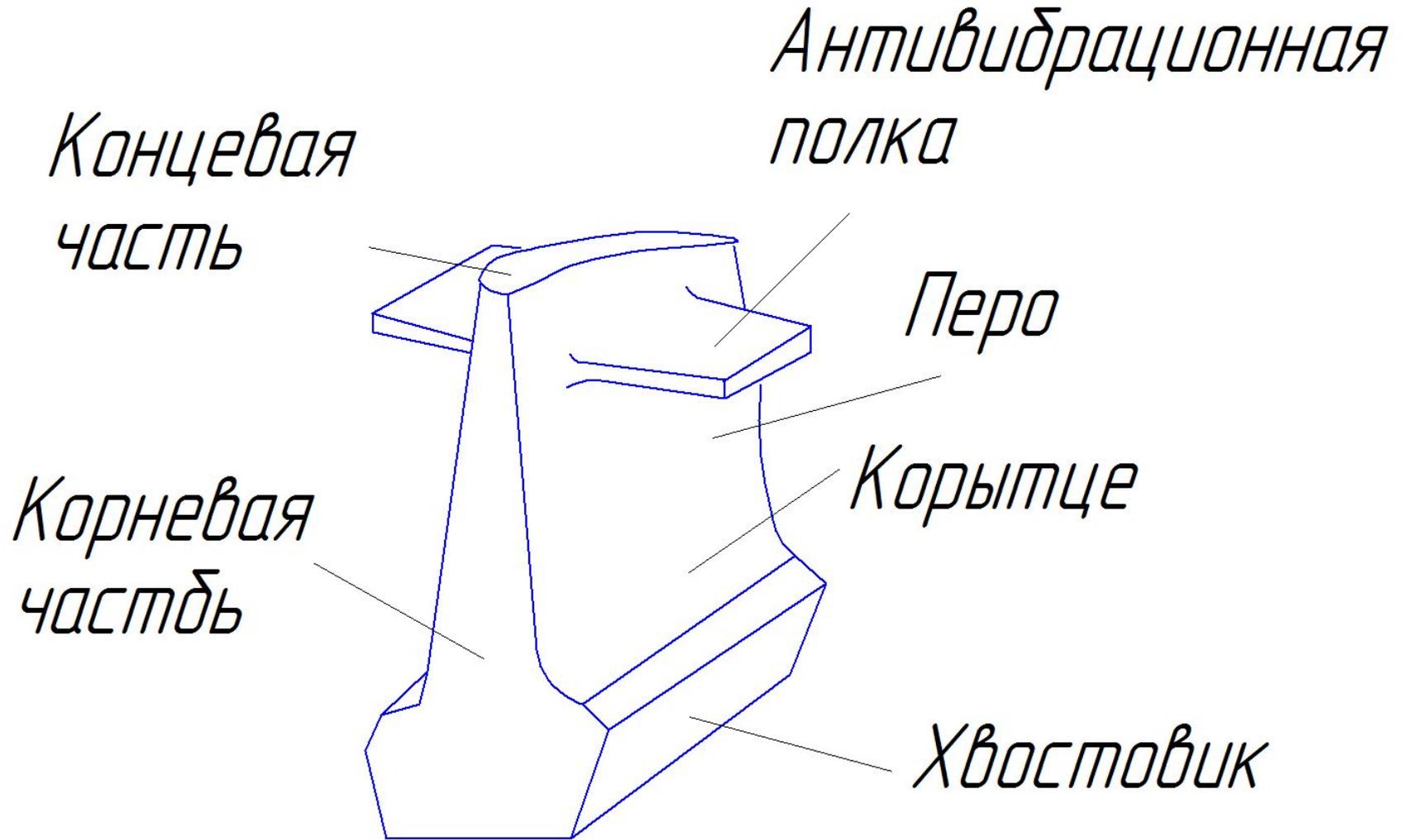


ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА

ТРЕБОВАНИЯ

- высокая прочность и жесткость,
т.к. лопатки испытывают большую статическую и динамическую нагрузки во время работы двигателя
- высокая степень чистоты обработки пера (Ra 0,16)),
что позволяет снизить потери на трение,
а также снизить сопротивление усталости конструкции лопатки
- минимальная масса.
Снижение массы лопатки на 1% уменьшает массу компрессора на 4%.
- высокая точность исполнения линейных и угловых размеров
при изготовлении лопаток для получения одинаковых скоростей течения, давлений и температур воздушного потока в каждом лопаточном канале.
Различные режимы течения в лопаточных каналах не только снижают КПД компрессора,
но и возбуждают колебания, приводящие к поломке лопаток

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЛОПАТКИ



ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЛОПАТОК

- Антивибрационная полка (не обязательный элемент).
Она служит для разделения контуров, для ограничения перемещения пера лопатки при вибрациях, а также для ограничения радиальных перетеканий воздуха.
 - Хвостовик служит для соединения рабочей лопатки с диском и передачи сил и моментов от диска к лопатке.
 - Корытце – вогнутая поверхность пера.
 - Спинка – выпуклая поверхность пера.
 - Корневая часть – участок пера, примыкающий к хвостовику.
 - Концевая часть – периферийный участок пера.
- Основные размеры лопаток и их отклонения выбираются по ОСТ 100025-72 – лопатки осевых компрессоров и турбин.

ВЕНТИЛЯТОР ТРДД ПЕГАС (РОЛЛС-РОЙС) С БАНДАЖНЫМИ ПОЛКАМИ



ВЕНТИЛЯТОР ТРДД Д-36 С БАНДАЖНЫМИ ПОЛКАМИ



ВЕНТИЛЯТОР ТРДД JT-9

С ДВУМЯ РЯДАМИ БАНДАЖНЫХ ПОЛОК

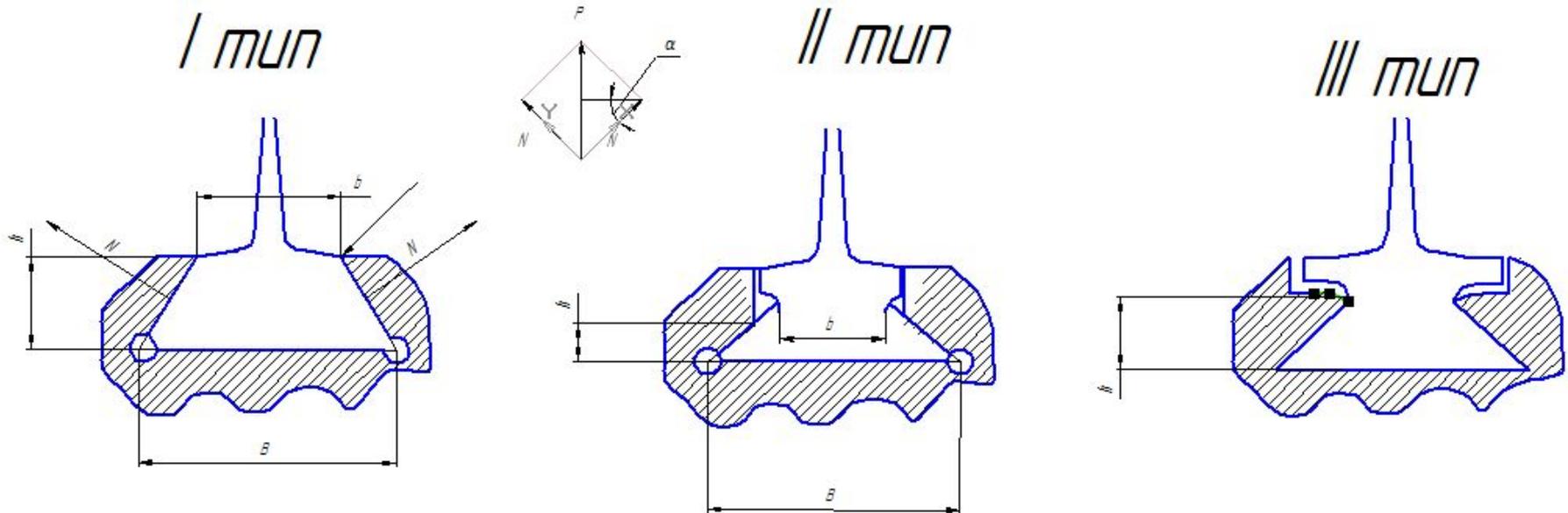


СОЕДИНЕНИЕ ЛОПАТОК С ДИСКОМ (ОСТ 111031-81)

ТРЕБОВАНИЯ

- Достаточная прочность
- Точность установки лопаток
- Минимальное ослабление обода диска
- Минимальная ширина хвостовика по окружности диска

СОЕДИНЕНИЕ ТИПА «ЛАСТОЧКИН ХВОСТ»



АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ

- Угол при вершине $\alpha=40\dots90^\circ$. Уменьшение α приводит к снижению размера В (при этом увеличивается количество лопаток, но и возрастает контактное давление по рабочим граням замка $N = P_n / 2 \sin \alpha$).
- Искривленность профиля лопатки является причиной неравномерности распределения по длине замка нормальных напряжений на радиусе перехода рабочей грани замка к профилю лопатки. Максимальные напряжения возникают у кромки лопатки.

Снижение этого явления достигается у второго и третьего типов за счет отдаления профильной части от зоны контакта.

Отдаление на 6...10мм дает снижение до 25%.

Третий тип используется при большом искривлении, когда профиль контура «свисает» над трактовой площадкой замка

ЗАМОК ЛОПАТОК КВД ТРДД Д30



ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА ТРДДФ АЛ-31 С ЗАМКОМ «ЛАСТОЧКИН ХВОСТ»



МОНТАЖ ЛОПАТОК В ДИСК

Лопатки в пазы диска могут устанавливаться с зазором 0,01...0,04мм (свободная посадка) или с натягом до 0,015мм (жесткое закрепление).

Свободная посадка допускает качку в окружном направлении, вследствие чего происходит некоторое демпфирование колебаний.

Использование посадки лопаток с натягом обеспечивает повышение частоты собственных колебаний.

Для удобства монтажа лопатки ее хвостовик может покрываться слоем меди или серебра толщиной 0,003...0,005мм, который при запрессовке служит смазкой.

Преимущества – технологичность и простота (изготавливается протягиванием).

Недостаток – ограниченная прочность.

• **Пазы в диске могут быть прямыми или наклонными.**

Прямые пазы более технологичны, однако при большой закрутке лопатки не могут обеспечить сборку лопаточного венца.

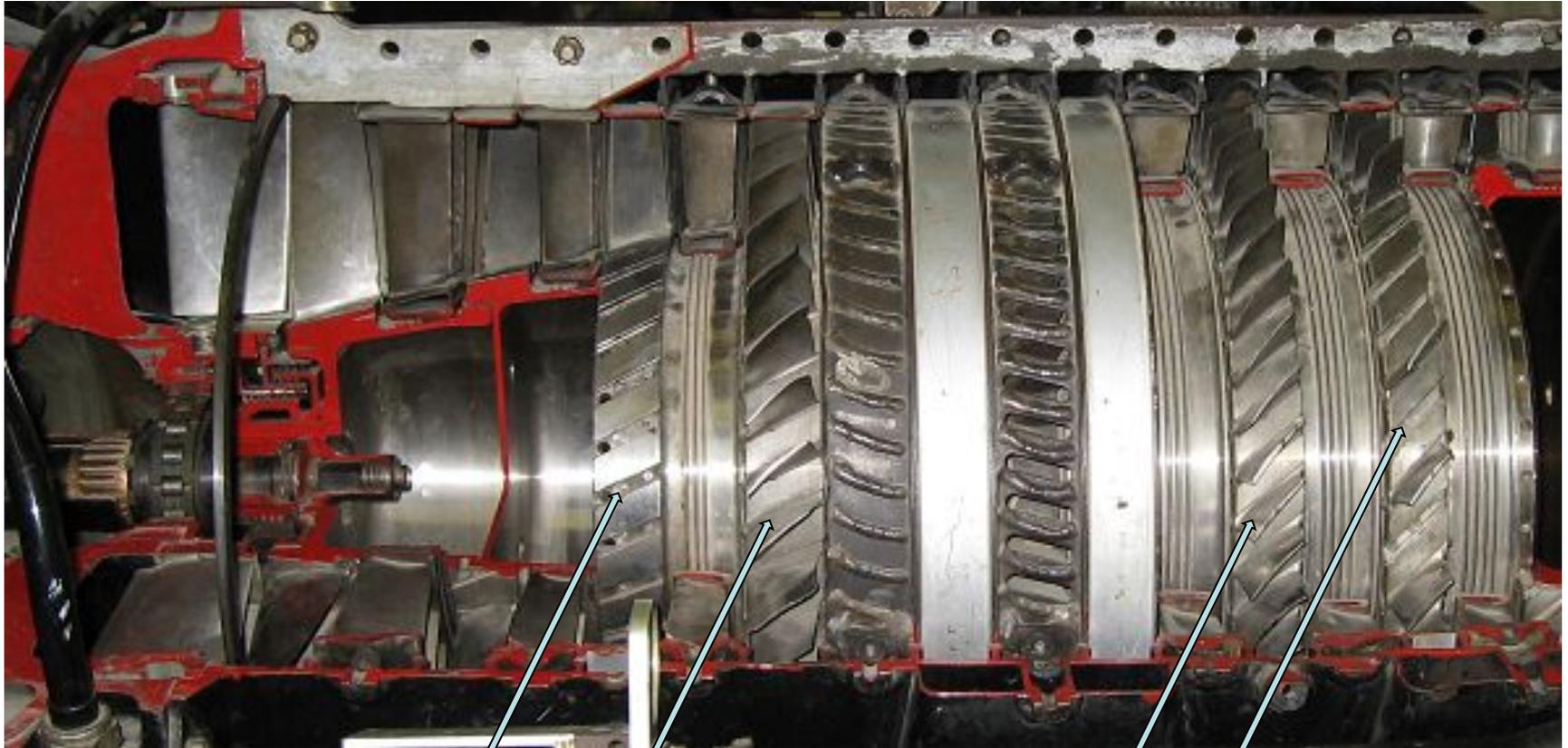
В таких случаях используются **наклонные пазы**.

Они к тому же несколько снижают нагрузку на замок, поскольку увеличивается площадь контакта.

Но при этом возникает дополнительный крутящий момент, вызывающий изгиб межпазового участка обода диска – так называемый «стесненный» момент.

• Для вентиляторных лопаток иногда применяют **криволинейный паз**, что позволяет увеличить рабочую грань замка и снизить нагрузку на замок.

КОМПРЕССОР ТВД АИ-24

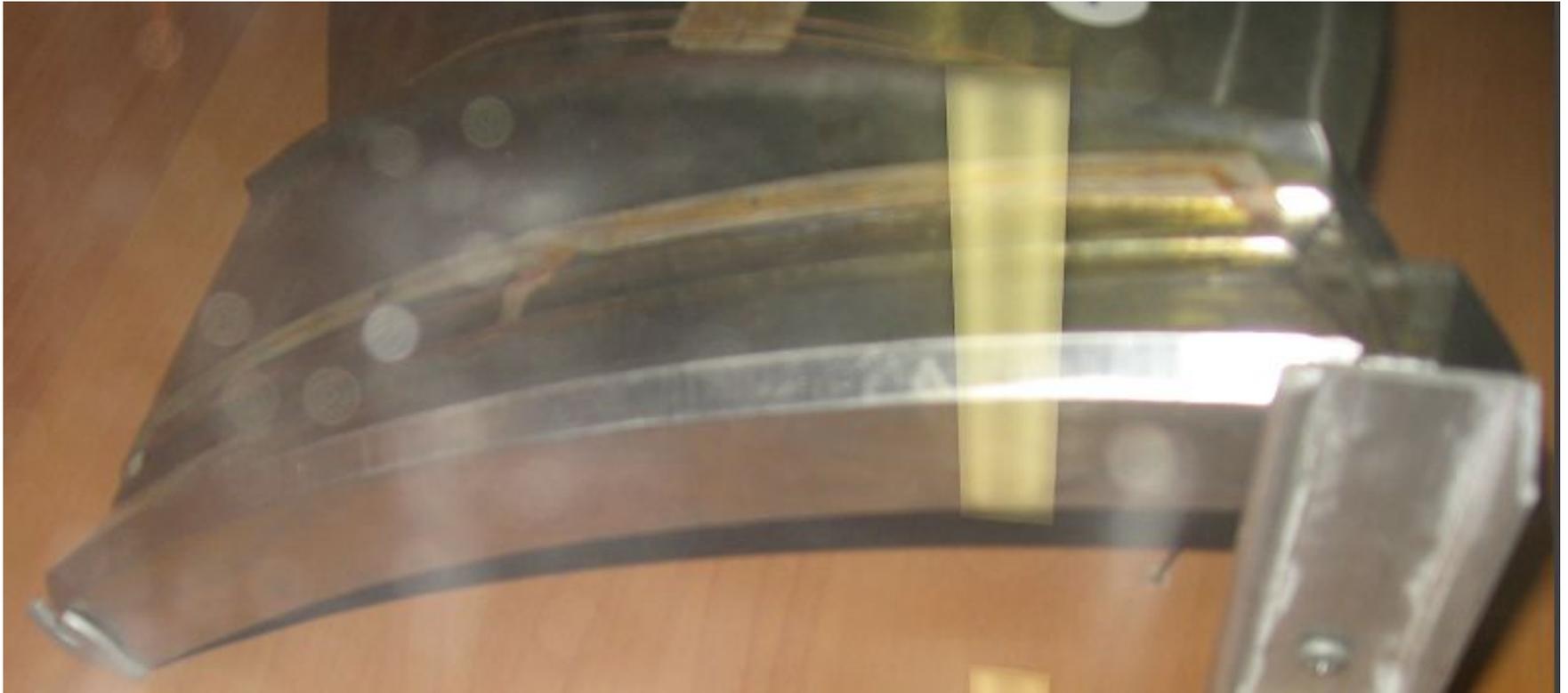


НАКЛОННЫЕ ПАЗЫ ПОД РАБОЧИЕ ЛОПАТКИ

ПРИМЕРЫ КОНСТРУКЦИЙ ЗАМКОВ «ЛАСТОЧКИН ХВОСТ»



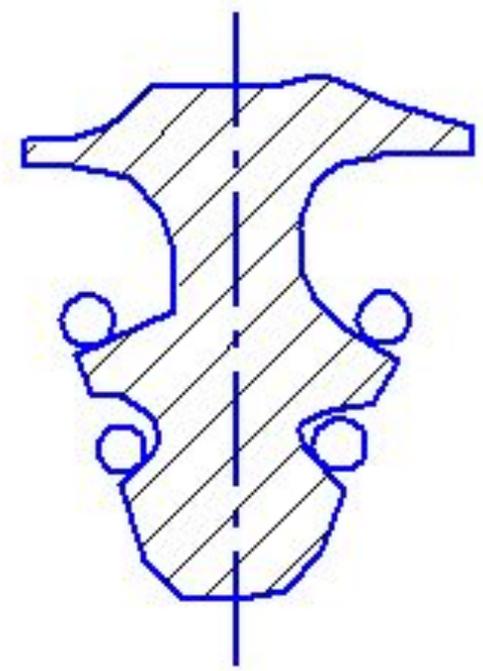
КРИВОЛИНЕЙНЫЙ ЗАМОК



**позволяет увеличить рабочую грань замка
и снизить нагрузку на замок**

ЕЛОЧНЫЙ ЗАМОК (ОСТ 110975-81)

ЗАМОК ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА ТРДД ПЕГАС (РОЛЛС-РОЙС)



Применяется для вентиляторных лопаток,
а также размещения большего числа лопаток
при малом диаметре втулки



**МАЛЫЙ
ВТУЛОЧНЫЙ
ДИАМЕТР**

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ЕЛОЧНЫХ ЗАМКОВ

Такое соединение имеет малую ширину.

**Технологически оно более сложно,
но имеет повышенную прочность.**

**Елочные замки требуют
особой точности при изготовлении.**

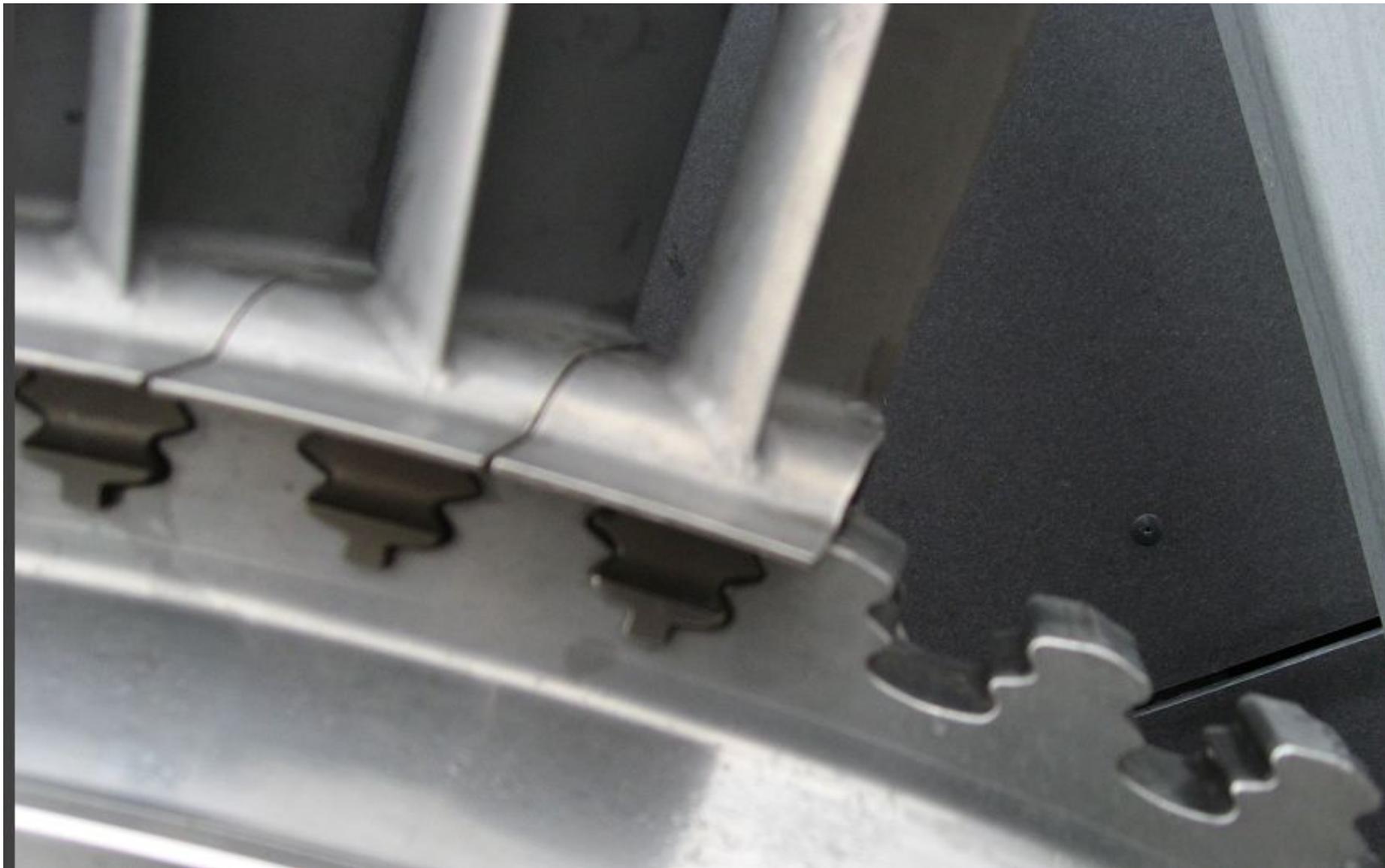
**В противном случае может оказаться,
что усилие будет передаваться не всеми зубьями,
а лишь некоторыми из них,
из-за чего может произойти поломка.**

Поэтому в замке используют не более трех зубьев.

ТРЕХЗУБЫЙ ЕЛОЧНЫЙ ЗАМОК



ДВУХЗУБЫЙ ЗАМОК ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА ТРДД GR7000



ПРОУШИНА (ШТИФТОВЫЙ, ШАРНИРНЫЙ) ЗАМОК (ОСТ 110780-72)

Соединение применяется для снижения вибрации.
Лопатки в таком замке самоустанавливаются,
собственная частота колебаний снижается.

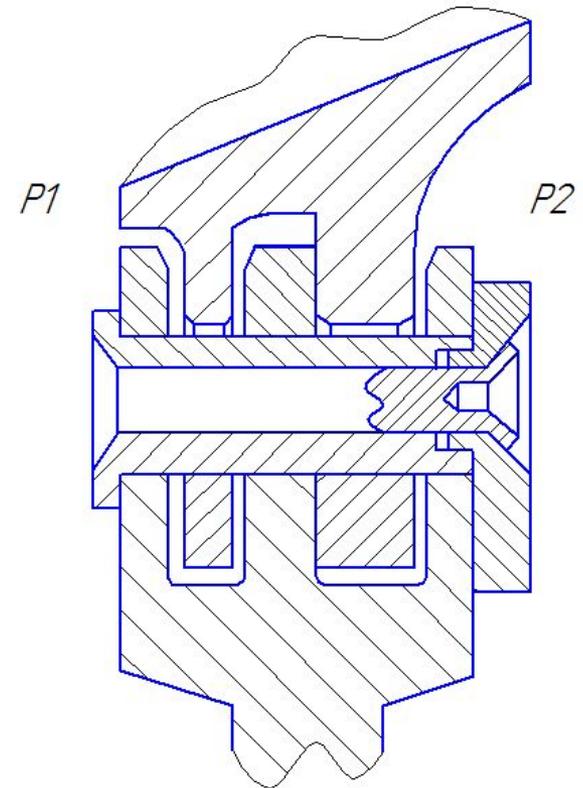
Недостатки :

- Большая масса
- Высокая сложность и цена
- Повышенная утечка воздуха

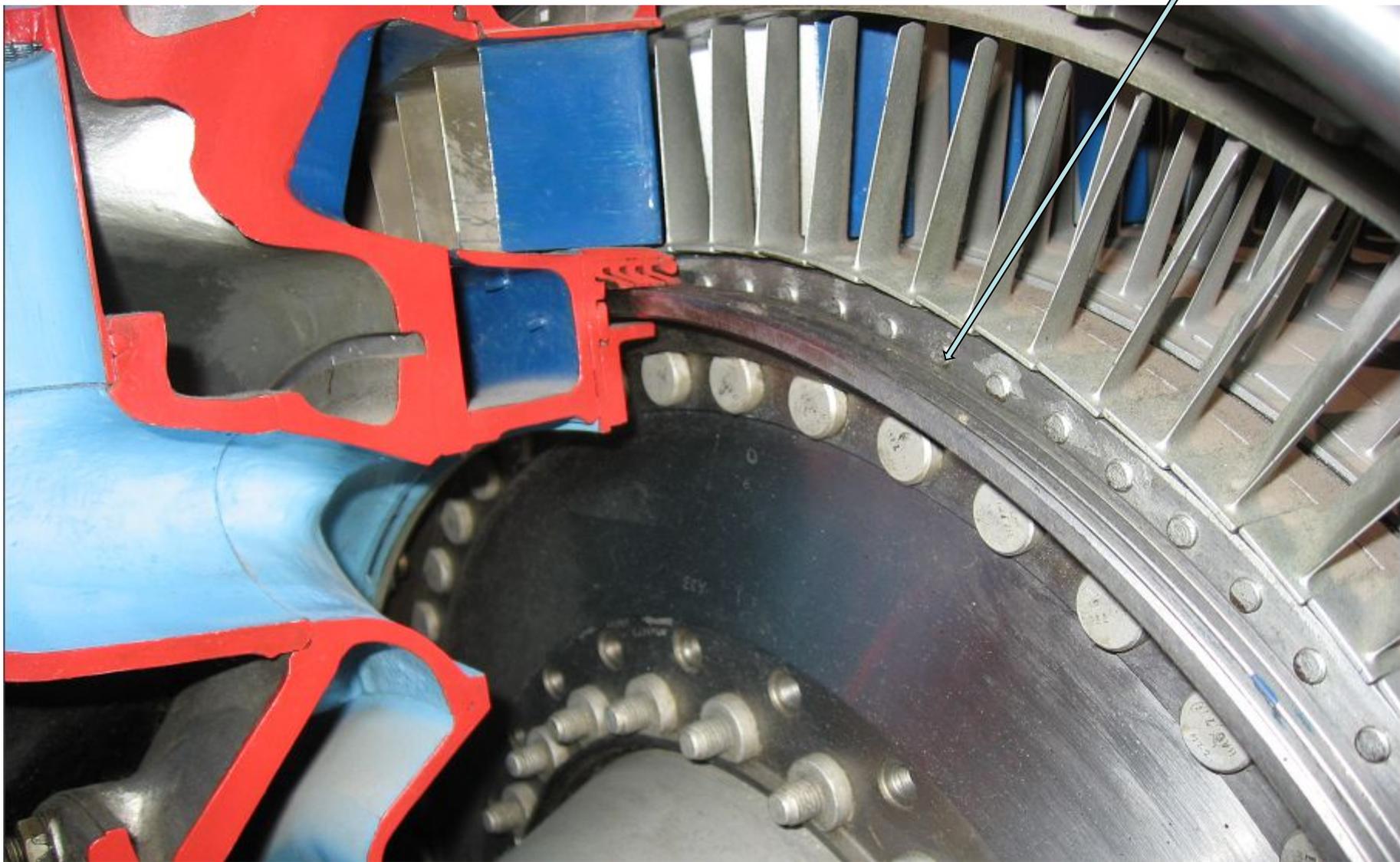
Применение – НК-22, АИ-25.

Впервые был использован на двигателе J-79.

На фирме Кузнецова от таких замков отказались из-за низкого КПД.



ЛОПАТКИ КВД ТРД ЭВОН С ШАРНИРНЫМИ ЗАМКАМИ



КОНСТРУКЦИЯ ЛОПАТОК С ШАРНИРНЫМ ЗАМКОМ



ПРОУШИНЫ ЗАМКА



**РЕБОРДЫ
ДИСКА**

ШАРНИРНЫЙ ЗАМОК КНД ТРДД АИ-25

**ЗАЗОРЫ 2...3ММ
ПО ТРАКТОВЫМ
ПОЛКАМ**



ЛОПАТКИ МОГУТ КАЧАТЬСЯ В ОКРУЖНОМ НАПРАВЛЕНИИ

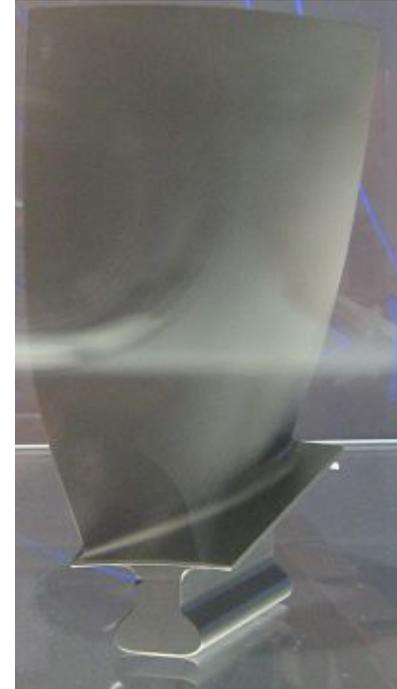
BLISK – ТЕХНОЛОГИЯ

BLADE - ЛОПАТКА

DISK - ДИСК

ДОСТОИНСТВО

минимальный вес



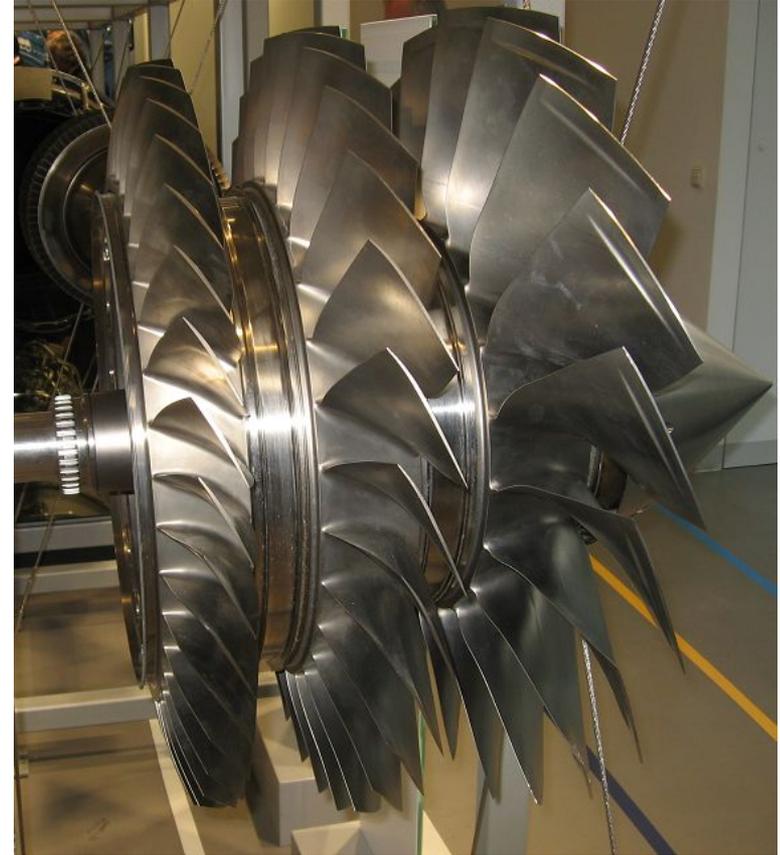
При этом отсутствует замок лопатки и связанные с этим проблемы (прочность и износ замка, возможность разместить оптимальное количество лопаток)

НЕДОСТАТКИ

проблемы с ресурсом из-за отсутствия элементов конструкционного демпфирования
Возникают проблемы с эксплуатацией – как менять дефектные лопатки?

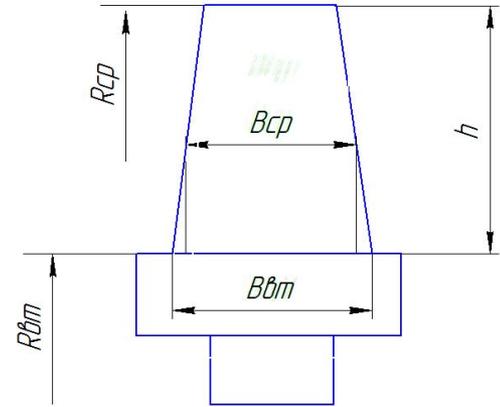
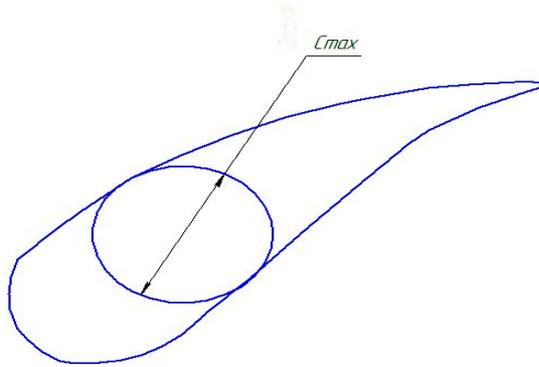
Сложна также сама технология изготовления,
требующая специального дорогостоящего оборудования

РОТОР КОМПРЕССОРА ТРДД EJ-200, ВЫПОЛНЕННЫЙ ПО BLISK - ТЕХНОЛОГИИ



Такие технологии нашли в настоящее время широкое применение на фирме MTU, Германия. В России они только сейчас начинают внедряться

ПЕРО ЛОПАТКИ



Перо лопатки характеризуется такими параметрами, как

трапецеидальность

$$\frac{v_n}{v_{вт}} (0,85...1,3)$$

клиновидность

$$\frac{C_{max}^n}{C_{max}^{вт}} (0,2...0,3)$$

удлинение

$$1,5 \leq \frac{h}{v_{cp}} \leq 4,5$$

ШИРОКОХОРДНАЯ ЛОПАТКА

Для снижения массы лопатка может быть полой или с сотовым наполнителем (E3PW, RB 211).

Широкохордная лопатка является альтернативным решением для лопаток с полкой. Она позволяет поднять КПД при сохранении требуемой прочности и жесткости.

$$h < 1,5V_{ср}$$



ШИРОКОХОРДНАЯ ЛОПАТКА КОМПРЕССОРА ТРДД EJ-200

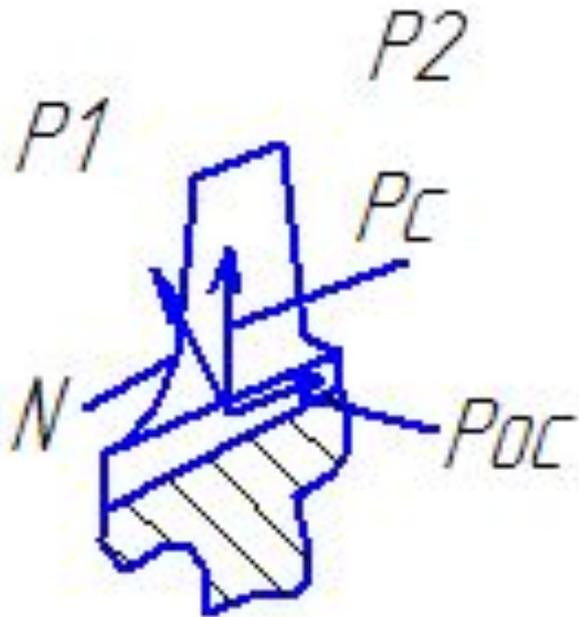
Такие лопатки характерны для КНД компрессоров современных двигателей

ШИРОКОХОРДНАЯ ЛОПАТКА С СОТОВЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ



ОСЕВАЯ ФИКСАЦИЯ ЛОПАТОК

Фиксация необходима для надежного удержания в диске.



Газовая сила на лопатку действует по полету (т.к. $P_2 > P_1$). Но на лопатку действует также осевая составляющая центробежной силы P_{oc} , которая направлена уже против полета. Поэтому лопатку необходимо фиксировать в обоих направлениях. Это также позволит надежно зафиксировать лопатку и от действия вибрационных нагрузок.

Фиксация лопаток может быть индивидуальная и групповая

ИНДИВИДУАЛЬНАЯ ФИКСАЦИЯ

Пластинчатая контровка ОСТ 110591-72



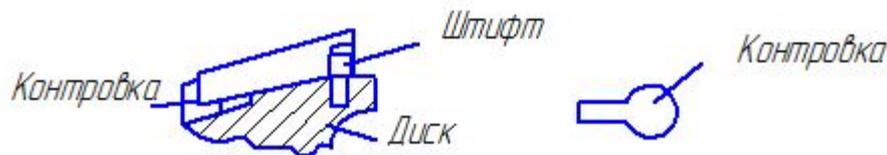
Гладкий штифт



Бурт и пластинчатый замок



Радиальный штифт и пластинчатый замок

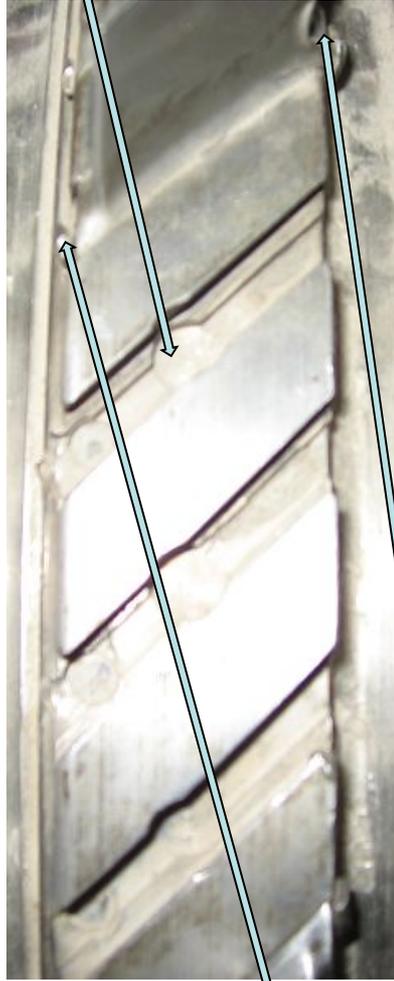


КОНТРОВКА РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТВД АИ-24

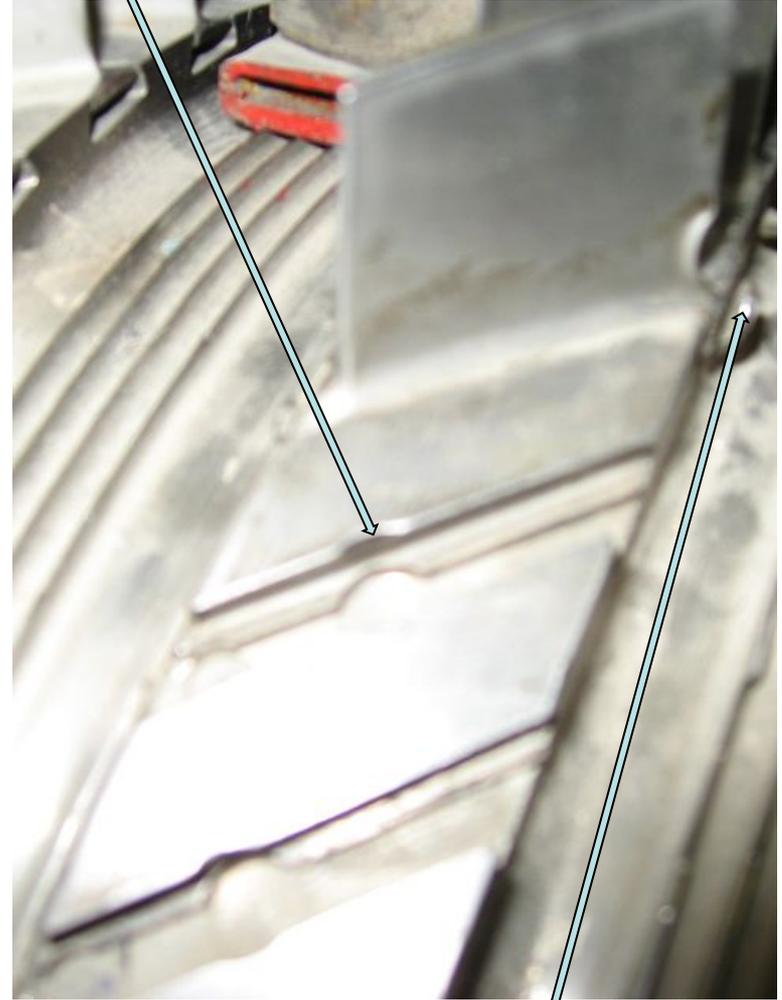
УГЛУБЛЕНИЯ ПОД КОНТРОВКУ



УПОРНЫЕ ШТИФТЫ

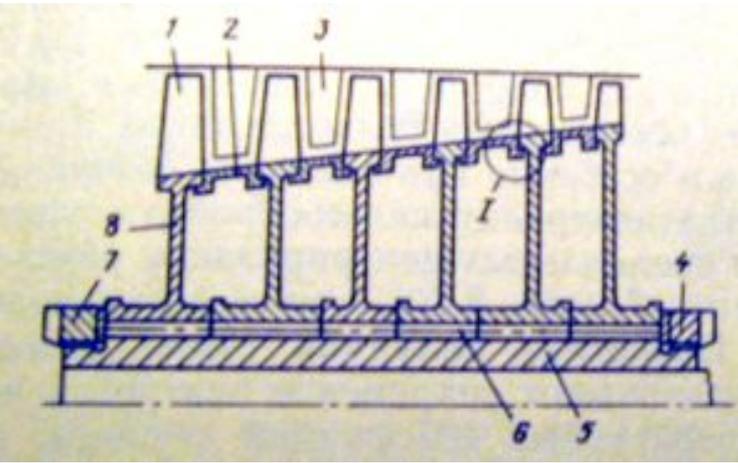


ЗАГНУТЫЕ КОНЦЫ КОНТРОВКИ



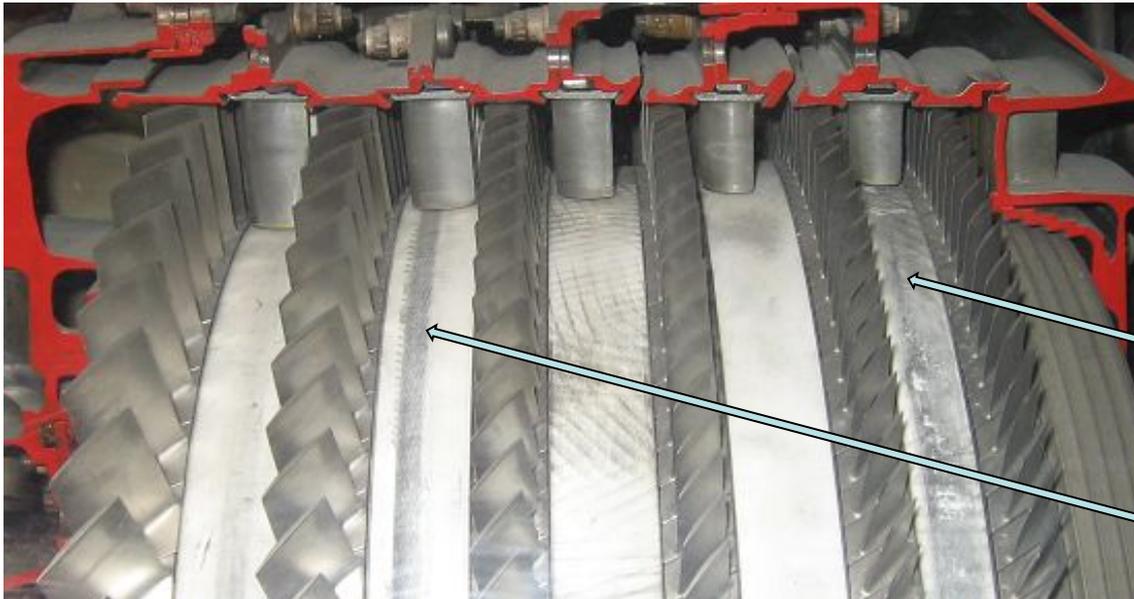
ГРУППОВАЯ ФИКСАЦИЯ

Фиксация тракторными кольцами



ТРДД
Д20П

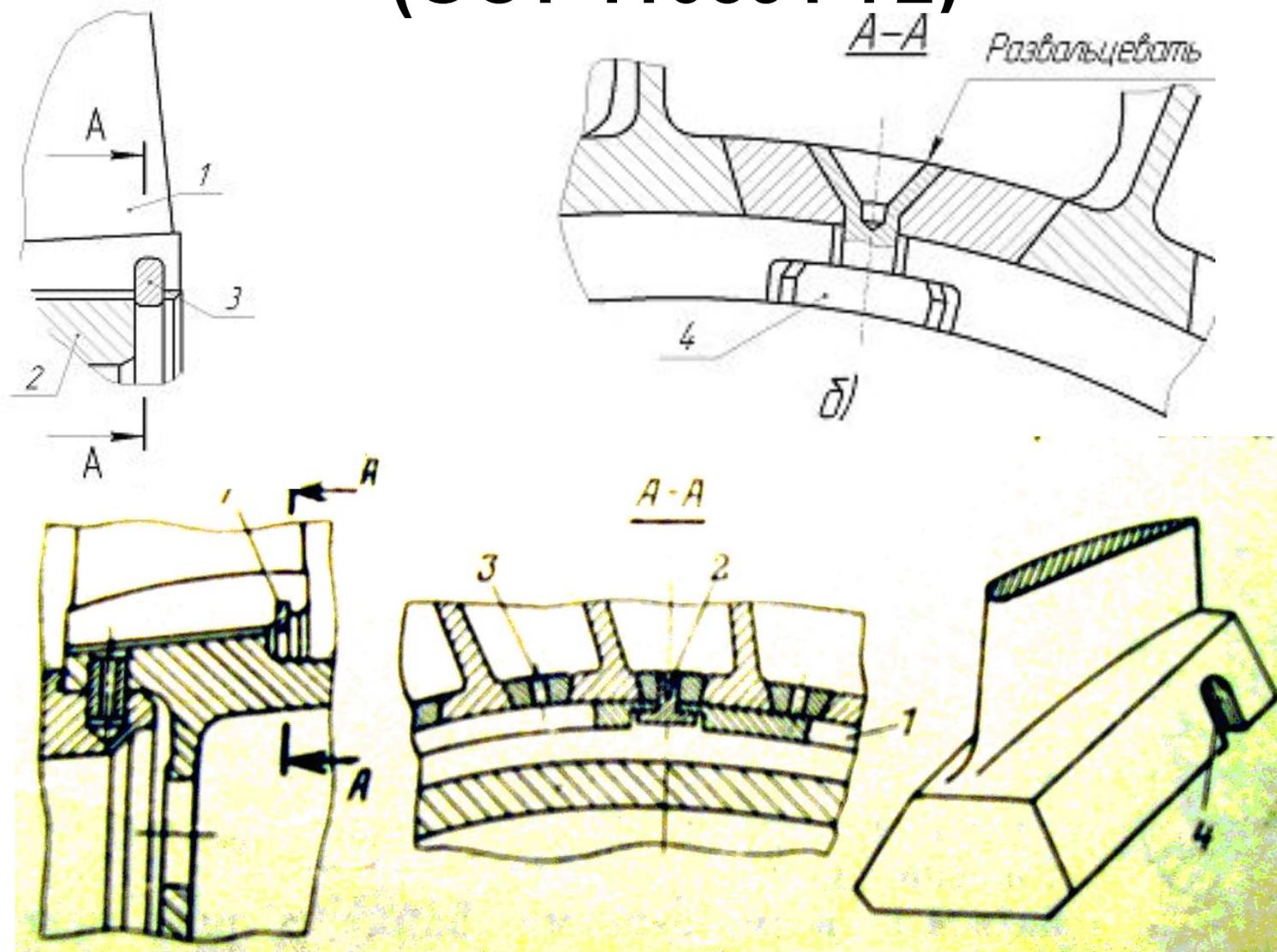
ТРАКТОВЫЕ
КОЛЬЦА



КВД RB-199

ТРАКТОВЫЕ КОЛЬЦА

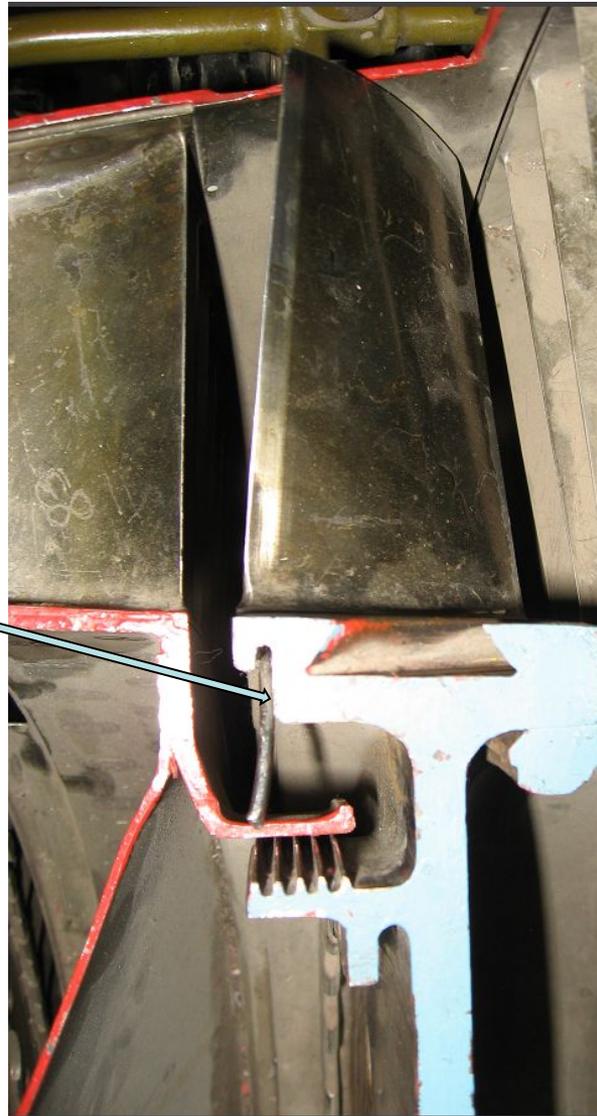
ФИКСАЦИЯ РАЗРЕЗНЫМИ КОЛЬЦАМИ (ОСТ 110591-72)



ТРД Р11-Ф2-300

ОСЕВАЯ ФИКСАЦИЯ ЛОПАТКИ КНД ТРДФ Р11Ф2-300

МЕТАЛЛИЧЕСКОЕ
РАЗРЕЗНОЕ
КОЛЬЦО



ФИКСАЦИЯ КОЛЬЦАМИ

ТРДД РОЛЛС-РОЙС ПЕГАС



КОЛЬЦО

ФИКСАЦИЯ ВРАЩАЮЩИМСЯ КОКОМ



ТРДД РОЛЛС-РОЙС ПЕГАС

ОКРУЖНАЯ ФИКСАЦИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК КВД ТРДДФ АЛ-31

ЛОПАТКИ РАЗМЕЩАЮТСЯ В КОЛЬЦЕВЫХ ПАЗАХ



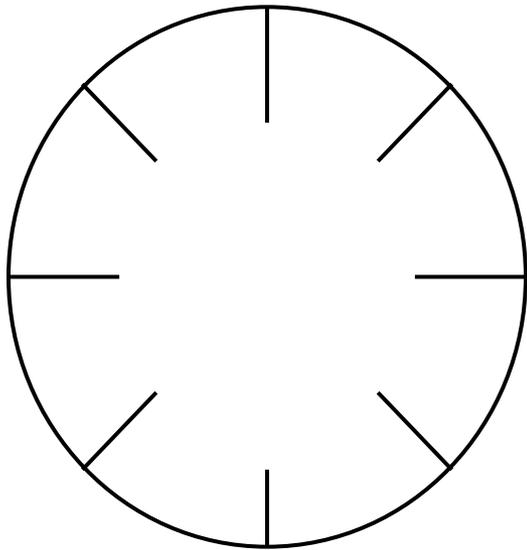
ФИКСАТОРЫ

НАПРАВЛЯЮЩИЕ АППАРАТЫ

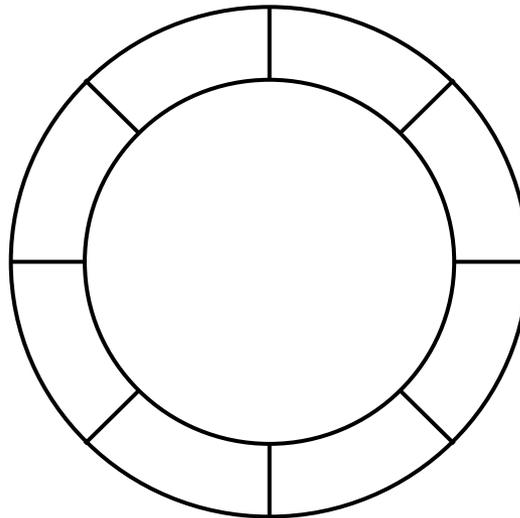
Требования к НА

- Достаточная прочность и жесткость
- Простота конструкции и технологичность
- Минимальная масса
- Минимальные потери на трение

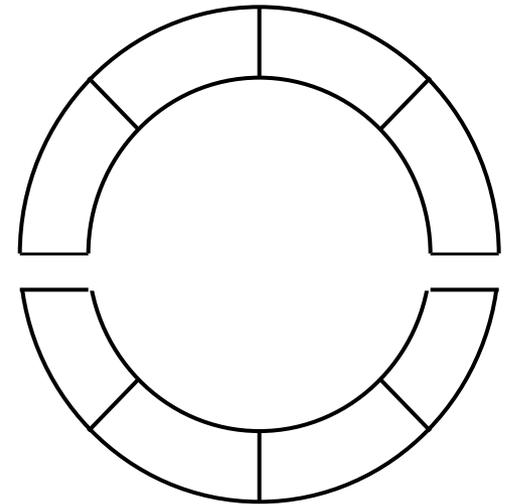
Типы НА



консольный



рамный



разъемный НА
из двух полуколец

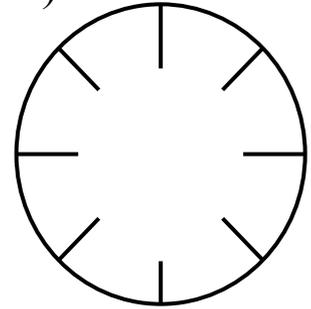
АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ НА Консольного типа

Применяются при небольшой высоте лопаток (менее 60мм)

Достоинства: простота, малая масса.

Недостатки:

увеличенные концевые потери, пониженная прочность,
а также значительные статические и динамические деформации



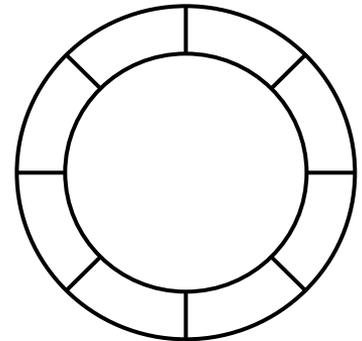
Рамного типа (не разрезные)

Достоинства

- Повышенная жесткость
- уменьшенные концевые потери.
- Равномерная поперечная жесткость.

Недостаток

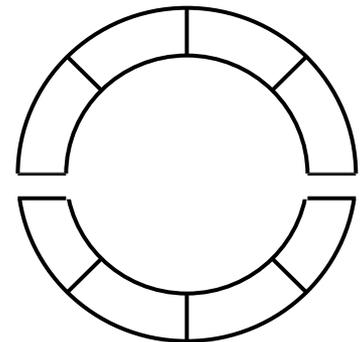
Ротор должен быть разъемным



Рамного типа (разъемные из двух полуколец)

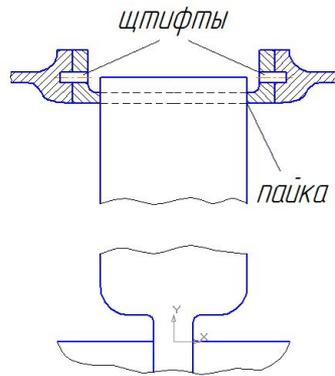
- Достоинства:**
- Повышенная жесткость,
 - уменьшенные концевые потери.
 - Ротор может быть неразъемным

Недостаток: Неравномерность жесткости

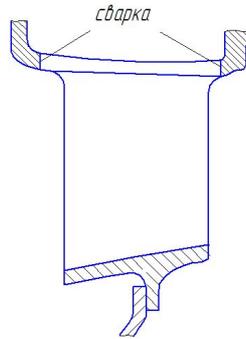


СПОСОБЫ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЛОПАТОК В НА

1 Пайка

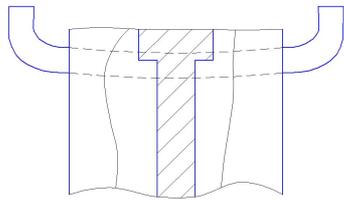


2 Сварка



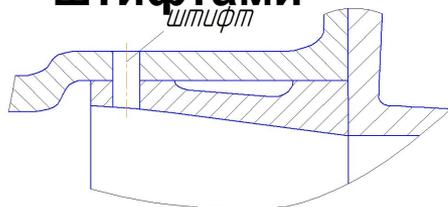
Пайка и сварка позволяют получить конструкцию НА высокой жесткости и технологичности. Однако низкий предел выносливости соединения, особенно при сварке, снижает достоинства таких конструкций. Поэтому в этом случае необходимо предусматривать меры по повышению сопротивления усталости швов (поверхностное упрочнение и др.)

3 Электроклепка

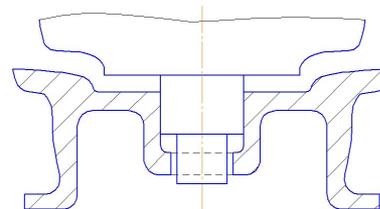


Электроклепка – это деформирование концов лопатки силой, направленной вдоль оси при местном нагреве электротоком

4 Крепление радиальными штифтами

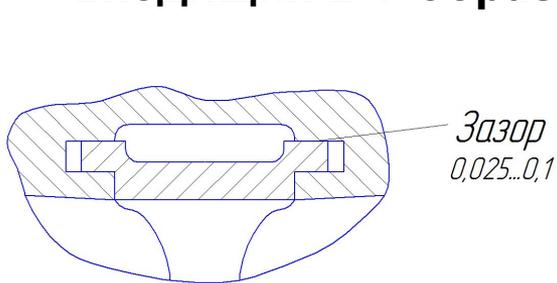


5 Закрепление на цапфе

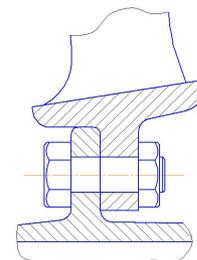


СПОСОБЫ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЛОПАТОК В НА

6 Крепление по буртам полок, входящих в Т-образный паз в корпусе



7 Фланцевое соединение



Т-ОБРАЗНЫЙ ЗАМОК



Достоинства:

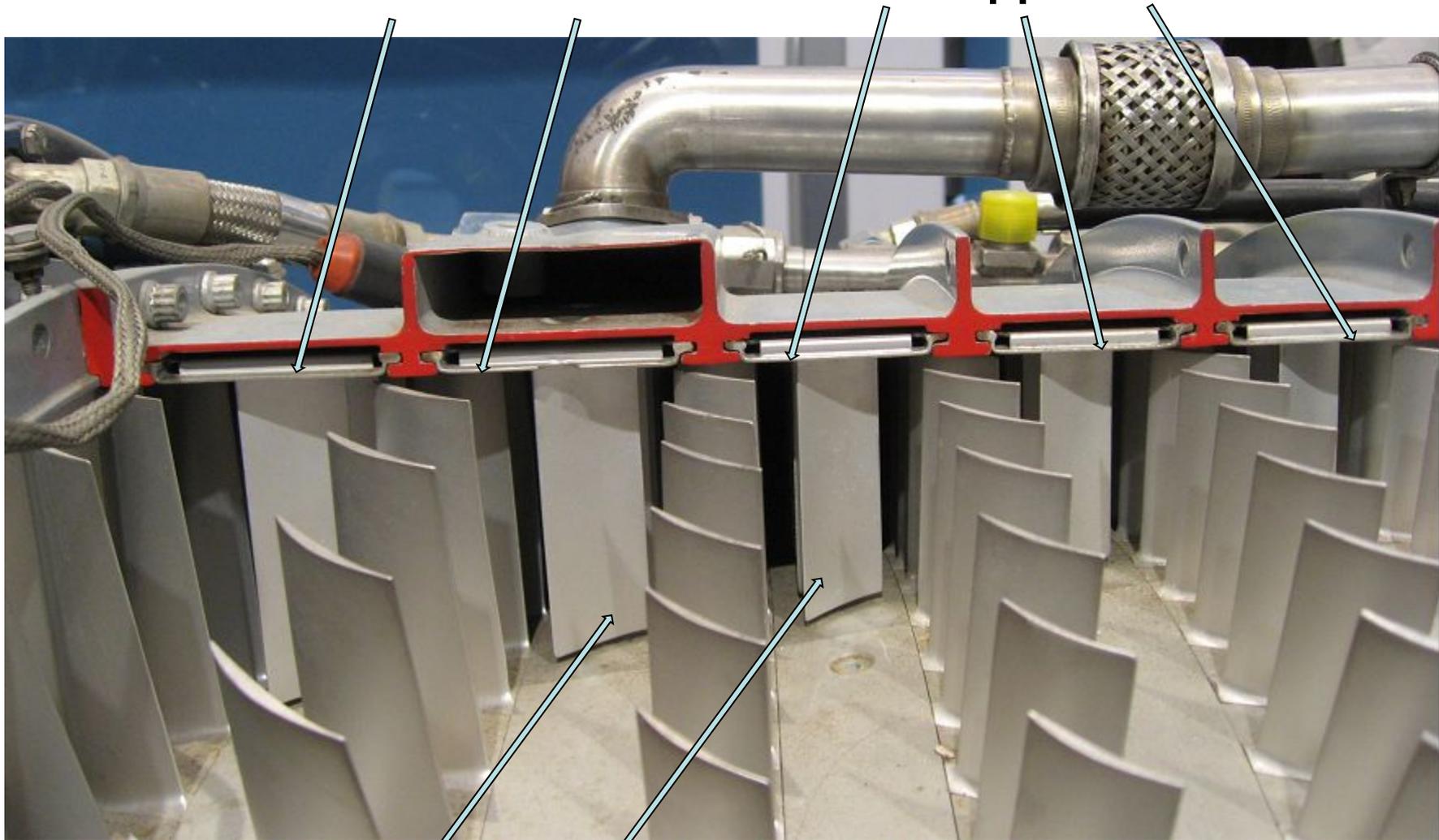
- 4,5,6 и 7 имеют повышенный предел выносливости конструкции,
- обладают высокой демпфирующей способностью за счет трения по поверхности контакта
- имеют повышенную ремонтпригодность.

Недостатки:

Увеличенная масса, повышенная трудоемкость изготовления.

ФЛАНЕЦ

ПРИМЕРЫ КОНСТРУКЦИЙ НА Т-ОБРАЗНЫЙ ЗАМОК НА ТРД J-79



КОНСОЛЬНЫЕ ЛОПАТКИ НА

ПАЯНЫЙ НАПРАВЛЯЮЩИЙ АППАРАТ КВД ТРДД JT-9



ПАЙКА



Демпфированный НА
ТРДД НК-8

ЗАКРЕПЛЕНИЕ НА ЦАПФЕ И СВАРКА



цапфа



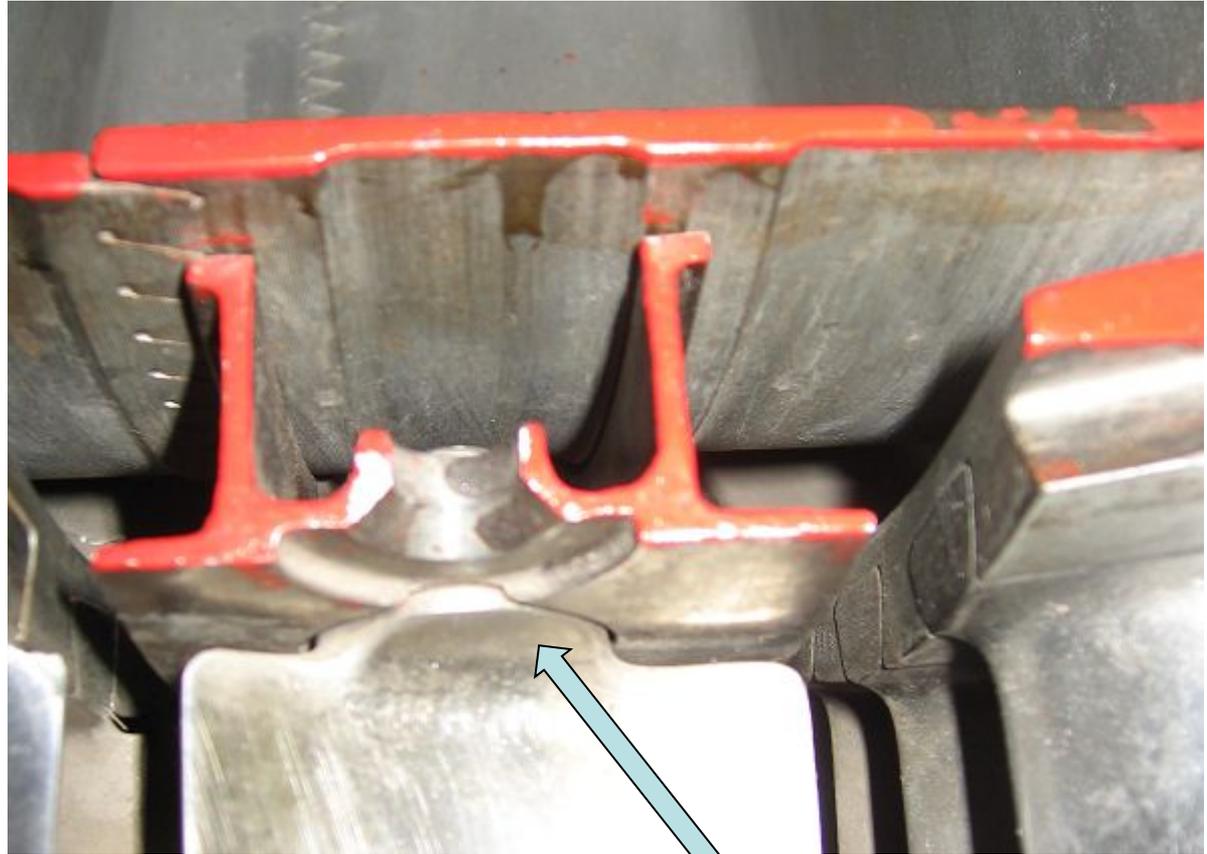
АИ-25

сварка



Д-36

ЗАКРЕПЛЕНИЕ НА ЦАПФЕ (ТРДД Д-20П)



цапфа

НАПРАВЛЯЮЩИЕ АППАРАТЫ ТРДД НК-8

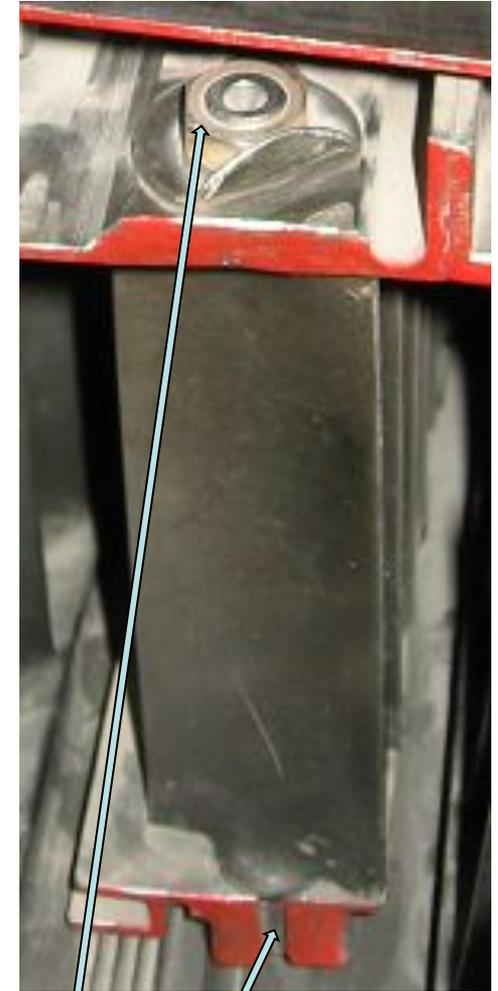
СВАРКА



Т-ОБРАЗНЫЙ ЗАМОК



ФЛАНЕЦ



ЦАПФЫ