].

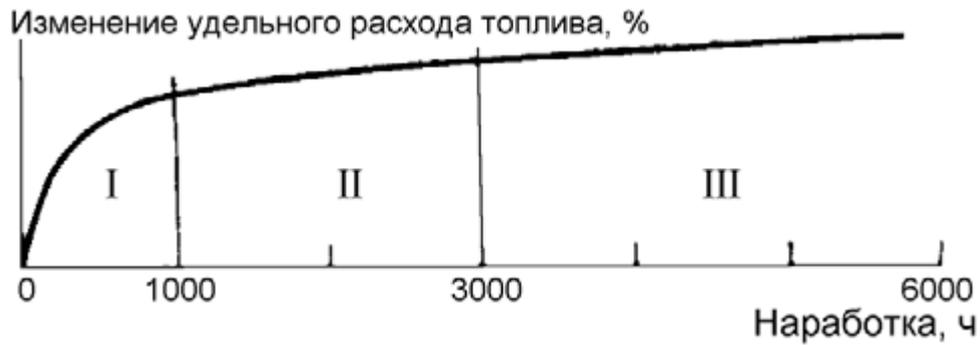


Рис. 1.2. Типичное изменение удельного расхода топлива ГРДД при увеличении наработки по причинам:

I - увеличение зазора в уплотнениях; II - эрозия, попадание в двигатель посторонних предметов, дальнейшее увеличение зазора; III - продолжение эрозии, попадание посторонних предметов, повреждения в горячей части

В течение первых 1000 ч расход топлива быстро возрастает в основном из-за увеличения зазоров, что объясняется интенсивным износом уплотнений проточной части в процессе их приработки на различных режимах работы двигателя (из-за соприкосновения периферийной части рабочих лопаток с уплотнениями).

Характеристики при наработке от 1000 до 3000 ч ухудшаются более плавно, что связано с постепенными изменениями аэродинамики проточной части, вызванными эрозией и загрязнением поверхности рабочих лопаток.

Повреждения от попадания посторонних предметов в вентилятор и компрессор могут произойти в любое время, но с большей вероятностью этот фактор начинает сказываться в рассматриваемый период наработки, так как повреждения от посторонних предметов накапливаются и на передней и задней кромках образуются забоины и царапины. Эти небольшие дефекты изменяют геометрические характеристики профиля пера лопатки и ухудшают характеристики двигателя.

Третья причина увеличения расхода топлива - ухудшение состояния поверхности проточной части из-за загрязнения профиля лопаток или выкрашивания частиц материала.

В этот период также начинают проявляться повреждения в турбине, так как частицы нагара отрываются от стенок камеры сгорания и попадают на перо лопаток, вызывая эрозию поверхностного слоя, что влечет за собой постепенное увеличение потерь.

Ухудшение характеристик двигателей после наработки порядка 3000 ч обычно характеризуется ухудшением состояния горячей части и дальнейшим увеличением потерь в

системе повышения давления. В основном происходит изменение аэродинамических характеристик профиля лопаток турбины высокого давления. Рабочие лопатки могут закручиваться или изгибаться, изменяя аэродинамические характеристики и согласование ступеней турбины. Выкрашивание покрытий, коррозия деталей, выгорание поверхности профиля лопаток также ухудшают состояние турбины в этот период.)

Искажение расчетной геометрии поврежденных лопаток вызывает разбалансировку ротора и повышение уровня вибраций двигателя, а также может стать причиной появления новых резонансных режимов и автоколебаний лопаток. Наиболее опасны изгибные колебания по первым формам - см. рис. 1.3.

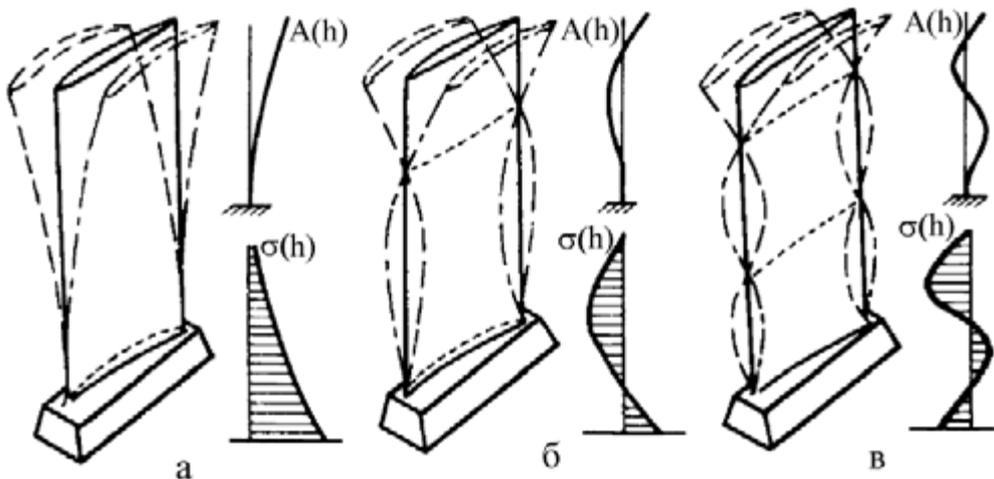


Рис. 1.3. Формы изгибных колебаний рабочих лопаток и характер распределения амплитуд перемещений  $A(h)$  и напряжений  $\sigma(h)$  [4] :  
а-первая (1X1), б-вторая (2X1), в-третья (3X1) форма

(Увеличение хорды лопаток, применение антивибрационных полок или использование таких механизмов, как различного рода демпферы (в т. ч. шарнирных замков-см. рис. 1.4), уменьшает опасность резонанса. Однако эти мероприятия приводят к увеличению веса и требуют дополнительного внимания к обеспечению работоспособности элементов замкового соединения. Возможен повышенный износ элементов соединения (в т.ч. замковой части лопатки) и появление трещин в замковой части. При наличии на лопатке анодированного защитного слоя и его нарушении значительно интенсифицируются коррозионные процессы (как правило, по внутренним торцам замковой части).

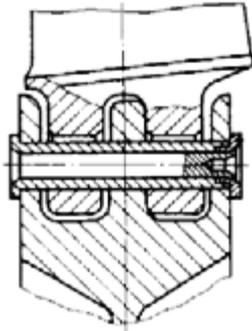


Рис. 1.4. Пример соединения с шарнирным замком

Увеличение веса может быть уменьшено выбором материала с высоким модулем упругости или с низкой плотностью. Так как собственная частота пропорциональна корню квадратному из отношения (модуль упругости/плотность), то чем выше это значение, тем меньшая хорда необходима при данной частоте. Высокий модуль упругости обеспечивает также высокую жесткость лопатки, благодаря чему прогибы, вызываемые высокими нагрузками в условиях срыва, становятся меньше. Опасность задевания соседних рядов лопаток, соответственно, уменьшается и появляется возможность уменьшения осевых зазоров.

Также следует отметить, что при прочих одинаковых условиях запас вибрационной прочности лопаток, изготовленных из стали, примерно в 1.4 раза, а из титановых сплавов примерно в 2.5 раза больше запаса прочности лопаток из дуралюминиевых сплавов.)

Механические повреждения создают повышенную концентрацию напряжений в лопатках, что совместно с увеличением уровня вибронагруженности объясняет возможность ускоренного разрушения лопаток от усталости.

(Напряжения в лопатках, являющиеся результатом действия центробежных и аэродинамических нагрузок (постоянный изгиб, растяжение от центробежных сил, растяжение от раскрутки сечения центробежными силами) можно рассчитать. На эти напряжения накладываются переменные напряжения, являющиеся результатом нарушения потока или самовозбуждающегося резонанса типа флаттера. Эти напряжения определить трудно, поэтому для того, чтобы обеспечить наибольшую работоспособность лопатки, при выборе материала оценивают, насколько работоспособен материал при напряжениях, превышающих пределы выносливости (рис. 1.5). Материал с кривой усталости *A* предпочтительней материала *B*, так как лопатка, изготовленная из материала *A*, лучше сопротивляется случайным высоким напряжениям, вызываемым аэродинамическим срывом, в то время как напряжения в лопатке из материала *B* не должны превышать предела выносливости.)

### Рис. 1.5. Типичные кривые усталости

Распространенной неисправностью вентиляторов крупногабаритных ТРДД является также расстыковка рабочих лопаток по антивибрационным полкам (например, в результате их деформации от ударов посторонними предметами или износа поверхностей контакта полок). Эта неисправность сопровождается увеличением уровня вибронегруженности лопаток из-за утраты полками своих демпфирующих свойств и снижения жесткости рабочего колеса. Встречаются случаи западания внахлест антивибрационных полок.

Для уменьшения повреждений деталей компрессора посторонними предметами создают защитные устройства на входе в двигатель, повышают прочность и жесткость элементов входной части компрессора (особенно рабочих колес первых ступеней), размещают воздухозаборники по возможности на большем удалении от поверхности земли, прорабатывают вопросы оптимизации использования реверсивного устройства по скорости выключения на пробеге. Кроме конструктивных мероприятий по снижению указанных повреждений следует использовать эксплуатационные, такие как тщательная уборка взлетно-посадочных полос и рулежных дорожек, уменьшение времени руления самолетов на аэродроме за счет их буксировки, применение аэродромных средств отпугивания птиц и т.п.

Попадание в двигатель вместе с воздухом большого количества песка и пыли приводит к интенсивному эрозионному износу лопаток компрессора, ухудшающему их аэродинамические и прочностные характеристики. Эрозионному износу (выветриванию) подвержены также мягкие покрытия, применяемые для уплотнения (уменьшения) радиальных зазоров проточной части, при котором (как и в случае износа лопаток) падает КПД компрессора и возрастает удельный расход топлива двигателя. Ухудшается устойчивость работы двигателя.

Следует отметить, что первоначально эрозия может даже несколько улучшить характеристики двигателя, так как лопатки шлифуются и становятся тоньше. Однако затем эрозия ведет к значительному ухудшению характеристик двигателя и может вызвать потерю запаса устойчивости и привести к неустойчивой работе компрессора (как правило, помпажу) и двигателя в целом, что может привести к авиационному происшествию.

Как уже отмечалось, изменение формы поверхности пера лопаток компрессора вследствие эрозии и попадания посторонних предметов приводит к длительно развивающимся потерям. Существует ряд технических приемов конструирования деталей и узлов двигателя, позволяющих уменьшить эти потери. Среди наиболее распространенных мер можно указать увеличение радиусов передней и задней кромок, а также хорды лопатки, уменьшение изогнутости профиля, увеличение относительной величины зазора и снижение окружной скорости на периферии лопаток. Потери вследствие износа горячей части могут быть уменьшены путем улучшения управления охлаждающим воздухом, улучшения материалов и покрытий пера лопатки, усовершенствования конструкций жаровых труб и топливных форсунок.

Рассмотрим подробнее влияние повреждаемости рабочих лопаток на устойчивость работы двигателей.

Внешними признаками неустойчивости работы компрессора являются [3,10]:

- повышение температуры газов при падении частоты вращения ротора;

-резкое падение давления за компрессором, сопровождающееся обычно хлопком, уменьшение расхода воздуха, значительное возрастание температуры на входе в компрессор;

-интенсивные пульсации параметров потока (давления, скорости, температуры) в проточной части компрессора.

Пульсации потока почти во всех случаях возбуждают колебания лопаток (см. выше).

Причиной появления неустойчивости является срыв потока с выпуклой поверхности (спинки) профиля лопаток при больших положительных углах атаки. Критический угол срыва, при котором компрессор работает неустойчиво, независимо от частоты вращения сохраняется почти постоянным. На рис. 1.6, а показана схема срывного обтекания решетки профилей рабочего колеса осевого компрессора. При постоянной окружной скорости лопаток уменьшение расхода воздуха приводит к снижению осевой составляющей скорости потока на входе в решетку. Относительная скорость при обтекании профиля изменяет свое направление. Угол набегания потока, возрастая, становится больше критического, вследствие чего и возникает срыв потока со спинки лопатки.

По внешним проявлениям различают три основных вида неустойчивых течений в компрессоре:

-потеря статической устойчивости, -помпаж, -вращающийся срыв.

Потеря статической устойчивости связана с изменением расхода воздуха и представляет собой монотонный процесс удаления режима работы компрессора от одного исходного состояния к другому, устойчивому состоянию. Подобный процесс особой опасности для компрессора, как правило, не представляет.

Помпаж (потеря динамической устойчивости) - это вид неустойчивости, связанной не с медленным изменением расхода воздуха, а со скоростью его изменения. Поскольку источником колебаний параметров воздушного потока при помпаже не является какое-либо внешнее периодическое воздействие, то возникающие колебания не являются вынужденными, и процесс носит автоколебательный характер. При помпаже периодические колебания давления и расхода воздуха происходят в продольном направлении с малой частотой и большой амплитудой. Обычно частота колебаний составляет несколько герц. Возникающие при срыве потока со спинок лопаток вихри неустойчивы и имеют тенденцию к

самовозрастанию. Образующаяся вихревая пелена, распространяясь в межлопаточном канале, уменьшает эффективное сечение потока, в результате чего расход воздуха еще больше уменьшается. Наступает момент, когда вихри полностью заполняют межлопаточные каналы, подача воздуха компрессором при этом прекращается. В последующее мгновение происходит смывание вихревой пелены, при этом возможен выброс воздуха на вход в компрессор. Повторное и многократное поджатие одной и той же порции воздуха в компрессоре при помпаже приводит к повышению температуры воздуха на входе в компрессор (в результате многократного подвода энергии к одной и той же массе воздуха). Возникновение помпажа сопровождается большими динамическими напряжениями всех элементов и силовой установки в целом, ростом температуры газов, падением оборотов (частоты вращения). При длительной работе на режиме помпажа может произойти разрушение двигателя.

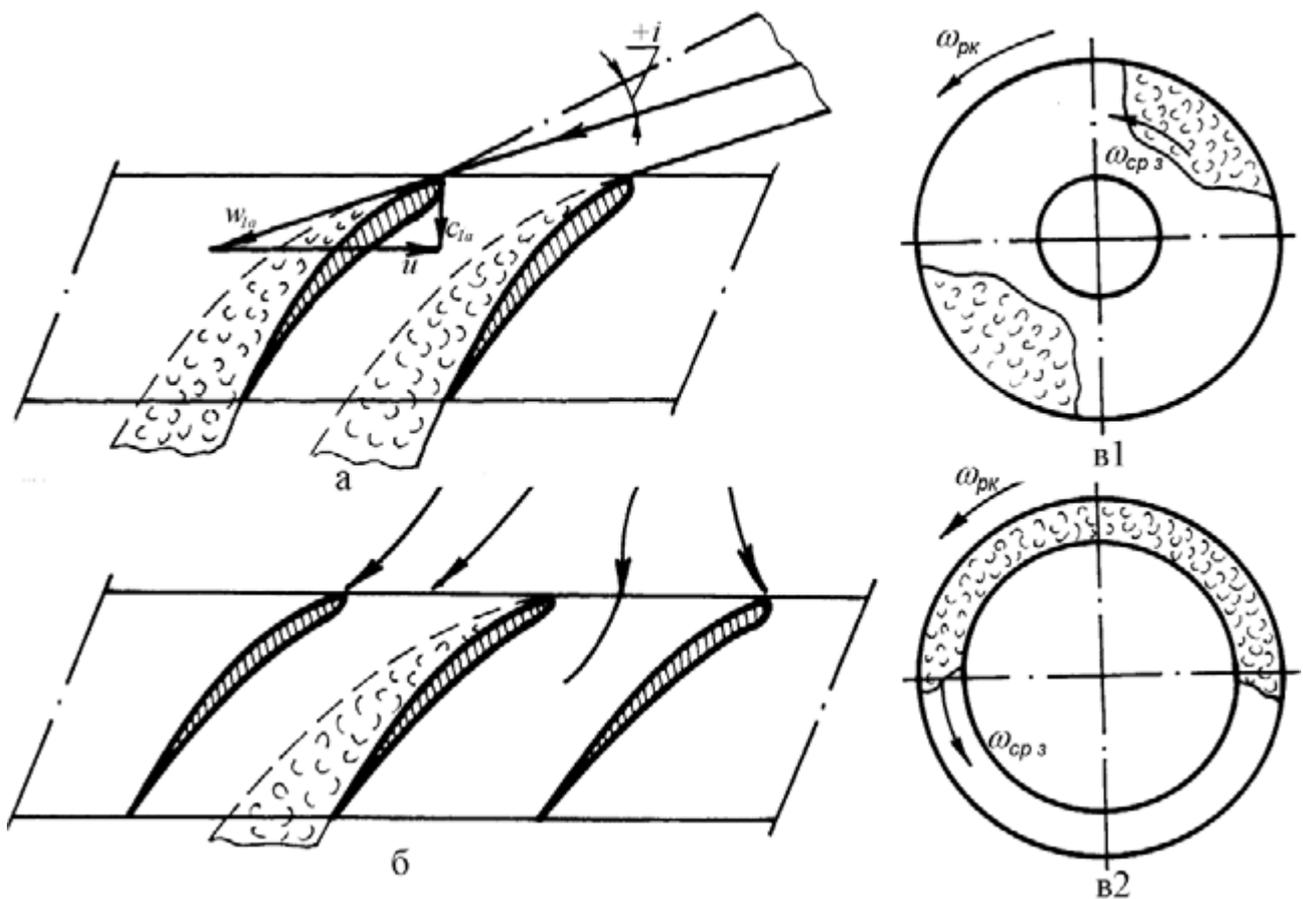


Рис. 1.6. К описанию неустойчивых течений в компрессоре

а- схема срывного обтекания решетки профилей рабочего колеса осевого компрессора,  
 б- схема растекания потока на входе в рабочее колесо при наличии срыва в межлопаточном канале,  
 в- расположение зон срыва в венцах рабочего колеса с малым (в1) и большим (в2) относительным диаметром втулки

( $\omega_{рк}$  - угловая скорость рабочего колеса,  $\omega_{срз}$  - угловая скорость срывной зоны)

Вращающийся срыв возникает в результате потери устойчивости осесимметричного течения и связан с возникновением срывного течения. Вследствие производственных отклонений в геометрии отдельных лопаток и имеющейся в реальных условиях асимметрии потока срыв появляется не на всех лопатках венца рабочего колеса одновременно, а в отдельных межлопаточных каналах (не более двух-трех каналов). Возникающий отрыв потока в этих каналах уменьшает расход воздуха через них и может также перекрывать сечения и приводить к выбросу среды навстречу основному потоку. Поток на входе в венец начинает растекаться в окружном направлении по обе стороны занятых срывом межлопаточных каналов - см. рис. 1.6, б. На неподвижных венцах вращающихся зон срыв не появляется, возникают только нерегулярные пульсации давления. При возникновении срыва во вращающемся венце он увлекается в направлении вращения ротора.

В отличие от продольных колебаний из-за помпажа появление вращающегося срыва нарушает осевую симметрию потока и характеризует потерю устойчивости всего течения, а не только пограничного слоя. Вращающийся срыв относится к автоколебательному процессу и определяет потерю поперечной устойчивости.

Существенное влияние на процесс развития вращающегося срыва оказывают геометрические и кинематические параметры венца, а также и взаимное влияние соседних венцов. Возникнув во вращающемся венце, срыв распространяется на венцы ступеней, расположенных перед и за вращающимся венцом. Происходит это потому, что появление срыва на каком-либо участке венца приводит к уменьшению скорости потока на выходе из него, т. е. к существенному увеличению углов атаки и срыву потока на лопатках последующего венца. С другой стороны, происходит торможение потока на прилегающих к срывной зоне участках предыдущего венца. Следует также отметить, что неподвижные лопатки статора оказывают тормозящее воздействие на скорость вращения срывных зон. (В результате угловая скорость срывной зоны оказывается меньше угловой скорости рабочего колеса).

Величина относительного диаметра втулки рабочего колеса оказывает существенное влияние на скорость вращения зон срыва. Отношение угловой скорости срывной зоны к угловой скорости рабочего колеса больше у ступеней с малым относительным диаметром втулки.

В венцах с малым относительным диаметром втулки, т. е. при длинных лопатках, зоны срыва первоначально возникают в периферийной части лопаток. Образуются две-три зоны срыва - см. рис. 1.6, *в1*. По мере уменьшения расхода воздуха количество зон срыва увеличивается, причем возмущения внутри зон сравнительно небольшие и, как правило, отсутствует выброс воздуха в пространство перед венцом.

В венцах с большим значением относительного диаметра втулки зона срыва (обычно одна, иногда две), возникая, сразу охватывает всю высоту лопатки - см. рис. 1.6, *в2*. Возмущения внутри зоны велики и характеризуются выбросом воздуха через зону в пространство перед венцом.

Вращающийся срыв в ступенях с малым значением относительного диаметра втулки называют "частным", "прогрессирующим", а в ступенях с большим значением относительного диаметра втулки - "полным", "резким".

Общим проявлением возникновения вращающегося срыва является падение напора в компрессоре и колебания лопаток.

Крупногабаритные двигатели менее чувствительны к эрозии, так как на лопатках большого размера те же качественные ухудшения наступят после большего износа, чем на малых лопатках. Установлено, например, что уменьшение в результате эрозии размера кромок лопаток вентилятора крупногабаритных двигателей на 3 мм в ряде случаев допустимо. В связи с этим целесообразно увеличивать толщину лопаток малоразмерных двигателей.

Для уменьшения эрозионного износа элементов компрессора применяют пылезащитные устройства на входе в двигатель, рабочие и направляющие лопатки первых ступеней выполняют стальными (вообще, чем тверже материал, тем лучше его сопротивление эрозии, поэтому применение мягких покрытий и титана в тех случаях, когда прогнозируются серьезные эрозионные повреждения, считают неприемлемым), используют мягкие прирабатываемые покрытия с повышенной эрозионной стойкостью, используют перепуск воздуха за подпорными ступенями вентилятора (см. рис. 1.7) и т.д.

В ряде работ [6] отмечается, что результаты работ по поиску материалов с хорошей сопротивляемостью эрозии недостаточно значимы. Наиболее

эрозионостойкими конструкционными материалами являются высококачественные никелевые сплавы и мартенситные стали, обычно используемые в последних ступенях осевых компрессоров. В качестве примера также можно привести пример замены на двигателе "Спей" титановым сплавом алюминиевого сплава, из которого изготавливались лопатки первых ступеней компрессора. Общая масса трех первых ступеней увеличилась на 8.3 кг, но и сопротивляемость эрозии повысилась в два раза.

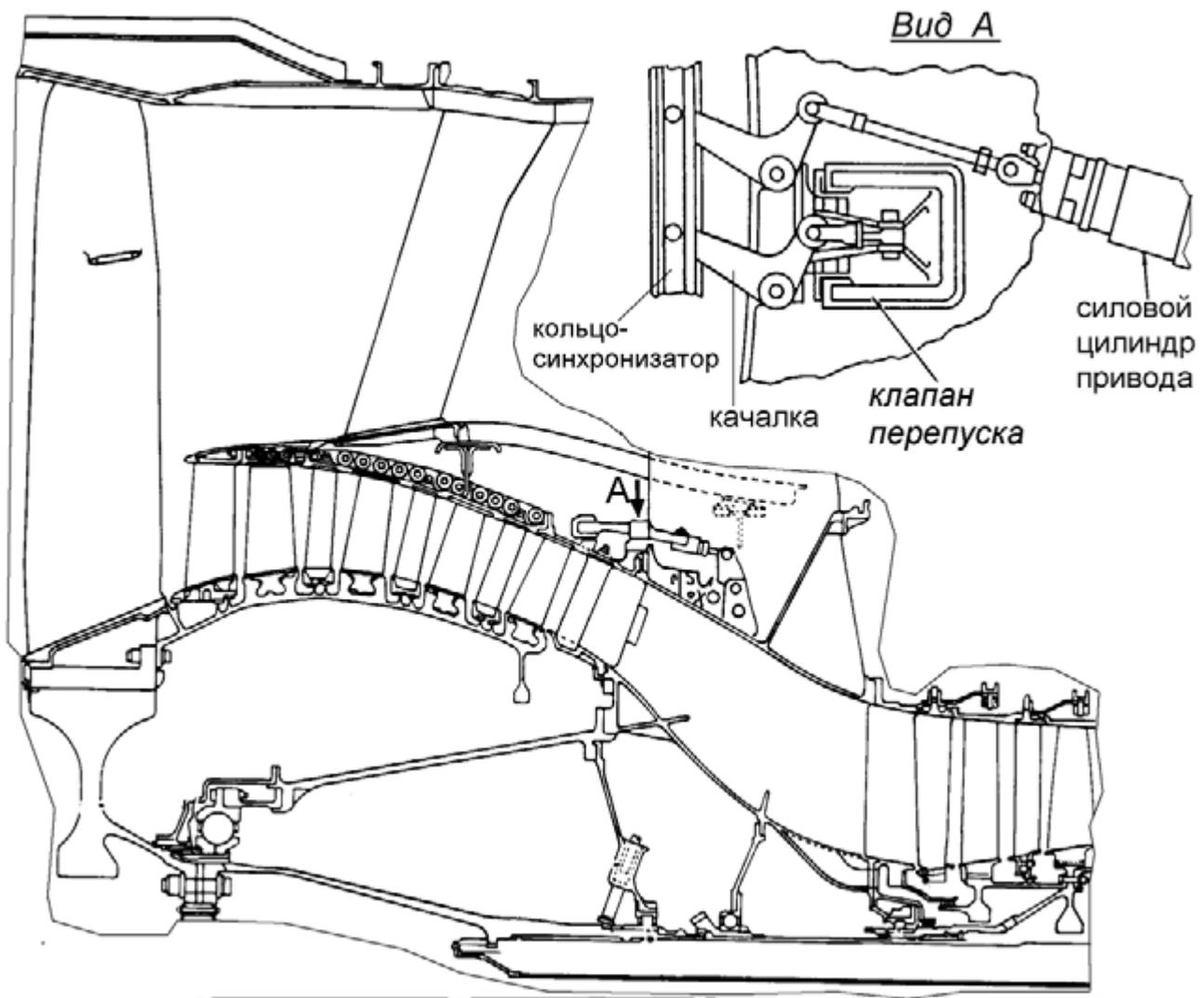


Рис. 1.7. Пример конструкции компрессора с перепуском воздуха во второй контур за подпорными ступенями

Проявление эрозии рабочих лопаток компрессора во многих двигателях (например [6], типа JT3D, JT8D, JT9D) сходно: в первых ступенях происходит

скругление передней кромки лопаток по всему размаху, а в последних ступенях местное округление происходит на тех участках, на которые попадают твердые частицы, движущиеся под воздействием центробежных сил. Однако каждый двигатель имеет и свои особенности. Так, например, в последних ступенях двигателей типа JT8D и JT9D задние кромки лопаток скругляются, а на двигателях типа JT3D - нет. Типичный процесс развития эрозии лопаток 5-12 ступеней ротора компрессора высокого давления двигателей типа JT9D протекает следующим образом: сначала постепенно уменьшается верхняя хорда у передней кромки, а затем утончается задняя кромка, что приводит к сколам. Одновременно под действием эрозии продолжает уменьшаться хорда периферийного конца лопатки, а следовательно, изменяется кривизна профиля.

В наибольшей степени эрозионному износу подвержены компрессоры вертолетных ГТД. С целью снижения износа применяют покрытие рабочих лопаток компрессоров нитридом титана, в воздухозаборнике может устанавливаться пылезащитное устройство и применяться ряд организационных мер (ограничение времени работы в пыли, утряска покрытия и увлажнение взлетно-посадочных площадок, учет направления ветра при взлете и посадке). Согласно результатам экспериментальных исследований, проведенных на ГТД Д-25В [3]: при прохождении через двигатель 100 кг пыли соответствующего летным условиям дисперсного состава степень сжатия компрессора уменьшается примерно на 8%, а КПД компрессора - на 3%. Это приводит к увеличению температуры газа за турбиной на 50-60°C и к увеличению расхода топлива на 6-8%. Повышение температуры вызывает снижение расхода воздуха через компрессор в результате теплового дросселирования. Мощность двигателя уменьшается.

Необходимо также учитывать, что абразивная пыль может также и осаждаться на рабочих лопатках (например, латеритная пыль из Юго-Восточной Азии - рыхлая, относительно безвредная по эрозионным свойствам).

Наличие в атмосферном воздухе влажных частиц глины, речного ила и других вязких компонентов также может постепенно вызвать сильное загрязнение проточной части компрессора, которое существенно ухудшает параметры двигателя, в том числе его топливную экономичность.

В этом случае для восстановления свойств компрессора осуществляют промывку проточной части синтетическими моющими средствами.

Из опыта эксплуатации авиационных двигателей следует, что практически всегда возникают условия, когда лопатки могут подвергаться различными видами коррозии (точечной, межкристаллитной, солевой, газовой и т.д.). Этому, кроме напряженности детали, способствуют внешняя среда, включая температуру; технологическая наследственность, повреждения эрозией, забоины и т.д. Проблема защиты от коррозии решается, в первую очередь, за счет правильного выбора коррозионно-стойких материалов, чему способствует широкое применение титановых и никелевых сплавов и, отчасти, коррозионно-стойких сталей. Эффективность применения защитных антикоррозионных покрытий определяется, в первую очередь, их живучестью в эрозионных условиях и стойкостью к термоциклам.

Атмосферный воздух некоторых районов (например, приморских, особенно в тропиках, или в зонах с интенсивным применением минеральных удобрений), содержит химически активные вещества, например соли морской воды, солончаковой пыли и т.п., которые являются причиной коррозии рабочих лопаток компрессора, особенно последних ступеней, где коррозия активизируется повышенными температурами. Наиболее подвержены коррозионным повреждениям тонкие выходные кромки рабочих лопаток. Коррозионные повреждения интенсивно развиваются при стоянке и хранении техники. Эти повреждения создают повышенную концентрацию напряжений и возможность развития усталостных трещин в лопатках при колебаниях. Для обеспечения высокой коррозионной стойкости на поверхность лопаток наносят защитные покрытия, разрушение которых сопровождается интенсивным развитием коррозионных процессов.

В эксплуатации стальные лопатки могут покрываться бурыми пятнами или пленкой светло-коричневого цвета, представляющими собой окислы железа. На поверхности лопаток (на спинке, входной кромке и радиусе перехода от пера к хвостовику) образуются коррозионные язвы различной глубины.

Образованию и развитию коррозионных повреждений лопаток кроме внешней среды способствуют следующие эксплуатационные факторы: высокая напряженность лопаток, повреждения эрозией, солевые или другие отложения на поверхности лопаток, вызывающие парниковый эффект при избытке ионов оксида серы или хлора.

Важным фактором в формировании коррозионной стойкости является и технологическая наследственность, определяющая основные параметры свойств поверхностного слоя.

В стальных лопатках наблюдаются межкристаллитная коррозия, или коррозия под напряжением, и локальная точечная коррозия. Чаще всего межкристаллитную коррозию обнаруживают в зоне радиуса перехода от хвостовика к профильной части лопатки, локальную точечную коррозию - на кромках лопаток.

При визуальном осмотре детали признаки коррозии могут не выявляться, но под микроскопом обнаруживаются коррозионные пятна.

Разрушение поврежденных лопаток происходит от очага в виде коррозионной раковины или язвы. В условиях агрессивной среды развитие трещин межкристаллитной коррозии идет по границам зерен под действием внешних или внутренних напряжений.

При повышенных температурах (250-500°C) в среде, содержащей ионы хлора, при действии статических нагрузок наблюдается также и солевая коррозия титановых сплавов, проявляющаяся в поверхностном растрескивании, приводящем к снижению длительной прочности и пластичности материала, уменьшению времени до появления макротрещин и увеличению скорости распространения трещин. (Подробнее-см. прил. 1.7).

Влияние на усталость коррозионных повреждений-см. прил. 1.7-1.8.

Некоторые способы защиты от коррозии-см. прил. 1.9.

В общем случае, для определения возможности использования в эксплуатации лопаток, имеющих коррозионные повреждения, необходимо выполнить условия, включающие:

периодическое (с учетом опыта эксплуатации) проведение внешнего осмотра лопаток;

наличие данных о пределах выносливости лопаток, поврежденных коррозией, и лопаток после устранения повреждений;

данные о тензометрировании лопаток и сведения о местных запасах прочности по переменным напряжениям.

Стендовые испытания двигателей и испытания на усталость проводятся для лопаток с коррозионными повреждениями, полученными только в реальной эксплуатации.

После испытаний лопаток на усталость производится анализ очагов трещины с целью определения места начала разрушения и глубины коррозионного повреждения и определяется коэффициент снижения предела выносливости.

Повреждения пера рабочих лопаток также могут быть вызваны задеванием торцев рабочих лопаток элементов статора. Особенно опасны задевания для лопаток, выполненных из титановых сплавов - возможен "титановый пожар". (Преимущества титана в качестве материала для лопаток компрессора, с точки зрения удельной прочности и сопротивления коррозии, сочетаются с опасностью загорания титана при трении, которому подвержен этот материал - при больших энергиях ротора при трении между вращающимися (рабочие лопатки) и стационарными деталями (корпус) металл может нагреваться до температур возгорания. Это характерно не только для титана: стальные детали также могут нагреваться при трении до температур, при которых сталь начинает плавиться и окисляться. Однако существенная разница между титаном и сталью состоит в том, что когда стальная лопатка обгорает настолько, что образуется зазор между трущимися деталями, горение сразу прекращается, в то время как титан при тех же условиях может продолжать гореть. Теплопроводность титана составляет примерно 20% теплопроводности стали, поэтому при подводе одинакового количества энергии местная температура титановых лопаток достигает значительно больших значений, чем стальных. При горении титановых лопаток искры от местного очага горения могут воспламенить другие лопатки, и пламя может распространиться по потоку. Окисная пленка, образующаяся при горении, которая могла бы затормозить процесс горения, будет при этом удаляться потоком воздуха в компрессоре.

В области разработки защитных покрытий для деталей компрессора достигнуты лишь частичные успехи, так как многие покрытия оказывают вредное влияние на свойства материала и неэффективны при больших повреждениях компрессора. Необходимо защищать корпус компрессора вдоль потока, чтобы предотвратить попадание огня в двигательный отсек самолета.

Наиболее распространенным способом защиты от "титанового пожара" в двигателе является нанесения окиси алюминия на поверхности корпуса статора и другие поверхности, трущиеся о лопатки ротора. Разница между промышленными титановыми сплавами в возгораемости и скорости горения незначительна. С помощью некоторых конструктивных методов можно также уменьшить, хотя и не исключить опасность пожара. Так например, наличие на кромках рабочих лопаток компрессора скосов к концу лопатки уменьшает количество тепла, выделяемого при трении или попадании сломавшихся кусков между концом лопаток и корпусом. Такой скос также уменьшает количество оплавленных частиц, попадающих в тракт, и улучшает распределение тепла от скошенной кромки к остальной части пера.)

Повреждения хвостовиков рабочих лопаток вызываются фреттинг-коррозией на площадках контакта.

Фреттинг-коррозия возникает в зонах контакта деталей, образующих пресовые или малоподвижные соединения, при циклическом их нагружении (соединение хвостовик лопатки - паз диска). Амплитуда относительного перемещения в зоне контакта деталей, достаточная для возникновения фреттинга находится в пределах деформаций поверхностного слоя, а максимальная амплитуда составляет 200-300 мкм. Внешний признак фреттинга - скопление у границы и в зоне контакта окисленных продуктов повреждения материалов сопряженных деталей. На поверхностях контакта образуются каверны, микро- и макротрещины, которые при воздействии на детали переменных напряжений становятся очагами фреттинг-усталости, снижающей предел выносливости в 2-10 раз.

Фреттинг-коррозия проявляется в замковых соединениях лопаток компрессоров и турбин, на площадках контакта антивибрационных полок лопаток компрессора и бандажных полок лопаток турбин. Наибольшие повреждения фреттинг-коррозией и разрушения от фреттинг-усталости наблюдаются на стальных деталях и деталях из титановых сплавов.

Типично разрушение хвостовиков лопаток компрессоров от фреттинг-усталости, хотя во многих случаях контактные грани хвостовиков имели защитные покрытия.

Подробнее о механизме фреттинга и его влияние на усталость - см. прил. 1.10.

Методы повышения сопротивления фреттинг-усталости - см. прил. 1.11.

Таким образом, значительное число неисправностей деталей компрессоров имеет усталостный характер. Усталостные трещины в рабочих лопатках возникают в результате увеличения вибрационных нагрузок и снижения прочностных свойств материалов под влиянием целого ряда причин (возможно случайных), отдельные из которых рассмотрены выше. Причинами усталостного разрушения деталей могут быть также не обнаруженные в производстве металлургические и технологические дефекты: пустоты и включения в материалах деталей, прижоги поверхностей (участки поверхности с неоднородными структурой и механическими свойствами материала, снижающими его предел выносливости (для титановых сплавов - на 25%) и коррозионную стойкость) при шлифовании или полировании, растягивающие остаточные напряжения, повышенное содержание водорода и склонность к хрупкому разрушению, сквозной наклеп кромок, волнистость на площадках контакта хвостовиков рабочих лопаток и т. д.

Влияние на усталость механических повреждений, остаточных напряжений, технологических факторов, защитных покрытий, конструктивного и масштабного факторов - см. прил. 1.1-1.4.

Усталость замковых соединений - см. прил. 1.5.

Методы повышения сопротивления усталости лопаток - см. прил. 1.6.

Заключая, также отметим, что в целом, согласно [5], дефекты рабочих лопаток распределяются следующим образом: 29%- конструктивные, 17% - технологические (производственные); 11% - эксплуатационные; 43% - сочетание конструктивных, технологических и эксплуатационных.

Возможны также неисправности элементов вспомогательных систем компрессоров, таких как противообледенительная и противопомпажная системы, которые, в конечном итоге, могут приводить к повреждениям рабочих лопаток.

## 2. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН

Повреждаемость и надежная работа рабочих лопаток турбин в значительной мере зависит и от работы всех элементов горячей части двигателя. Увеличение ресурса и повышение рабочих параметров в турбинах ГТД сопровождается интенсификацией процессов повреждения рабочих лопаток под действием статических и вибрационных нагрузок, высоких температур, циклических нагрузок, вызываемых действием силовых факторов, термических напряжений, коррозионного и эрозионного воздействия газового потока.

Большинство разрушений рабочих лопаток турбин, как и рабочих лопаток компрессоров, имеет усталостный характер и связано с переменными напряжениями, возникающими при колебаниях по низшим формам (которые могут вызываться в том числе пульсационным горением топлива в камере сгорания). При колебаниях по первой изгибной форме возможны также растрескивание и усталостные разрушения хвостовиков лопаток.

В ряде случаев повреждения лопаток турбин (особенно первых ступеней) могут быть объяснены особенностями распределения температуры газа на выходе из камеры сгорания - см. рис. 2.1.

Значительное влияние на повреждаемость рабочих лопаток оказывает газовая коррозия, обусловленная наличием в продуктах сгорания химически активных соединений. Наличие в топливе химически активных оксидов серы и др. приводит к образованию повреждений в лопатках турбин в виде (сульфидной) коррозии. Проблема окисления и коррозии в ряде случаев не позволяет использовать полностью ресурс работы лопатки по длительной прочности. (Даже если средняя температура охлаждаемой лопатки может быть достаточно низка, чтобы обеспечить удовлетворительную длительную прочность, то вследствие неравномерности температуры в сечении на некоторых участках лопатки

(обычно на входной и выходной кромках) температура может превысить уровень, допустимый по условиям окисления и коррозии. Проблема может быть решена изменением в системе внутреннего охлаждения и применением защитного покрытия, обеспечивающего работоспособность лопатки.)

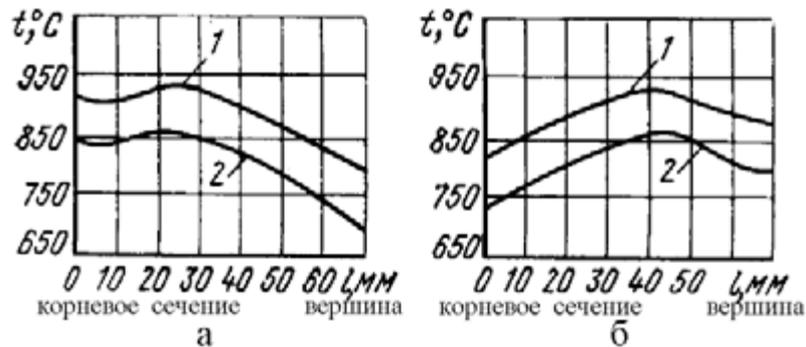


Рис. 2.1. Пример [8] изменения температуры газа на выходе из камеры сгорания по длине сопловых (для справки) и рабочих

лопаток турбины в зависимости от места подвода вторичного воздуха:

а-при равномерном расположении отверстий;

б-при неравномерном расположении отверстий (с большей частотой в области, близкой к оси двигателя);

(1-температура газа перед сопловым венцом;

2-температура газа перед рабочими лопатками)

Повреждаемость лопаток турбин связана с циклическим воздействием теплового потока и вызываемых им термических напряжений, а также действием центробежных и газовых сил и возможностью перегрева. При смене режимов работы двигателя и теплового поля возникают термомеханические напряжения в наиболее нагруженных сечениях лопатки, приводящие к термоусталостному и малоцикловому разрушениям материала. Перегрев лопаток турбины возможен и при помпаже компрессора двигателя (см. выше). Перегрев приводит к изменению структуры материала и распределения значений термоэлектродвижущей силы, регистрируемой с использованием

термоэлектрической аппаратуры - см. рис. 2.2-2.3 (подробнее- [10]). Возможно появление обгаров и прогаров.

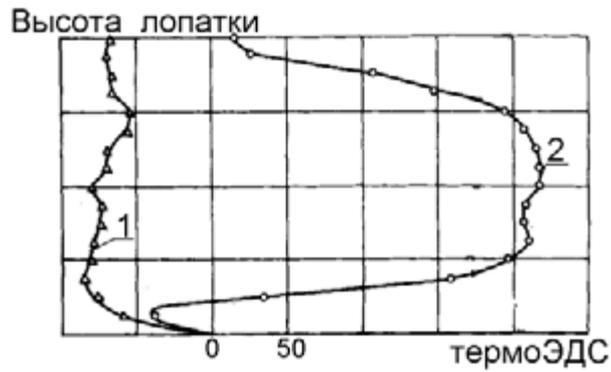


Рис. 2.2. Характер распределения значений термоЭДС вдоль выходной кромки рабочих лопаток турбины  
1-неперегретая лопатка, 2-лопатка, подвергшаяся эксплуатационному перегреву

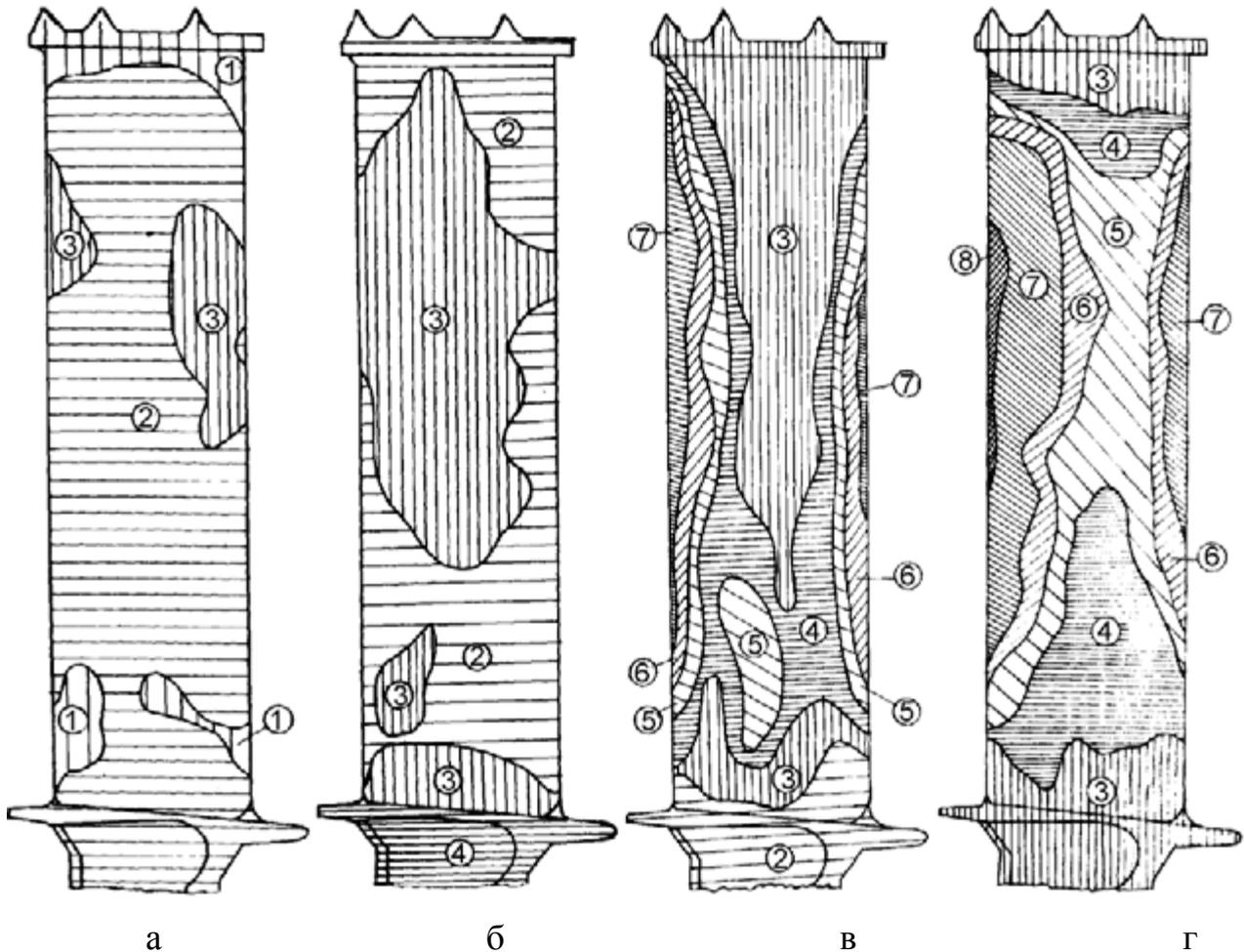


Рис. 2.3. Примеры топологии зон рабочей лопатки турбины с различным состоянием структуры материала

а-новая лопатка,

б-лопатка с наработкой 7000 ч в условиях нормальной эксплуатации,

в-лопатка двигателя, подвергшегося помпажу,  
г-лопатка турбины, подвергшейся существенному превышению температуры  
(номерама обозначены участки с одинаковыми диапазонами значений термоЭДС в  
порядке убывания абсолютных значений)

Проблема высоких температур решается, с одной стороны, повышением жаропрочности и жаростойкости применяемых материалов, с другой стороны, применением жаростойких и теплозащитных покрытий и, наконец, конструктивными методами создания специальных систем охлаждения деталей. При повышенных температурах ресурс деталей в значительной мере определяется совершенством систем охлаждения и живучестью защитных покрытий.

Возможны повреждения бандажных полок, выражающиеся в уменьшении, в процессе наработки, натяга по контактным поверхностям полок и возникновении износа и наклепа из-за появления зазора между ними. Повреждения бандажных полок приводят к снижению жесткости рабочего колеса в целом и увеличению вибронегруженности пера лопаток. В турбинах, где преобладают никелевые сплавы, фреттинг проявляется, в первую очередь, в виде повреждений площадок контакта бандажных полок лопаток турбин и контактных поверхностей замковых соединений.

Согласно [5] усталостные разрушения лопаток турбин составляют до 33%, разрушения от малоциклового усталости - около 9%, разрушения от сочетания малоциклового усталости, вибрационных напряжений - около 42% и разрушения, связанные с исчерпанием длительной прочности - 16%.

Таким образом, в общем случае, причинами разрушения лопаток турбин могут являться:

- 1) снижение предела выносливости из-за образования микротрещин в поверхностном слое, поврежденном нерегламентированной механической обработкой;
- 2) повышение амплитуды вибрационных напряжений из-за раззоровивания бандажных полок вследствие износа площадок контакта;

- 3) несоответствие натяга по бандажным полкам техническим условиям при сборке;
- 4) перегрев из-за неравномерного температурного поля перед турбиной;
- 5) нарушение условий эксплуатации;
- 6) недостаточная эффективность системы охлаждения;
- 7) повышение амплитуды вибрационных напряжений вследствие изменения условий возбуждения (прогар лопаток сопловых аппаратов, закоксованность топливных форсунок и т.п.);
- 8) неравномерность распределения нагрузки по зубьям хвостовика;
- 9) неоптимальные режимы резания профиля хвостовика;
- 10) несовершенство процессов штамповки, термообработки или литья лопаток и т. д.

Разрушения лопаток турбин по технологическим причинам составляют [5] около 25%, по несовершенству конструкции около 23%, остальные 52% приходятся на неблагоприятное сочетание конструктивных и технологических факторов.

При рассмотрении вопроса эксплуатационной повреждаемости лопаток следует учитывать, что возможна большая повреждаемость лопаток последних ступеней турбин, чем первых ступеней. Указанное объясняется тем, что лопатки последних ступеней, как правило, изготавливаются из сплавов с меньшей жаропрочностью, чем сплавы, используемые для лопаток первых ступеней. Поэтому при забросах температуры (в т.ч. при помпаже) до определенных значений возможно даже разрушение лопаток последних ступеней без разрушений лопаток первых ступеней. (Признаком того, что разрушение произошло вследствие заброса температур, а не локального изменения температурных полей в турбине или долговременного воздействия повышенных температур, считается разрушение лопаток по всей окружности рабочего колеса и примерно на одной высоте).

В иных случаях большая степень поврежденности рабочих лопаток последних ступеней турбины может быть объяснена неисправностями

камеры сгорания (изменение угла конуса распыла форсунок, коробление жаровых труб), приводящими к смещению зоны более высоких температур в направлении последних ступеней турбины.

Рассматриваемые далее примеры [5] некоторых особенностей эксплуатационных повреждений рабочих лопаток турбин обычно не сопровождаются явно выраженными внешними признаками, что затрудняет их распознавание.

Испытания на усталость лопаток первой ступени одной из турбин (сплав ХН70ВМТЮ) показали, что после наработки в эксплуатации 1000 ч предел выносливости лопаток снизился с 205 до 170 МПа.

Металлографические исследования выявили изменения структуры в поверхностном слое напряженной зоны лопатки - обеднение легирующими элементами на глубину до 50 мкм, снижение микротвердости до 20%. Анализ усталостных разрушений показал, что на лопатках после эксплуатации зона разрушений локализовалась: около 75% очагов разрушений в сечении на входной кромке, где имели место максимальные амплитуды вибрационных напряжений. Это позволяет сделать заключение, что эксплуатационные нагрузки и тепловое поле привело к релаксации остаточных напряжений и некоторому снижению прочностных свойств поверхностного слоя.

Результаты комплексных исследований лопаток турбины, изготовленных из сплава ЖС6КП, подтвердили различия в механизмах разупрочнения материала и разрушения лопаток с защитным покрытием (алитирование) и без покрытия. У лопаток, не подвергавшихся перегреву и не имевших защитного покрытия, через 100-200 ч эксплуатации обнаруживался обедненный слой глубиной 10-40 мкм с очагами микротрещин по телу и по границам зерен в виде клиньев и уширения границ. Эти повреждения с поверхности имели характер экструзии окислов. Глубина микротрещин достигала 120 мкм, но предел выносливости лопаток с такими повреждениями не снижался, разрушения происходили только в наиболее горячей зоне лопаток.

У алитированных лопаток изменений материала в опасной зоне после эксплуатации не наблюдалось, однако в более холодных сечениях образовывались сетки трещин в алитированном слое, которые получали дальнейшее развитие при испытаниях на усталость (особенно те микротрещины, которые попадали на границы зерен), а предел выносливости новых лопаток и после эксплуатации снизился на 15%.

Комплексные металлографические и прочностные исследования лопаток I ступени турбины (сплав ЖС6КП), имевших эксплуатационную наработку до 1000 ч показали, что в процессе эксплуатации в центральной зоне профильной части по высоте и в поперечном сечении лопатки появляется структурная и прочностная неоднородность материала. Наибольшие изменения в состоянии материала имели место на входной кромках средней зоны пера. Протяженность этой зоны составляла около 40% высоты профиля лопатки. В остальных зонах по высоте лопатки структурное состояние материала и прочность соответствовали исходным.

Механизм разупрочнения материала лопаток может быть описан следующим образом. В горячей зоне алитированного слоя происходит уменьшение содержания алюминия и рекристаллизация поверхностного слоя лопатки. Во второй зоне выделяется никель-алюминиевая фаза и происходит коагуляция  $\gamma'$ -фазы. Обоеднение основного металла легирующими элементами (хром, вольфрам, молибден) происходит вследствие диффузии в алитированный слой. Этот процесс развивается в первую очередь по границам зерен, где карбидная фаза растворяется. Одновременно между алитированным слоем и основным материалом формируется прослойка, содержащая фазу игольчатого типа. Общая толщина слоя с признаками изменения структуры и химического состава достигает 100-150 мкм при толщине алитированного слоя 30-40 мкм и толщине прослойки, содержащей игольчатую фазу, около 10 мкм. На входной кромке в горячей зоне лопаток задолго до разрушения образуются единичные микропоры, которые скапливаются под алитированным слоем по границам основного материала. По мере наработки микропоры сливаются в микротрещины, длина которых составляла 20-60 мкм после эксплуатации в течение 2000-6000 ч и 200-300 мкм после 6000-7000 ч. Эти трещины развивались в основном материале, не выходя на поверхность лопатки.

Изменение структуры поверхностного слоя сопровождается снижением уровня остаточных напряжений практически до нуля, а также снижением пластических свойств материала. Результаты испытаний на усталость большого числа лопаток после эксплуатации в течение 3000-8000 ч не позволили сделать однозначный вывод о влиянии наработки на предел выносливости. Разброс значений предела выносливости составил от 160 до 230 МПа. Зоны образования усталостных трещин не совпадали с зонами максимального разупрочнения материала лопатки.

Существенное влияние на несущую способность лопаток турбин оказывает высокотемпературная газовая коррозия. С повышением содержания в топливе серы до 1% долговечность лопаток снижается в два раза.

Металлографические исследования и испытания на усталость охлаждаемых лопаток I ступени турбины, для которых характерны значительные градиенты температур по толщине стенки лопатки, вызывающие дополнительные термоциклические напряжения, позволили установить, что зона опасных повреждений кромок (выходных) распространяется практически по всей высоте профильной части лопатки.

Повышение пластичности материала охлаждаемых лопаток (например, замена сплава ЖС6УВИ на ЖС26ВСНК) и применение многокомпонентных защитных покрытий позволяет практически исключить снижение предела выносливости охлаждаемых лопаток при колебаниях по основному тону.

Исследования охлаждаемых лопаток одного из турбовинтовых двигателей [5] выявили в качестве основного повреждающего фактора - тепловое воздействие, сопровождающееся отслоением и оплавлением покрытия, под которым обычно образовывались микротрещины.

Наиболее эффективным в этом случае мероприятием по повышению надежности лопаток является стабилизация температурного поля, предотвращение возможных забросов температуры при смене режимов работы двигателя и применение жаростойких защитных или теплозащитных покрытий. Сравнительные испытания лопаток с различными защитными покрытиями показали, что наибольшей сопротивляемостью термоциклическим ударам обладает покрытие Никель-Хром-Алюминий-Иттрий.

В процессе проектирования двигателя, как правило, проводится оценка долговечности рабочих лопаток турбин с учетом предполагаемых условий эксплуатации.

При этом срок службы лопаток обычно оценивается по данным анализа длительной прочности деталей, их термической усталости, окисления и коррозии. Однако достаточно часто действительные условия эксплуатации двигателей отличаются от предполагаемых в связи, например, с изменением программ и профилей полета. Значительный интерес представляют результаты исследования зависимости срока службы лопаток турбины от условий эксплуатации двигателя. В ряде исследований были получены данные,

позволяющие указать способы уменьшения зависимости срока службы от условий эксплуатации, отличающихся от предполагаемых при проектировании двигателя [6].

Основным элементом стоимости жизненного цикла двигателя являются эксплуатационные и ремонтные расходы, которые зависят от характеристик долговечности двигателя. В идеальном случае при правильном определении программы полетов и их последовательности в начале проектирования конструкция двигателя может быть разработана и рассчитана на определенные срок службы и стоимость жизненного цикла. Однако срок службы двигателя в сильной степени зависит от условий его применения - фактическое применение двигателя часто отличается от предполагаемого, заложенного при проектировании, что, в большинстве случаев, приводит к сокращению расчетного срока службы.

При изучении того, каким образом изменение условий эксплуатации влияет на срок службы двигателя должны быть учтены особенности постоянных и переходных режимов в разных вариантах использования и их влияние на долговечность лопаток.

Долговечность турбинных лопаток в условиях работы на установившемся режиме в определенных пределах является функцией температуры охлаждающего воздуха. Долговечность турбинных лопаток на установившихся режимах определяется ползучестью (длительной прочностью) и окислением или эрозией поверхности лопаток. Ползучесть вызывает отказ в результате разрушения или вытяжки материала сверх допустимых пределов. Окисление или эрозия вызывает отказ вследствие износа покрытий и основного материала лопатки.

Ползучесть и коррозионно-эрозионные явления на установившемся режиме зависят от температуры металла, величина которой определяется условиями эксплуатации двигателя.

На рис. 2.4 показана логарифмическая зависимость долговечности от температуры при разных величинах стационарных напряжений. Повышение

температуры металла на  $17^{\circ}\text{C}$  приводит к снижению долговечности по условию длительного статического разрушения в два раза. Долговечность по условию эрозионного повреждения изменяется в два раза при изменении температуры металла на  $39^{\circ}\text{C}$ .

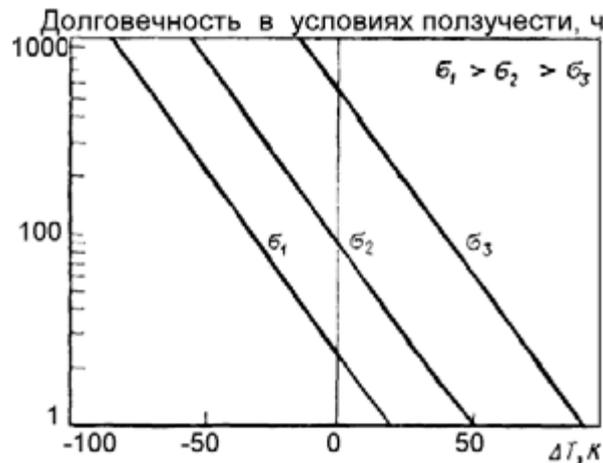


Рис. 2.4. Зависимость долговечности лопатки турбины от температуры металла при различных уровнях напряжений

Зависимость долговечности по условию длительной прочности и эрозии от тяги показана на рис. 2.5. Быстрое увеличение сопротивления ползучести и эрозии наблюдается при понижении температуры металла, а в случае ползучести - при понижении частоты вращения ротора или уровня напряжений. На промежуточном режиме (при 50% тяги от взлетной) долговечность по эрозии увеличивается примерно в сто раз.

Рис. 2.5. Зависимость долговечности по условию длительной прочности разрушения от величины тяги  
(1- длительная прочность (ползучесть), 2-эрозия)

(Срок службы неохлаждаемой лопатки с учетом ползучести является функцией материала лопатки и уровней температуры и напряжения лопатки. В охлаждаемой лопатке возникают большие перепады температуры, в результате чего появляются существенные температурные напряжения (см. подробнее ниже), которые могут в несколько раз превысить напряжения от воздействия центробежных сил. Это происходит от того, что в более холодных частях лопатки (средняя часть) возникают высокие напряжения растяжения, а в более горячих частях лопатки (входная и выходная кромки) - низкие напряжения растяжения или даже напряжения сжатия. Однако с течением времени большие напряжения растяжения снижаются вследствие ползучести, а сжимающие напряжения также становятся меньше и даже могут изменить знак. Указанные особенности нагружения затрудняют определение срока службы лопатки. Существуют программы, по которым рассчитываются температурные напряжения и определяется срок службы лопатки на ползучесть, а также место поломки лопатки. При этом сначала определяют положения опасного сечения лопатки и ресурс работы лопатки на базе простой оценки длительной прочности (пример-см. рис. 2.6).

Расчетное опасное поперечное сечение лопатки затем разбивают на несколько сотен квадратных элементов, температуры которых принимаются в соответствии с

известной температурой на поверхности лопатки и известным тепловым потоком в лопатку (пример для случая рис. 2.6 - см. рис. 2.7).

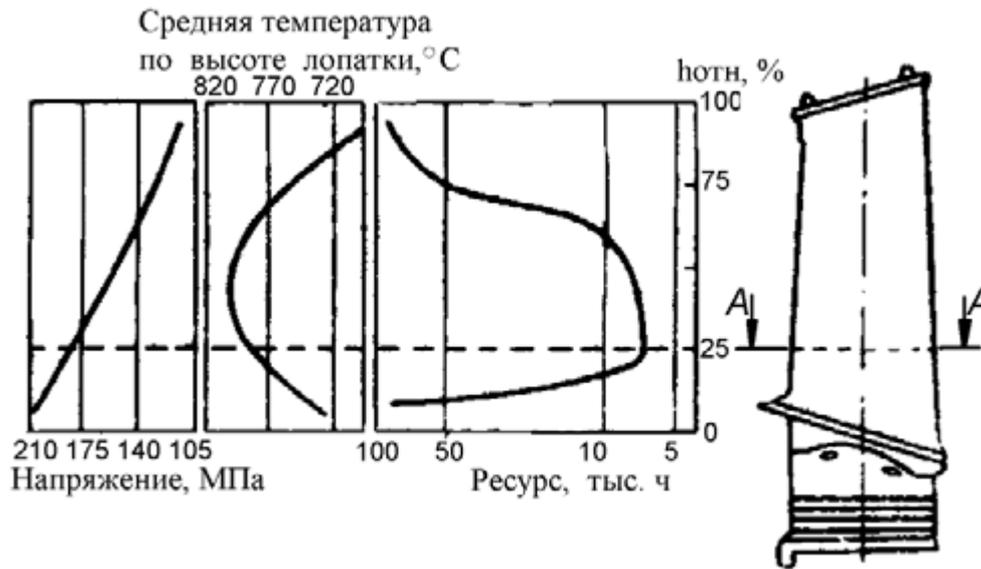


Рис. 2.6. Пример распределения температуры, напряжения по высоте рабочей лопатки

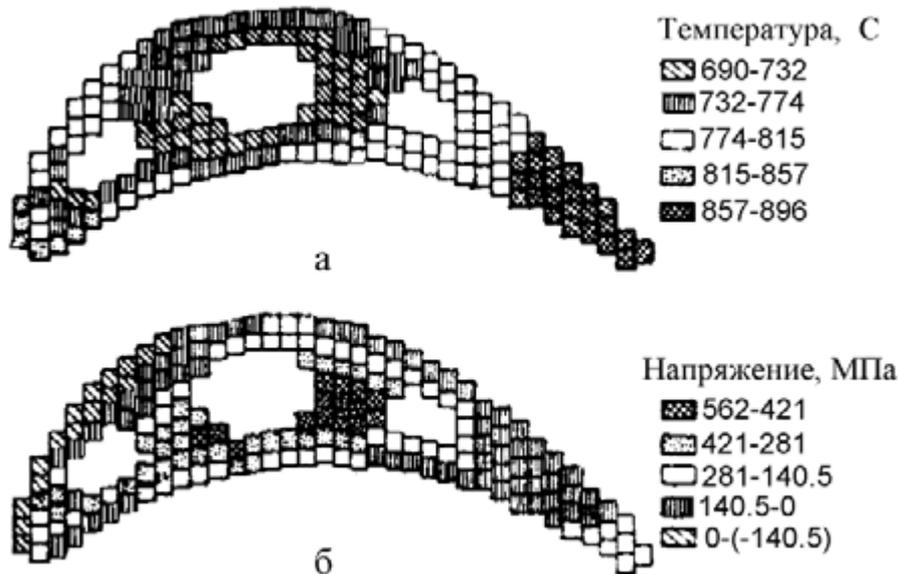


Рис. 2.7. Пример распределения суммарных напряжений по опасному сечению рабочей лопатки турбины ТРДД (сечение "А-А" на рис. 2.7)

а-распределение температуры;

б-начальное распределение напряжения в первый момент времени

Распределение суммарных напряжений (т. е. напряжений от действия

центробежной силы и температуры) для нулевого момента времени дано на рис. 2.7. Напряжения вычислялись по теории упругости, как если бы еще не было явлений ползучести.

Как можно видеть, холодные части лопатки находятся под воздействием напряжений растяжения, в то время как более горячие части лопатки испытывают сжимающие напряжения.

С течением времени вследствие появления ползучести происходит общее снижение уровня напряжений. Этот процесс продолжается до тех пор, пока общая величина деформации в каком-нибудь элементе не достигает значения, определяемого пределом для длительной прочности материала лопатки. Когда ползучесть в каком-то элементе достигает этого значения, то лопатка к этому времени считается разрушенной.

Ресурс лопатки, определенный с учетом термических напряжений, составил для рассматриваемого примера лишь 23% ресурса работы лопатки, вычисленного на основе средней температуры в сечении лопатки и среднего напряжения. Это снижение срока службы лопатки подчеркивает дезориентирующий характер упрощенного расчета ресурса охлаждаемых лопаток.)

Срок службы на установившемся режиме вследствие его чувствительности к незначительным изменениям температуры металла зависит от увеличения расхода охлаждающего воздуха. Однако удельный расход топлива возрастает с увеличением расхода охлаждающего воздуха из-за ухудшения термического КПД цикла.

Быстрый разгон (приемистость) или торможение двигателя приводит к возникновению высоких циклических температурных напряжений, особенно в охлаждаемых лопатках. Механизм разрушения определяется взаимодействием ползучести и усталости в материале, приводящим к появлению трещин, которые обычно начинаются на поверхности лопатки и распространяются внутрь ее. Разрушения определяются совместным действием нагрузок от центробежных и газовых сил и термическими нагрузками. Термические напряжения образуются вследствие неравномерного нагревания и охлаждения лопатки на переходных режимах.

Характеристики переходного режима определяют его роль в циклической долговечности рабочих лопаток турбин. Особенно важными параметрами цикла являются скорости изменения по времени температуры газа на входе и величина перепада температуры. Интенсивность малоциклового нагружения связана, таким образом, с приемистостью двигателя. Величина перепада между параметрами режимов также влияет на долговечность в циклах. Действительно, переход от режима малого газа до взлетного является более жестким, чем переход от 90% до взлетного режима.

Физические характеристики рабочей лопатки, а именно: схема охлаждения, распределение толщин стенок, тип материала и состав покрытий, имеют принципиальное значение для сопротивления малоцикловой усталости лопатки, поскольку от этих характеристик зависит уровень местных напряжений.

Выбранная схема охлаждения также оказывает влияние на распределение местных напряжений в лопатках и возникновение малоцикловой усталости материала.

Толщина стенок также непосредственно связана с распределением температур, в частности, со скоростью изменения местных температур на переходном режиме. Иногда выгодно увеличить местную толщину стенки и, следовательно, уменьшить скорость изменения температур в этом месте с тем, чтобы сохранить более равномерным распределение температур в лопатках на переходном режиме.

Термическая усталость определяет вид потери работоспособности, наступающей вследствие быстрой, периодически возникающей смены температуры. Во время быстрого нагревания в горячих слоях поверхности лопатки возникают сжимающие напряжения, достаточно большие, чтобы вызвать пластическую текучесть материала, в то время как средняя часть лопатки еще сравнительно холодная. Когда нагревается средняя часть лопатки, сжимающие напряжения на поверхности изменяют свой знак и там появляются остаточные напряжения растяжения. Напряжения растяжения возникают при максимальной температуре цикла, с повторением цикла под действием напряжений появляются

межкристаллические трещины (трещины вследствие усталости от термических нагрузок) в поверхностных слоях материала лопаток, обычно у кромок.

На переменных режимах при наличии значительного градиента температур в кромках и средней части лопатки также возникают температурные напряжения, противоположные по знаку (см. рис. 2.8).

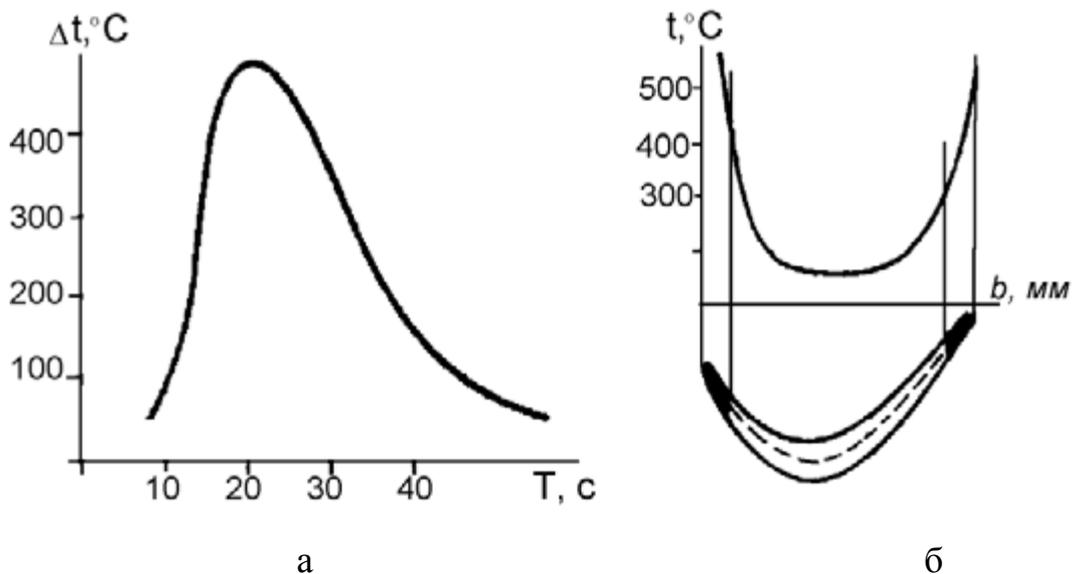


Рис. 2.8. Пример [2] особенностей температурного нагружения лопаток турбины при запуске

а-изменение градиента (разности) температур кромок и средней части лопатки;  
б-изменение температуры вдоль хорды лопатки

При анализе повреждаемости рабочих лопаток турбин по причине термической усталости и выработке способов ее снижения в общем случае следует учитывать:

- при одном и том же градиенте температур кромок и средней части лопатки напряжения в кромках всегда больше, чем в средней части;

- при запуске двигателя в кромках возникают напряжения сжатия, способные, в некоторых случаях, вызвать потерю их устойчивости;

- при останове двигателя на кромках возникают напряжения растяжения тем большие, чем выше режим, с которого происходит выключение;

- при значительном градиенте температур возникающие температурные

напряжения могут превысить предел упругости и при многократном повторении способны вызвать разрушение (образование трещины) по типу малоциклового усталости;

-величину напряжений можно снизить путем снижения градиента температур за счет более плавного нарастания подачи топлива при запуске, охлаждения двигателя на пониженном режиме перед его выключением, а также рядом конструктивных мероприятий (плёночное охлаждение кромок, тепловая изоляция кромок от газового потока, применение пустотелых неохлаждаемых лопаток).

В зависимости от выбора материала и покрытий циклическая долговечность может повыситься до 10 раз благодаря более высокой пластичности материала. Обычно стоимость материала и масса лопатки увеличиваются при применении материалов с повышенной пластичностью.

В отличие от сравнительно несложных способов увеличения долговечности на установившихся режимах для повышения сопротивления малоциклового усталости лопаток требуются фундаментальные изменения, а именно: замена материала, подбор соответствующего покрытия, схемы охлаждения и конфигурации детали.

Однако следует учитывать, что изменения, необходимые для повышения циклической долговечности рабочих лопаток могут оказать воздействие на остальную часть роторной системы.

Например, изменение материала, приводящее к увеличению массы лопатки, требует изменений в конструкции диска, чтобы компенсировать возросшие центробежные нагрузки и т.п.

## КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УСТАЛОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК

Примечание.

В прил. 1 использованы результаты исследований и сведения [5].

### *П. 1.1. Влияние на усталость рабочих лопаток остаточных напряжений (на примере лопаток из титановых сплавов)*

Анализ сведений о параметрах поверхностного слоя после различных видов обработки и данные о пределах выносливости лопаток компрессоров из титановых сплавов ВТ3-1 и ВТ8, позволяет заключить, что при одинаковой шероховатости поверхности вклад остаточных напряжений сжатия в повышение предела выносливости оказывается выше, чем вклад шероховатости: напряжения сжатия более 400 МПа могут, как и на стальных лопатках, компенсировать снижение шероховатости поверхности на 1-2 класса.

Исследования остаточных напряжений в лопатках, подвергавшихся механической обработке, виброгалтовке и стабилизирующему отпуску, показали, что после окончательной механической обработки в поверхностном слое образуются сжимающие остаточные напряжения 200-300 МПа с глубиной залегания 60-70 мкм. После виброгалтовки сжимающие напряжения достигают 400-500 МПа при глубине залегания 100-150 мкм. Стабилизирующий отпуск практически устраняет остаточные напряжения, а последующая глянецовка способствует образованию умеренных (до 300 МПа) сжимающих напряжений с глубиной залегания 10-20 мкм и росту предела выносливости почти на 70 %.

### *П. 1.2. Влияние на усталость рабочих лопаток технологических факторов*

Сопротивление усталости лопаток в значительной мере определяется совершенством процесса их изготовления. Особенно сложен и нестабилен процесс литья. Он сопровождается металлургическими дефектами в виде окисных плен, засоров, рыхлот, горячих трещин, образованием продольной полосчатости. Возможны также отклонения, связанные с деформацией стержня и т.д. Виды и количество дефектов определяются качеством шихты, огнеупоров для формы и стержня, материалом модельной массы, стабильностью температуры заливки металла, глубиной вакуума, условиями кристаллизации и др. Важное значение имеют также конфигурация и размеры лопатки, конструкция литниковой системы. Следствием нестабильности процесса литья является большая неоднородность размеров зерна в

различных зонах лопатки (у кромок, в зоне хвостовика и т. д.). Мелкозернистая структура на поверхности лопатки повышает сопротивление усталости, что достигается модифицированием структуры поверхности путем ввода в первый слой литейной формы алюмината кобальта, частицы которого играют роль центров кристаллизации (модификаторы) при остывании сплава. Для модифицированных лопаток характерна равномерная столбчатая мелкозернистая макроструктура.

Сопротивление усталости у литых лопаток также определяется состоянием поверхностного слоя (определяется видом обработки: пескоструйная очистка литейной поверхности, обработка абразивными и полировка войлочными кругами).

Наиболее насыщены дефектами литейная и полированная поверхности. Наименьшие плотности и размеры дефектов характерны для поверхности, подвергнутой виброшлифованию с последующей ультразвуковой промывкой, уменьшающему содержание на поверхности нежелательных химических примесей и загрязнений.

В настоящее время широко распространено литье лопаток методом направленной кристаллизации, когда в лопатке образуется несколько зерен, вытянутых вдоль ее оси. Это повышает пластичность сплава во всем диапазоне температур, но несколько снижает жаропрочность, проявляется анизотропность свойств материала. Для литья лопаток с направленной кристаллизацией используют сплавы, которые применяются в сочетании с многокомпонентными покрытиями на внешней поверхности и с хромоалитированием внутренних полостей лопаток. Изготовление лопаток с направленной кристаллизацией или монокристаллических позволяет стабилизировать технологический процесс литья, повысить сопротивление длительному статическому или термоциклическому разрушению.

### *П. 1.3. Влияние на усталость рабочих лопаток защитных покрытий*

Сопротивление усталости лопаток из деформируемых сплавов после алитирования снижается на 5-35 % (в зависимости от рабочей температуры и размера лопатки), что объясняется низкой пластичностью алюминидов никеля. Такое покрытие толщиной 30 мкм растрескивается при деформации, равной 0.3 %. С повышением температуры пластичность алюминидов увеличивается. Покрытия системы Никель-Хром в тех же условиях выдерживают деформации 0.5-0.7 %.

С увеличением размеров лопаток влияние алитирования на усталость уменьшается, что, в первую очередь, связано с уменьшением относительной толщины алитированного слоя на кромках.

### *П. 1.4. Влияние на усталость рабочих лопаток конструктивного и*

## *масштабного факторов*

Для лопаток компрессоров, получаемых из поковок, предел выносливости зависит в первую очередь не от геометрических параметров, а от технологии изготовления и, в частности, способа получения заготовки, формирующего структурное состояние титановых сплавов и сталей.

С увеличением высоты литых лопаток турбин в 2-2.5 раза предел выносливости снижается в 1.5-2 раза, при этом рассеяние предела выносливости для одного типоразмера лопатки составляет  $\pm 25 \%$ .

Для литых лопаток важное значение играет система охлаждения. Так, замена (на лопатках с одинаковыми параметрами профильной части) системы охлаждения в виде продольных каналов на штырьковую снижает предел выносливости на 70-100 МПа, а очаги усталостных трещин перемещаются с наружной на внутреннюю поверхность к основанию штырьков, где концентрация напряжений составляет. Этому также способствует значительная шероховатость внутренней поверхности по сравнению с внешней. Для лопаток с перфорацией на кромках (для выхода охлаждающего воздуха) также наблюдается снижение предела выносливости, что вызывается образованием на поверхности отверстий слоя, обедненного легирующими элементами (при электроискровой обработке).

В профильной части охлаждаемых лопаток, особенно дефлекторных, в эксплуатации могут возбуждаться и формы колебаний, свойственные тонкостенным деталям типа оболочки.

### *П. 1.5. Усталость замковых соединений рабочих лопаток*

На практике, как правило, отсутствуют статические разрушения замковых соединений рабочих лопаток компрессора и турбины при условии, если в процессе изготовления деталей не допущены грубые технологические отклонения, сопровождающиеся резким снижением механических свойств материала. Но оптимально спроектированные по статической прочности диски и замковые соединения могут не обладать необходимой несущей способностью при переменных напряжениях даже при запасе по статической прочности более трех.

При работе рабочие лопатки подвергаются воздействию силового поля, создаваемого центробежными силами, а при взаимодействии с воздушным потоком - вынужденным или резонансным колебаниям различной интенсивности, которые в конечном счете воспринимаются замковым соединением.

На тяжелых режимах работы в зонах концентрации напряжений замковых соединений, особенно первых ступеней, могут возникнуть пластические деформации.

Рабочие лопатки компрессоров чаще всего соединяются с дисками при помощи замков типа "ласточкин хвост", обеспечивающих простую и надежную сборку.

Лопатки последней ступени компрессора низкого давления могут иметь шарнирный замок, а крупногабаритные лопатки первых ступеней компрессора низкого давления - двузубый или трезубый елочный замок.

Исследования причин снижения сопротивления усталости замковых соединений типа "ласточкин хвост" показали, что при действии переменных и циклических нагрузок усталостное разрушение вызывается фреттинг-коррозией, развивающейся на контактных гранях хвостовиков и дисков.

Сопротивление усталости малоразмерных хвостовиков выше. Это объясняется более низкими значениями концентрации напряжений, которые удается реализовать в малоразмерных хвостовиках и влиянием масштабного фактора, что наиболее характерно для лопаток их деформируемых сплавов.

### *П. 1.6. Некоторые способы повышения сопротивления усталости рабочих лопаток*

Одним из способов повышения сопротивления усталости компрессорных лопаток является поверхностное упрочнение. Из упрочняющих обработок наибольшее распространение получила виброгалтовка, которая применяется одновременно с виброшлифованием. Виброгалтовка рекомендуется для малоразмерных лопаток и лопаток с острыми кромками, так как другие способы упрочнения оказываются для них грубыми, повреждающими кромки. Шероховатость поверхности детали после виброгалтовки изменяется с 0.6 до 0.16 мкм. К недостаткам операции следует отнести малую степень наклепа поверхностного слоя и значительную длительность процесса, достигающую 30 мин и более. Поверхностно упрочняющие обработки, не меняя характера кривой усталости, могут увеличивать долговечность и предел выносливости.

В лопатках компрессора, имеющих тонкие кромки, достичь значительного повышения предела выносливости за счет применения интенсивных способов поверхностного упрочнения не удастся, а в некоторых случаях при толщине кромок 0.2-0.3 мм имеет место снижение сопротивления усталости за счет повреждения кромок из-за сквозного наклепа, способствующего снижению пластических свойств материала. Избежать этого недостатка удастся применением в качестве упрочнителя стеклянных микрошариков.

Уменьшения отрицательного влияния механической обработки на сопротивление усталости можно добиться применением электрохимического фрезерования вместо механического, введением в технологический процесс виброшлифования и поверхностно упрочняющих обработок, а также применением стабилизирующей термической обработки окончательно изготовленных лопаток. Вальцевание с использованием предварительно, шлифованных заготовок, высокоскоростная штамповка с виброшлифованием могут существенно повысить предел выносливости.

Хотя поверхностное упрочнение и способствует выравниванию механических свойств поверхностного слоя детали, однако разброс значений долговечности может быть неудовлетворительным, так как поверхностное упрочнение не может устранить влияние локальных структурных дефектов поверхностного слоя. Положительные результаты (как для стальных, так и титановых лопаток) могут быть получены при применении стабилизирующего отпуска.

Для литых лопаток турбин с поликристаллической структурой повышение сопротивления усталости достигается за счет соблюдения технологии литья и модифицирования структуры как наружных, так и внутренних поверхностей лопаток. С повышением рабочих температур лопаток до 900-950°C измельчение зерна сопровождается снижением длительной прочности и циклической долговечности.

В процессе кристаллизации сплава в охлаждаемых лопатках обычно формируются значительные по величине объемные остаточные напряжения, которые могут приводить к образованию дефектов в виде микротрещин, особенно во внутренней полости лопаток в зонах завихрителей, штырьков и т.п.

Для повышения сопротивления усталости лопаток строго регламентируют режим обработки выходных кромок, не допуская сквозного наклепа кромок.

Применение поверхностного упрочнения для профильных частей лопаток всегда сопровождается снижением предела выносливости. Применение современных многокомпонентных защитных покрытий либо не снижает, либо несколько повышает сопротивление усталости лопаток, что, в первую очередь, зависит от качества поверхности перед нанесением покрытий.

Изготовление лопаток методом направленной кристаллизации существенно стабилизирует процесс литья, повышает пластичность сплавов, а предел выносливости лопаток остается стабильным в широком диапазоне температур 20-950°C.

### *П. 1.7. Солевая коррозия титановых сплавов*

При повышенных температурах (250-500°C) в среде, содержащей ионы хлора, при действии статических нагрузок наблюдается поверхностное растрескивание титановых сплавов, приводящее к снижению длительной прочности и пластичности материала. В поверхности изломов возникают характерные признаки хрупкого разрушения материала с типичным рисунком скола. На хрупком изломе видны признаки растрескивания.

Сильное влияние на пластические свойства оказывают скорость нагружения, температура и величина статической составляющей. Наибольшее охрупчивание возникает при наличии концентрации напряжений, понижении температуры испытания и снижении скорости нагружения. Одной из причин охрупчивания титановых сплавов в солевой среде является наводороживание. Наибольшая концентрация водорода в 4-6 раз больше нормы наблюдается

в местах концентрации напряжений (надрезах, галтелях и др.). Исследования, проведенные на сплаве системы Титан-Алюминий-Ванадий в условиях солевой коррозии, показали, что чувствительность к солевой коррозии увеличивается при содержании алюминия в сплаве сверх 4%.

Исследования, выполненные на сплавах ВТ6, ВТ3-1 и ВТ8, показали, что солевая коррозия способствует снижению усталости и долговечности, уменьшая время до появления макротрещин и увеличивая скорость распространения трещин.

### *П. 1.8. Влияние коррозионных повреждений на усталость рабочих лопаток*

Испытания лопаток из стали 14X17H2 после эксплуатации их в агрессивной коррозионной среде показали, что предел выносливости снижается в 1.7-2.35 раза.

Наибольшей сопротивляемостью коррозионным повреждениям из сталей мартенситного класса обладает стали, подвергнутые высокотемпературному отпуску и имеющие защитное покрытие Никель-Кадмий.

### *П. 1.9. Некоторые способы защиты рабочих лопаток от коррозии*

Для защиты от коррозии используются гальванические покрытия из никеля, хрома, кадмия, титана, цинка, меди, а также алитирование и др. Эффективность покрытий прямо пропорциональна толщине их слоя. В агрессивной среде для стальных деталей необходимо покрытие толщиной не менее 25-50 мкм, а в обычных атмосферных условиях толщина покрытия может быть уменьшена до 13-15 мкм. В приморских районах не рекомендуется применение фосфатирования и оксидирования как нестойких покрытий. Нецелесообразно также применение пористых покрытий.

Сопротивляемость коррозии коррозионно-стойких сталей мартенситного класса с учетом технологической наследственности можно повысить за счет повышения температурного отпуска.

На частях лопаток, поверхность которых при работе наиболее подвергается эрозии (входные кромки и корыто лопаток), покрытия быстро разрушаются, а недостаточная адгезия покрытий приводит к развитию под ними точечной коррозии. Для повышения предела выносливости лопаток ГТД, подверженных коррозионному повреждению, применяется поверхностное упрочнение профиля лопаток гидродробеструйной обработкой, гидрогалтовкой, виброгалтовкой или ультразвуком.

Для защиты лопаток от коррозии применяют покрытия типа ЭП586 на основе эпоксидных смол, гальванические покрытия типа Никель-Кадмий и др. Но эти покрытия плохо сопротивляются эрозии, а поверхности с нарушенным покрытием корродируют. Недостатком

неметаллических покрытий является их значительная толщина (около 100 мкм) и невысокая температура применения (до 300°C). Общим недостатком металлических покрытий, наносимых обычно гальваническим способом, является некоторое снижение предела выносливости детали.

В настоящее время разработаны технологические операции, применение которых уменьшает отрицательное влияние покрытий. К ним относится термодиффузионный отжиг деталей с Никель-Кадмиевым покрытием, который не снижает предел выносливости лопаток из коррозионно-стойких сталей при нормальной температуре и способствует его сохранению даже после эксплуатации изделий и при наличии на лопатках эрозийных повреждений. Применение покрытия Никель-Кадмий с термодиффузионным отжигом не снижает предел выносливости при наличии забоин.

В последнее время для повышения коррозионно-эрозийной стойкости стальных лопаток компрессора, изготовленных из сталей типа 13X11H2B22ММФ-III, 14X12H2M2ФАБ-III, применяется низкотемпературное алитирование силикатно-фосфатной пленкой. Для предотвращения коррозионных повреждений при эксплуатации в условиях морского климата эффективны мероприятия: промывка пресной водой; консервация специальной эмульсией АКОР; при длительных стоянках делаются периодические запуски с последующей консервацией двигателя.

#### *П. 1.10. Механизм фреттинга и его влияние на усталость рабочих лопаток*

Механизм фреттинга неоднозначен, так как связан с физико-химическими процессами, протекающими на молекулярном уровне, и с физико-механическими процессами в субмикроскопических, микроскопических и макроскопических объемах поверхностного слоя контактирующих деталей.

С одной стороны, результатом взаимодействия контактирующих поверхностей при циклическом нагружении является образование, вследствие разрушения элементарных "мостиков сварки", мельчайших частиц материала, которые интенсивно окисляются в присутствии даже следов кислорода, образуя такие виды окислов, появление которых не может являться результатом химического взаимодействия металла с кислородом в обычных условиях. Если твердость образовавшихся окислов ниже твердости основного материала, то они играют роль своеобразной смазки, устраняя прямой контакт взаимодействующих поверхностей. Если твердость окислов выше, то они, как абразив, интенсифицируют процессы износа. Степень повреждения контактирующих поверхностей зависит от основных параметров процесса: давления в зоне контакта, амплитуды относительных перемещений,

частоты перемещений, от исходных механических, физических и химических свойств материала взаимодействующих тел и от химической активности окружающей среды.

### *П. 1.11. Методы повышения сопротивления фреттинг-усталости*

Повреждение поверхностей контакта связано с рядом факторов определяющих процесс фреттинг-коррозии, которые действуют одновременно во взаимосвязи, образуя единый механизм механо-физико-химических процессов. Роль каждого из факторов в частном случае проявляется по-разному, что затрудняет разработку универсальных методов борьбы с фреттинг-коррозией.

К мероприятиям, уменьшающим амплитуду относительных перемещений, можно отнести конструктивные решения, включающие для пресовых соединений увеличение натяга, а для малоподвижных соединений - повышение демпфирующих свойств конструкции, способствующих снижению переменных напряжений. Основными способами, способствующими повышению сопротивления фреттинг-коррозии и фреттинг-усталости деталей, являются: поверхностные упрочняющие обработки, включающие поверхностное пластическое упрочнение, или химико-термические обработки; повышение термодинамической стабильности поверхностного слоя за счет его физико-химической модификации, нанесение изоляционных покрытий; изменение коэффициента трения в зоне контакта за счет применения твердых смазок на основе дисульфидомолибдена типа ВАП, гальванических или диффузионных покрытий; подбор контактирующих пар материалов и защитных покрытий, играющих роль протектора и препятствующих электрохимической коррозии материала в зоне контакта.

Для деталей ГТД, эксплуатирующихся при температурах, не превышающих температуру старения материала, наиболее эффективными являются поверхностные упрочняющие обработки в сочетании с антифрикционными покрытиями.

Для повышения износостойкости антивибрационных полок лопаток применяют детонационное напыление площадок контакта. Однако повышая износостойкость, процесс напыления почти в два раза снижает предел выносливости, что соизмеримо с повреждением материала фреттинг-коррозией.

## Приложение 2

### ОГРАНИЧЕНИЯ ПО ЗАБОИНАМ НА РАБОЧИХ ЛОПАТКАХ

1 и 2 СТУПЕНЕЙ КНД ДВИГАТЕЛЯ НК-8-2У [7.1]

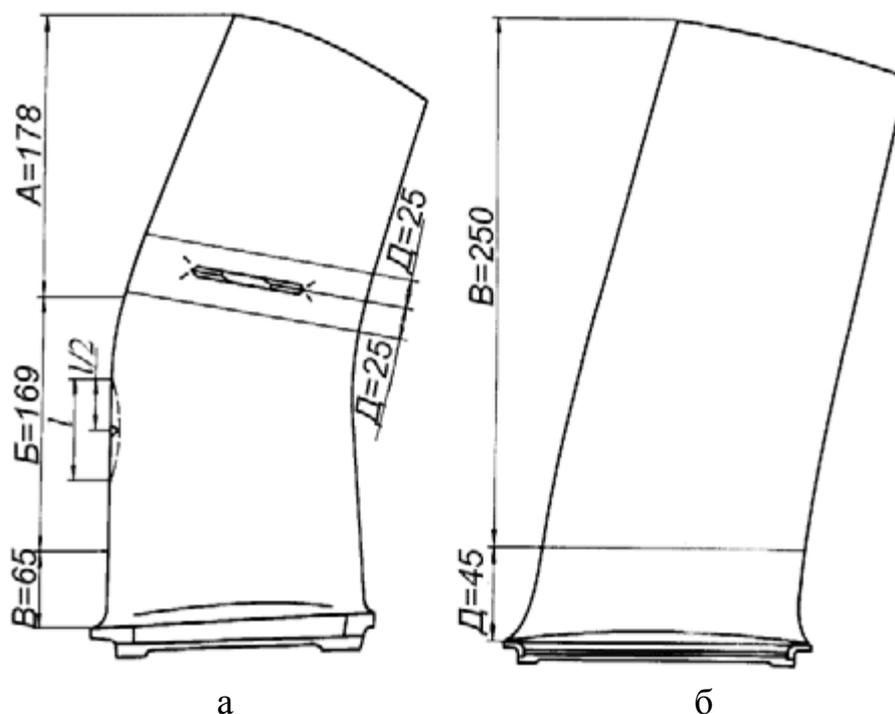


Рис. П. 2.1. Рабочие лопатки компрессора двигателя НК-8-2У  
(а-первая ступень, б-вторая ступень)

1. Лопатки первой ступени ротора компрессора низкого давления  
(см. рис. П. 2.1, а)

1а) Для профильной части и входной кромки пера лопаток:

- забоины на участке "А" и "Б" допускаются с зачисткой: глубиной до 0.2 мм и длиной до 0.4 мм с расстоянием между ними не менее 15 мм;
- забоины на участке "В" не допускаются;
- забоины на участке "Д" не допускаются;
- трещины не допускаются.

1б) Для входной кромки пера лопатки, если глубина забоин более 0.2 мм:

- забоины на участке "А" допускаются с зачисткой:
  - одна забоина глубиной до 2 мм и длиной до 3 мм;
  - две забоины глубиной до 1 мм длиной 2 мм каждая с расстоянием между ними не менее 30 мм.

В обоих случаях забоины зачищаются и заполировываются (V9) с последующим контролем методом цветной дефектоскопии на отсутствие трещин.

- забоины на участке "Б": допускается с зачисткой одна забоина глубиной до 1 мм и длиной до 2 мм. Забоина зачищается и заполировывается с последующим контролем методом цветной дефектоскопии на отсутствие трещин.

- трещины на входной кромке пера лопатки не допускаются.

Допуски на зачистку забоин в зависимости от глубины забоины составляют:

- при глубине забоины до 0.5 мм длина  $l=(30-40)$  мм,
- при глубине забоины от 0.5 мм до 1 мм длина  $l=(40-60)$  мм,
- при глубине забоины от 1 мм до 2 мм длина  $l=(60-80)$  мм.

Для бандажных полок лопатки сквозной зазор между контактными поверхностями бандажных полок - не допускается.

Если повреждения превышают допустимые значения, указанные выше, то двигатель снимается с эксплуатации для детального осмотра компрессора.

## 2. Лопатки второй ступени ротора компрессора низкого давления

(см. рис. П. 2.1, б)

2а) Для профильной части и выходной кромки пера:

- забоины на участке "В" допускаются без зачистки глубиной до 0.2 мм и длиной до 0.4 мм с расстоянием между ними не менее 15 мм.

2б) Для входной кромки пера лопатки, если глубина забоин более 0.2 мм:

- забоины на участке "В" допускаются с зачисткой: три забоины глубиной до 0.5 мм и длиной до 1 мм с расстоянием между ними не менее 30 мм.

Забоины зачищаются и заполировываются с последующей проверкой эндоскопом (Н-200).

- забоины на участке "Д" не допускаются;
- трещины не допускаются.

Если повреждения превышают допустимые значения, то двигатель снимается с эксплуатации для детального осмотра компрессора и принятия решения о возможности продолжения эксплуатации.

## ДОПУСКАЕМЫЕ ЗАБОИНЫ НА ЛОПАТКАХ КНД ДВИГАТЕЛЯ Д-30КУ(КП) [7.3]

### 1. Забоины, допускаемые без зачистки

Разрешается эксплуатация двигателей при наличии на рабочих лопатках I-III ступеней ротора забоин на входной и выходной кромках, а также на пере лопатки со стороны корыта.

Размеры, конфигурация, количество и расположение допускаемых забоин показаны на рис. П. 3.1.

Разрешается эксплуатация двигателей с забоинами по всей поверхности рабочих лопаток I - III ступеней ротора КНД на кромках и пере глубиной до 0.1 мм и диаметром до 0.3 мм. Количество забоин не ограничивается, взаимное расположение забоин произвольное. Эти забоины при определении размеров  $K_{мин}$ ,  $D_{мин}$ ,  $S_{мин}$ , указанных на рис. П. 3.1, П. 3.2, не учитывают и не включают в общее количество забоин, допускаемых на лопатках.

Трещины на пере лопатки не допускаются.

### 2. Забоины, допускаемые с зачисткой

Разрешается эксплуатация двигателей при наличии на рабочих лопатках КНД зачищенных забоин на входной и выходной кромке, а также на пере лопаток со стороны корыта.

Размеры, конфигурация, количество и расположение мест зачистки забоин показаны на рис. П. 3.2.

Трещины на пере лопатки не допускаются.

Погнутость лопаток не допускается.

После зачистки и полировки следы забоин на кромках лопаток не допускаются.

Примечания:

1. Эксплуатация двигателей с забоинами на лопатках КНД (зачищенными и незачищенными) разрешается только при отсутствии забоин на лопатках входного направляющего аппарата и на рабочих лопатках I ступени ротора компрессора высокого давления.

2. К рис. П. 3.2:

2.1. Общее:

1) Места зачистки полировать  $\nabla 8$ .

2)  $R_{сопр}$  - радиус сопряжения при зачистке.

2.2. К рис. П. 3.2, а:

1) На каждой кромке допускается не более одного места зачистки, количество забоин в пределах одного места зачистки не ограничивается.

2) Суммарное количество забоин на пере и зачищенных мест на кромках лопатки должно быть не более двух.

3) Взаимное расположение зачищенных мест произвольное в указанных пределах.

4) Подлежат зачистке забоины  $L$  глубиной не более 0.2 мм.

5) В зоне  $L$  допускаются забоины глубиной до 0.1 мм и диаметром до 0.3 мм.

2.3. К рис. П. 3.2, б:

- 1) Суммарное уменьшение хорды не более *Амакс*.
- 2) Общее число лопаток с зачисткой вершечек - не более пяти.
- 3) Зачищенные лопатки не должны располагаться друг от друга ближе чем через две лопатки.

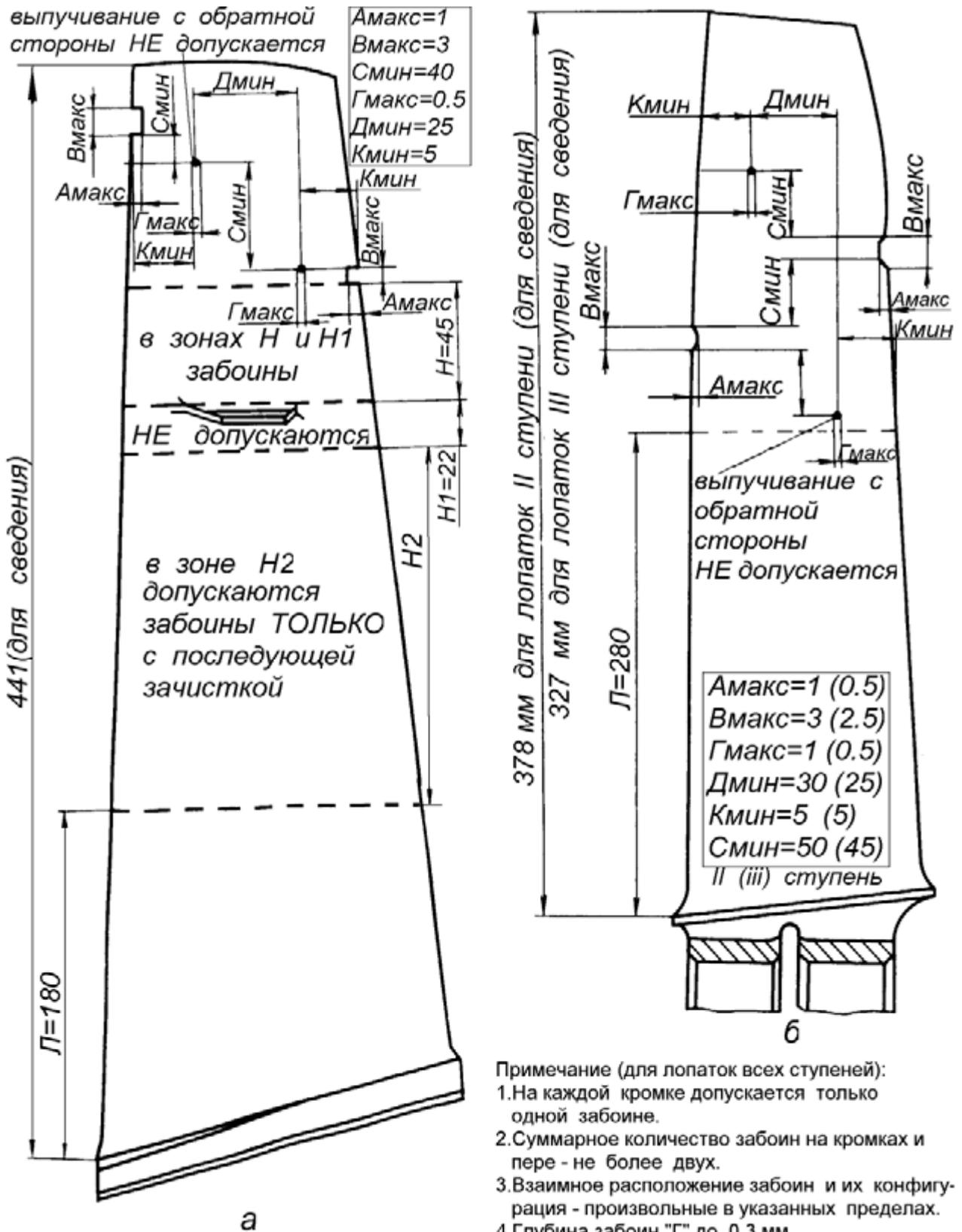
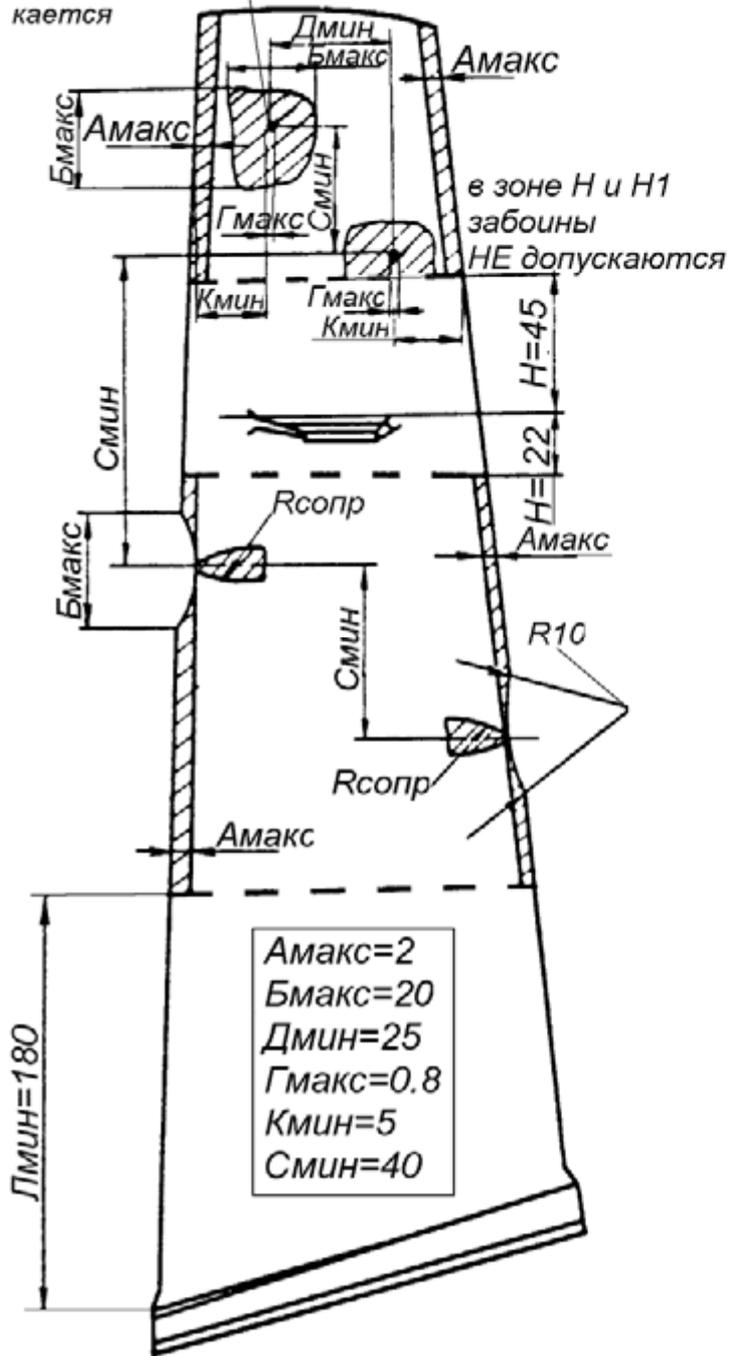
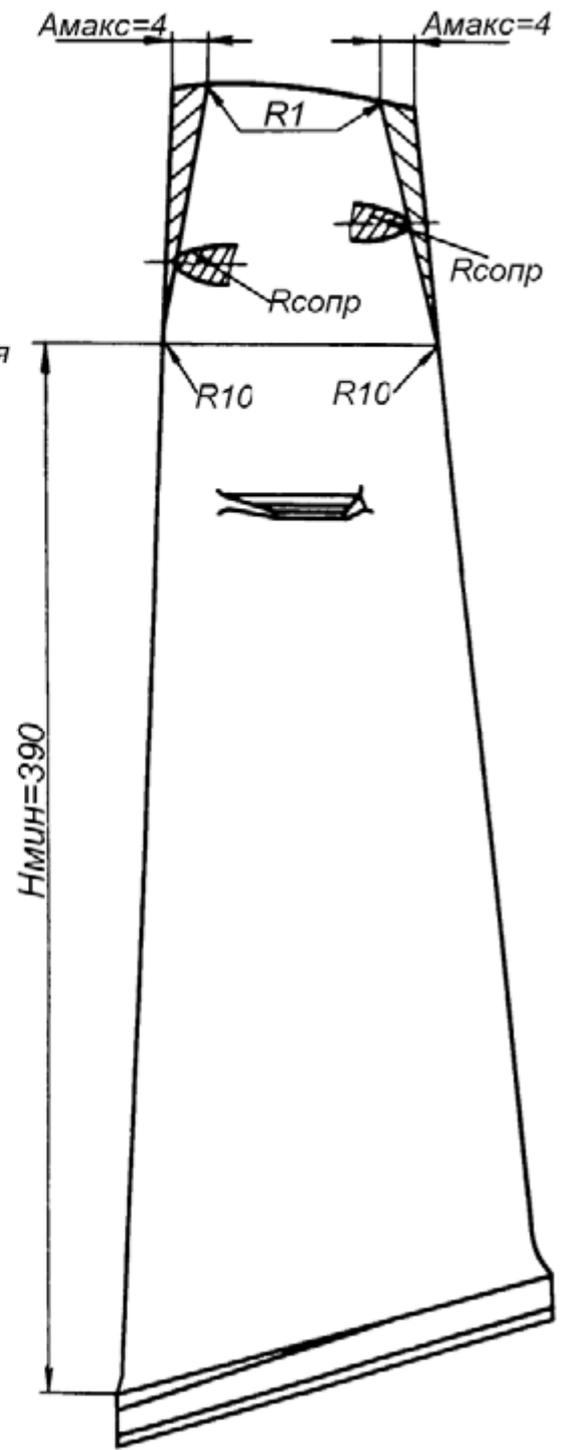


Рис. П. 3.1. Нормы величин забоин на рабочих лопатках I-III ступеней компрессора низкого давления двигателя Д-30КУ(КП), допускаемых без зачистки (а-рабочая лопатка I ступени, б-рабочие лопатки II и III ступеней)

острые края забоины плавно зачистить заподлицо с профилем лопатки. Выпучивание с обратной стороны НЕ допускается



а



б

Рис. П. 3.2. Нормы зачистки забоин (а) и вершук (б) на рабочей лопатке I ступени компрессора низкого давления двигателя Д-30КУ(КП)

(Примечание:

Зачистку выполнять в пределах заштрихованных участков)

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Приводимый ниже раздел пособия УКАЗАТЕЛЬ составлен таким образом, что может быть использован как основа для контрольных вопросов.

По результатам изучения пособия в целях самоконтроля рекомендуется выбрать случайным образом порядка 10 указателей, преобразовать их путем несложной стилистической правки в вопросы, ответить на них и сверить ответ с текстом пособия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 18322-78 (СТ СЭВ 5151-85) Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения.- М.: Изд-во стандартов, 1986.-14 с.
2. Дорошко С.М., Коняев Е.А., Чехохуд Е.В. Конструкция и прочность авиационных ГТД. Конспект лекций.-Р.: РКИИ ГА, 1983.-80 с.
3. Казанджан П.К., Тихонов Н.Д. Теория авиационных двигателей: Теория лопаточных машин .-М.: Машиностроение, 1995.-320 с.
4. Лозицкий Л.П. и др. Конструкция и прочность авиационных газотурбинных двигателей.- М.: Воздушный транспорт, 1992.-535 с.
5. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД.-М.: Машиностроение, 1993.-240 с.
6. Реферативная научно-техническая информация ЦИАМ.
7. Руководства по технической эксплуатации двигателей:
  - 7.1. НК-8-2У,
  - 7.2. НК-86,
  - 7.3. Д-30КУ(КП),
  - 7.4. Д-36,
  - 7.5. ТВЗ-117.
8. Скубачевский Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей.-М.: Машиностроение, 1981.-550 с.
9. Смирнов Н.Н. и др. Техническая эксплуатация летательных аппаратов.- М.: Транспорт, 1989.-423 с.

10. Тойбер М.Л. Электронные системы контроля и диагностики силовых установок. - М.: Воздушный транспорт, 1990. -336с.

## УКАЗАТЕЛЬ

### **А**

Абразивный износ 16, 51

Алимирование 34, 46, 50

Анодирование 13

Антивибрационные полки

-влияние на механические характеристики лопаток и рабочего колеса 15

-детонационное напыление площадок контакта 52

-западание внахлест 15, см. Часть 2-3

-площадки контакта

-расстыковка 15, см. Часть 2-3

-фреттинг-коррозия 27

### **Б**

Бандажные полки 27,32, 54

Безопасность полетов 5

### **В**

Верхушки лопаток

-зачистка 58, см. Часть 2-3

-повреждения 8, см. Часть 2-3

Виброгалтовка 45, 48, 50

Влияние

-на усталость

-защитных покрытий 46

-конструктивного и масштабного факторов 46

-коррозионных повреждений 50

-остаточных напряжений 27, 34, 35, 42,45

-технологических факторов 45

-фреттинга 51

-состояния рабочих лопаток на характеристики двигателя 12,12,16,17, 19, 22

-тяги двигателя на долговечность рабочих лопаток турбины 39

Выносливость 9,14,26,32,35, 45-50,52

Выпучивание с обратной стороны забоины 8,58

**Г**

Газовая коррозия 29, 36

Глубина

-забоин

-абсолютная 8

-примеры 53,55, см. Часть 2-3

-относительная 9

-и зачистка 11,11,53,55, см. Часть 2-3

**Д**

Дефекты технологические 27

Долговечность 36, 37, 42, 44, 48

Допускаемые забоины на лопатках КНД двигателя Д-30КУ(КП) 55

Допуски на зачистку забоин 11,53,55, см. Часть 2-3

**Ж**

Жаропрочность 46

-и возможная особенность эксплуатационной повреждаемости  
рабочих лопаток турбин по ступеням 33

Жаростойкость 32

**З**

Забоины

-допускаемые на пере 11, см. Часть 2-3

-по входной кромке для компрессора Д-30КУ(КП) 55

-по выходной кромке для компрессора Д-30КУ(КП) 55

-зачистка 55, 11, 53

Загрязнение тракта двигателя 5,12, 22

Замковых элементов фреттинг 26

Замок шарнирный 13

Западание внахлест antivибрационных полок 15, см. Часть 2-3

Зачистка

-верхушек пера 58, см. Часть 2-3

-забоин на пере 11,53, 55, см. Часть 2-3

**И**

Износ

-площадок контакта antivибрационных полок 15, см. Часть 2-3

-площадок контакта бандажных полок 27,32, 54, см. Часть 2-3

-эрозионный пера лопатки 16, см. Часть 2-3

Износостойкость 52

### **К**

Колебания рабочих лопаток 13, 17, 20, 23, 29, 47

Коррозия

-солевая титановых сплавов 24, 49

-межкристаллитная 24

-локальная точечная 24

-фреттинг 27, 48

-газовая лопаток турбин 29, 36, 37

Кромки рабочих лопаток сквозной наклеп 27, 48

### **Л**

Локализация разрушений рабочих лопаток 3, 7

### **М**

Методы повышения сопротивления усталости лопаток 27, 44, 46, 48

Механизм фреттинга 51

### **Н**

Наклеп

-контактных поверхностей антивибрационных и бандажных полок 15, 32

-при поверхностном упрочнении 48

-сквозной кромки рабочих лопаток 27, 48

Неустойчивая работа компрессора 16

Нормы

-величин забоин на рабочих лопатках I-III ступеней компрессора низкого давления двигателя Д-30КУ(КП), допускаемых без зачистки 55

-зачистки забоин и вершук на рабочей лопатке I ступени компрессора низкого давления двигателя Д-30КУ(КП) 55

### **О**

Ограничения по забоинам на рабочих лопатках 1 и 2 ступеней КНД двигателя НК-8-2У 53

Особенности распределения температур на выходе из камеры сгорания и повреждаемость рабочих лопаток турбин 29

Оценка долговечности рабочих лопаток в процессе проектирования двигателя с учетом предполагаемых условий эксплуатации 36

**П**

- Перегрев лопаток турбин 30,34,63, см. Часть 3
- Перепуск воздуха с целью уменьшения повреждаемости лопаток КВД 21
- Поверхность контактная антивибрационных и бандажных полок 15,27,32, 52,54
- Поверхностное упрочнение 45, 48, 50,52
- Повреждаемость рабочих лопаток
- влияние на характеристики двигателей 12,12 ,16,17,19, 21,22,46
  - компрессоров (глава) 6
  - распределение по ступеням компрессора и кромкам 8,9
  - турбин (глава) 29
- Повреждения рабочих лопаток
- двигателя JT-8D 5
  - компрессоров, типичные 5,8,28
  - от попадания посторонних предметов 5-7,15
  - турбин, типичные 5,29,31,32,33
  - чувствительность стальных и титановых лопаток 10, 50
- Повышение износостойкости площадок контакта антивибрационных полок 52
- Покрытия
- алитирование 34, 46, 50
  - анодирование 13
  - выкрашивание 12
  - Никель-Хром 36, 46
  - отслоение и оплавление 36
  - растрескивание 24, 29, 49
  - сопротивляемость термоциклическим ударам 36
  - ЭП586 50
- Пожар титановый 25
- Ползучесть 37, 39, 41
- Помпаж 16,17, 30
- Предметов посторонних попадание 5-7, 15, см. Часть 2-3
- Прижог 27
- Признаки косвенные повреждения рабочих лопаток 16, 30, 34
- Прогар 5, 31, 33

**Р**

- Работоспособность 4, 6,13, 30,42
- Радиус сопряжения при зачистке 55, см. Часть 2-3
- Раззазоривание бандажных полок 32, см. Часть 2-3
- Разрушения нелокализованные 3
- Разупрочнение материала лопаток 34

## Расположение

- забоин на пере лопатки взаимное 8, 53,55, см. Часть 2-3
- лопаток с зачистками в рабочем колесе 56, см. Часть 2-3

Расстыковка рабочих лопаток по антивибрационным и бандажным полкам 15,32,54, см. Часть 2-3

Растрескивание поверхности пера лопаток 24, 29, 49

Расход топлива и состояние рабочих лопаток 12

**С**

Снижение механических характеристик 6,9,30,32,47-49

## Способы

- защиты рабочих лопаток от коррозии 23, 51
- повышения сопротивления усталости рабочих лопаток 27, 44,46, 48

Срыв вращающийся в компрессоре 19

## Стойкость

- коррозионная 24, 51
- эрозионная 20, 51

**Т**

Термоусталость 30,36, 42

## Титановые сплавы

- пожар 25
- солевая коррозия 24,49
- усталость 10,24

Топология зон рабочей лопатки турбины с различным состоянием структуры материала, пример 31

Тракта двигателя загрязнение 5,12, 22

Трещина 7,13,23,24, 26,27,32,34,41,43-45,47,50, 53-55, см. Часть 2-3

**У**

Уменьшение потерь от изменения формы поверхности пера рабочих лопаток 16

Уменьшение хорды пера лопатки при зачистке допустимое 56, см. Часть 2-3

Упрочнение поверхностное 45,48,50,52

Условия эксплуатации (влияние на повреждаемость рабочих лопаток) 6, 16,23,24,33,34,36-39,51

Усталость 9,23,26-29,32,41,44-52

Ухудшение характеристик двигателя 12,16

**Ф**

Фактор

- влияния на усталость - см. "В"

- влияния на работоспособность лопаток, классификация 6,29

Формы колебаний рабочих лопаток и влияние колебаний на работоспособность лопаток 13

Фреттинг 27,27,48,51

**Х**

Характер изменения

- температуры газов

на выходе из камеры сгорания и влияние на эксплуатационную повреждаемость рабочих лопаток турбин 29

- напряжений в пере лопатки при колебаниях по изгибным формам 13

Хвостовиков рабочих лопаток повреждения 26, 29, 46

**Ч**

Число рабочих лопаток с зачистками в ступени 56, см. Часть 2-3

Чистота обработки зачищенного участка 53,55, см. Часть 2-3

**Ш**

Шероховатость поверхности лопаток 5,45, 48

**Э**

Эксплуатационная повреждаемость рабочих лопаток (перечень основных причин)

- компрессоров 6,28

- турбин 29,32,33

Эксплуатация двигателей с забоинами рабочих лопаток 11, 53, 55, см. Часть 2-3

Эрозия 5,7,12,16,39

## СОДЕРЖАНИЕ (Часть 1)

ВВЕДЕНИЕ. . . . .	. . . . .
. . . . .	. . . . .
1. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ РАБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРОВ. . . . .	. . . . .
. . . . .	. . . . .

2. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН . . . . .	
. 29	
Приложение 1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УСТАЛОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК. . . . .	45
Приложение 2. ОГРАНИЧЕНИЯ ПО ЗАБОИНАМ НА РАБОЧИХ ЛОПАТКАХ 1 и 2 СТУПЕНЕЙ КНД ДВИГАТЕЛЯ НК-8-2У. . . . .	52
Приложение 3. ДОПУСКАЕМЫЕ ЗАБОИНЫ НА ЛОПАТКАХ КНД ДВИГАТЕЛЯ Д-30КУ(КП) . . . . .	55
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ. . . . .	59
ЛИТЕРАТУРА. . . . .	59
УКАЗАТЕЛЬ. . . . .	60

## **ПОЛНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ**

### **А**

Абразивный износ	16, 51
Алитирование	34, 35, 46, 46, 50
Анодирование	13
Антивибрационные полки	
-влияние на механические характеристики лопаток и рабочего колеса	15
-детонационное напыление площадок контакта	52
-западание внахлест	15
-площадки контакта	
-расстыковка	15
-фреттинг-коррозия	27

### **Б**

Бандажные полки	32, 54, 32, 27
Безопасность полетов	5

### **В**

Верхушки лопаток

-зачистка 58

-повреждения 8

Виброгалтовка 45, 48, 50

Влияние

-на усталость

-защитных покрытий 46

-конструктивного и масштабного факторов 46

-коррозионных повреждений 50

-остаточных напряжений 45, 27, 35, 42, 34

-технологических факторов 45

-фреттинга 51

-состояния рабочих лопаток на характеристики двигателя  
12,13,12,22,16,17,16,17,19,12,16

-тяги двигателя на долговечность рабочих лопаток турбины 39

Выносливость 35, 50, 47, 32, 52, 48, 9, 47, 47, 26, 14, 45

Выпучивание с обратной стороны забоины 8, 58

## ***Г***

Газовая коррозия 29, 36

Глубина

-забоин

- абсолютная 8

- примеры 55, 53

-относительная 9, 10

-и зачистка 11, 55, 11, 53

## ***Д***

Дефекты технологические 27

Долговечность 37, 36, 37, 42, 48, 38, 44

Допускаемые забоины на лопатках КНД двигателя Д-30КУ(КП) 55

Допуски на зачистку забоин 55, 11, 53

## ***Ж***

Жаропрочность 46

-и возможная особенность эксплуатационной повреждаемости  
рабочих лопаток турбин по ступеням 33

Жаростойкость 32

**Забоины**

- допускаемые на пере 11
  - по входной кромке для компрессора Д-30КУ(КП) 55
  - по выходной кромке для компрессора Д-30КУ(КП) 55
- зачистка 55, 11, 53

Загрязнение тракта двигателя 12, 22,5

Замковых элементов фреттинг 26

Замок шарнирный 13

Западание внахлест антивибрационных полок 15

**Зачистка**

- верхушек пера 58
- забоин на пере 53,11, 55

***И*****Износ**

- площадок контакта антивибрационных полок 15
- площадок контакта бандажных полок 32, 54, 32, 27
- эрозионный пера лопатки 16

Износостойкость 52

***К***

Колебания рабочих лопаток 47, 20, 23, 29, 47, 17, 13

**Коррозия**

- солевая титановых сплавов 24, 49
- межкристаллитная 24, 24
- локальная точечная 24
- фреттинг 27, 48, 26
- газовая лопаток турбин 29, 36, 37

Кромки рабочих лопаток сквозной наклеп 27, 48

***Л***

Локализация разрушений рабочих лопаток 3,7

***М***

Методы повышения сопротивления усталости лопаток 48, 44, 27, 46

Механизм фреттинга 51

***Н*****Наклеп**

- контактных поверхностей антивибрационных и бандажных полок 32,15
- при поверхностном упрочнении 48
- сквозной кромок рабочих лопаток 27, 48

Неустойчивая работа компрессора 16, 17, 16, 17

Нормы

- величин забоин на рабочих лопатках I-III ступеней компрессора низкого давления двигателя Д-30КУ(КП) , допускаемых без зачистки 55
- зачистки забоин и верхушек на рабочей лопатке I ступени компрессора низкого давления двигателя Д-30КУ(КП) 55

## О

Ограничения по забоинам на рабочих лопатках  
1 и 2 ступеней КНД двигателя НК-8-2У 53

Особенности распределения температур на выходе из  
камеры сгорания и повреждаемость рабочих лопаток турбин 29

Оценка долговечности рабочих лопаток в процессе проектирования  
двигателя с учетом предполагаемых условий эксплуатации 36

## П

Перегрев лопаток турбин 63, 34, 30,30

Перепуск воздуха с целью уменьшения повреждаемости лопаток КВД 21

Поверхность контактная антивибрационных и бандажных полок  
52,15,27,27,32,32,54

Поверхностное упрочнение 45, 48, 50,52

Повреждаемость рабочих лопаток

- влияние на характеристики двигателей 12,13,46,12,22,16,17,16,  
17,21,19,12,16
- компрессоров (глава) 6
- распределение по ступеням компрессора и кромкам 8,9
- турбин (глава) 29

Повреждения рабочих лопаток

- двигателя JT-8D 5
- компрессоров, типичные 5,8,28
- от попадания посторонних предметов 5,7,6,15
- турбин, типичные 29,32,33,31,5
- чувствительность стальных и титановых лопаток 10,10,50,9

Повышение износостойкости площадок контакта антивибрационных полок 52

Покрытия

- алитирование 34,35,46,46,50
- анодирование 13
- выкрашивание 12,13

- Никель-Хром 36,46
- растрескивание 49,24,49,29
- сопротивляемость термоциклическим ударам 36
- ЭП586 50

Пожар титановый 25

Ползучесть 37, 39, 37, 41

Помпаж 30, 17, 16

Предметов посторонних попадание 5, 7, 6, 15

Прижог 27

Признаки косвенные повреждения рабочих лопаток 16, 30, 34

Прогар 5, 31, 33

## ***P***

Работоспособность 4,4,13,6,6,30,42

Радиус сопряжения при зачистке 55

Раззазоривание бандажных полок 32

Разрушения нелокализованные 3

Разупрочнение материала лопаток 34, 35

Расположение

- забоин на пере лопатки взаимное 8,55,53

- лопаток с зачистками в рабочем колесе 56

Расстыковка рабочих лопаток по антивибрационным и бандажным полкам 15, 32,54,32

Растрескивание 24, 49, 29

Расход топлива и состояние рабочих лопаток 12

## ***C***

Снижение механических характеристик 47,49,32,10,24,48,48,6,930

Способы

- защиты рабочих лопаток от коррозии 23,23,24,51

- повышения сопротивления усталости рабочих лопаток 44,48,27,46

Срыв вращающийся в компрессоре 19

Стойкость

- коррозионная 23, 23, 24, 51

- эрозионная 20, 51

## ***T***

Термоусталость 30,36, 42

Титановые сплавы

- пожар 25

- солевая коррозия 49, 24
- усталость 10,24,24

Топология зон рабочей лопатки турбины с различным состоянием структуры материала, пример 31

Тракта двигателя загрязнение 12, 22,5

Трещины 7,34,47,45,13,53,50,26,41,43,55,53,32,44,24,34,24,27,23

## У

Уменьшение потерь от изменения

формы поверхности пера рабочих лопаток 16

Уменьшение хорды пера лопатки при зачистке допустимое 56

Упрочнение поверхностное 45, 48, 50,52

Условия эксплуатации (влияние на повреждаемость рабочих лопаток)

Усталость 46,46,50,45,27,45,51,32,52,48,9,47,26,48,41,44,48,27,46,44,27,23,29

Ухудшение характеристик двигателя 16,12

## Ф

Фактор

- влияния на усталость - см. "В"

- влияния на работоспособность лопаток, классификация 6,29

Формы колебаний рабочих лопаток и влияние колебаний на работоспособность лопаток 13

Фреттинг 27,27,51,26,27,48,26,27,26,26

## Х

Характер изменения

- температуры газов

на выходе из камеры сгорания и влияние на

эксплуатационную повреждаемость рабочих лопаток турбин 29

- напряжений в пера лопатки при колебаниях по изгибным формам 13

Хвостовиков рабочих лопаток повреждения 26, 46, 29

## Ч

Число рабочих лопаток с зачистками в ступени 56

Чистота обработки зачищенного участка 55, 53

## Ш

Шероховатость поверхности лопаток 45, 5, 48

## Э

Эксплуатационная повреждаемость рабочих лопаток (перечень основных причин)

-компрессоров 6,28

-турбин 29,32,33

Эксплуатация двигателей с забоинами рабочих лопаток 55, 53, 10, 11

Эрозия 39,12, 16, 6, 5,7

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ. . . . .	. . . . .
. . . . .	. . . . . 3
1. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ РАБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРОВ. . . . .	. . . . .
. . . . .	. . . . . 6
2. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН. . . . .	. . . . .
. . . . .	. . . . . 29
Приложение 1.	
КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УСТАЛОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК. . . . .	. . . . . 45
Приложение 2.	
ОГРАНИЧЕНИЯ ПО ЗАБОИНАМ НА РАБОЧИХ ЛОПАТКАХ 1 и 2 СТУПЕНЕЙ КНД ДВИГАТЕЛЯ НК-8-2У. . . . .	. . . . .
. . . . .	. . . . . 52
Приложение 3.	
ДОПУСКАЕМЫЕ ЗАБОИНЫ НА ЛОПАТКАХ КНД ДВИГАТЕЛЯ Д-30КУ(КП) . . . . .	. . . . .
. . . . .	. . . . . 55
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ. . . . .	. . . . .
. . . . .	. . . . . 59
ЛИТЕРАТУРА. . . . .	. . . . .
. . . . .	. . . . . 59
УКАЗАТЕЛЬ. . . . .	. . . . .
. . . . .	. . . . . 60

