

СВОЙСТВА ОСНОВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

№ п/п	Название материала	Плотность, г/см ³	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, МПа
1	Алюминий	2,7	300	70000
2	Титан	4,5	900	110000
3	Сталь	8	1050	210000
4	Композит	1,6	500	20000

МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В КОМПРЕССОРЕ

Выбор материалов деталей компрессора определяется их тепловым состоянием, действующими нагрузками и требуемым ресурсом

Требования к материалам

- Максимальное значение удельной прочности σ/ρ
- Обеспечение требуемого запаса прочности при нагреве
- Специальные свойства:
 1. Анतिकоррозионная стойкость
 2. Износостойкость
 3. Возможность изготовления прогрессивными способами
 4. Противопожарная безопасность

МАТЕРИАЛЫ ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Диски

Изготавливают штамповкой с последующей механической обработкой. Пазы под лопатки протягивают. Торцовые шлицы фрезеруют и протягивают дисковыми протяжками.

При $T < 500\text{K}$ используют алюминиевые сплавы АК-4, АК-6, ВД-17
При $T = 700 \dots 800\text{K}$ – титановые сплавы ВТ3-1,
Выше – жаропрочные сплавы 40ХНМА, 13Н14ВФА.

К дискам предъявляются следующие основные технические требования:
биение наружных и торцовых поверхностей не более 0,05 мм,
разность шагов между пазами под лопатки не более 0,02мм.

Рабочие лопатки

Изготавливают механическим или электромеханическим способом, точной штамповкой, чеканкой, вальцовкой.

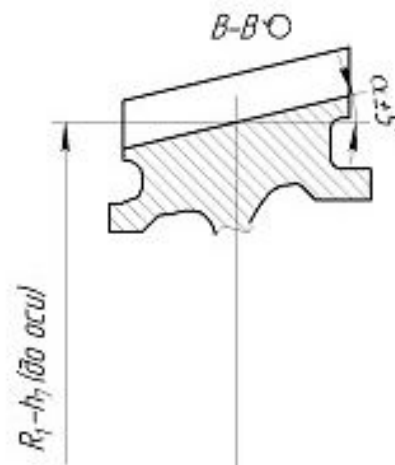
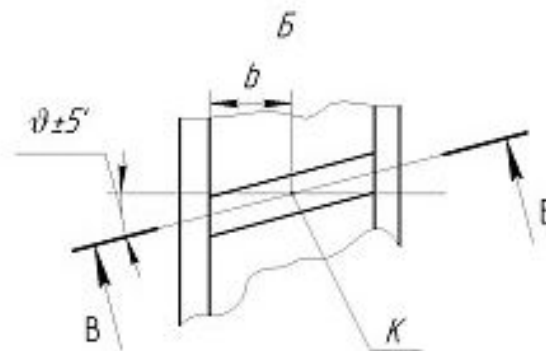
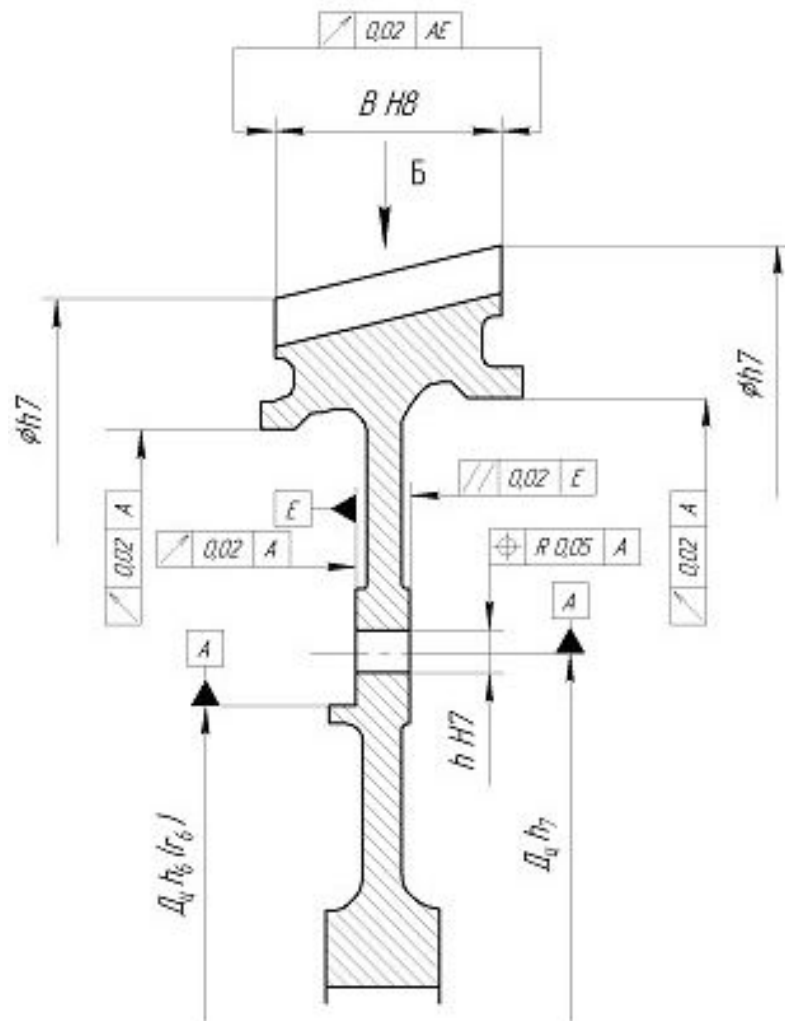
На первых ступенях применяют стальные лопатки, т.к. возможно повреждение посторонними телами.

- Сталь ЭИ 961 (13Х12НВМФА), ЭИ 736 (13Х14НВМФРА)
- Титановые сплавы ВТ-9, ВТ-20
- Алюминиевые сплавы АК-4, ВД-17.
- Композиционные материалы.

Кафедра
КиПДЛА



ОСНОВНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ДИСКА



АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ ЛОПАТОК

В ТРДД с большой степенью двухконтурности вентиляторные лопатки имеют большой размер, поэтому их делают из титановых сплавов и часто пустотелыми. Риски и царапины на лопатках сильно снижают предел выносливости, поэтому их обычно полируют. Для защиты от коррозии лопатки покрываются защитным слоем (алюминиевым анодированием)

Лопатки направляющих аппаратов выполняются из таких же материалов, что и рабочие лопатки.

Титановые сплавы широко используются в компрессорах, но необходимо помнить о возможности возникновения титановых пожаров при касании титана о титан.

Внимание! Опасность! Титановый пожар

В последнее время появилась тенденция к использованию композиционных материалов (лопатки вентилятора, оболочки – там, где позволяет температура).

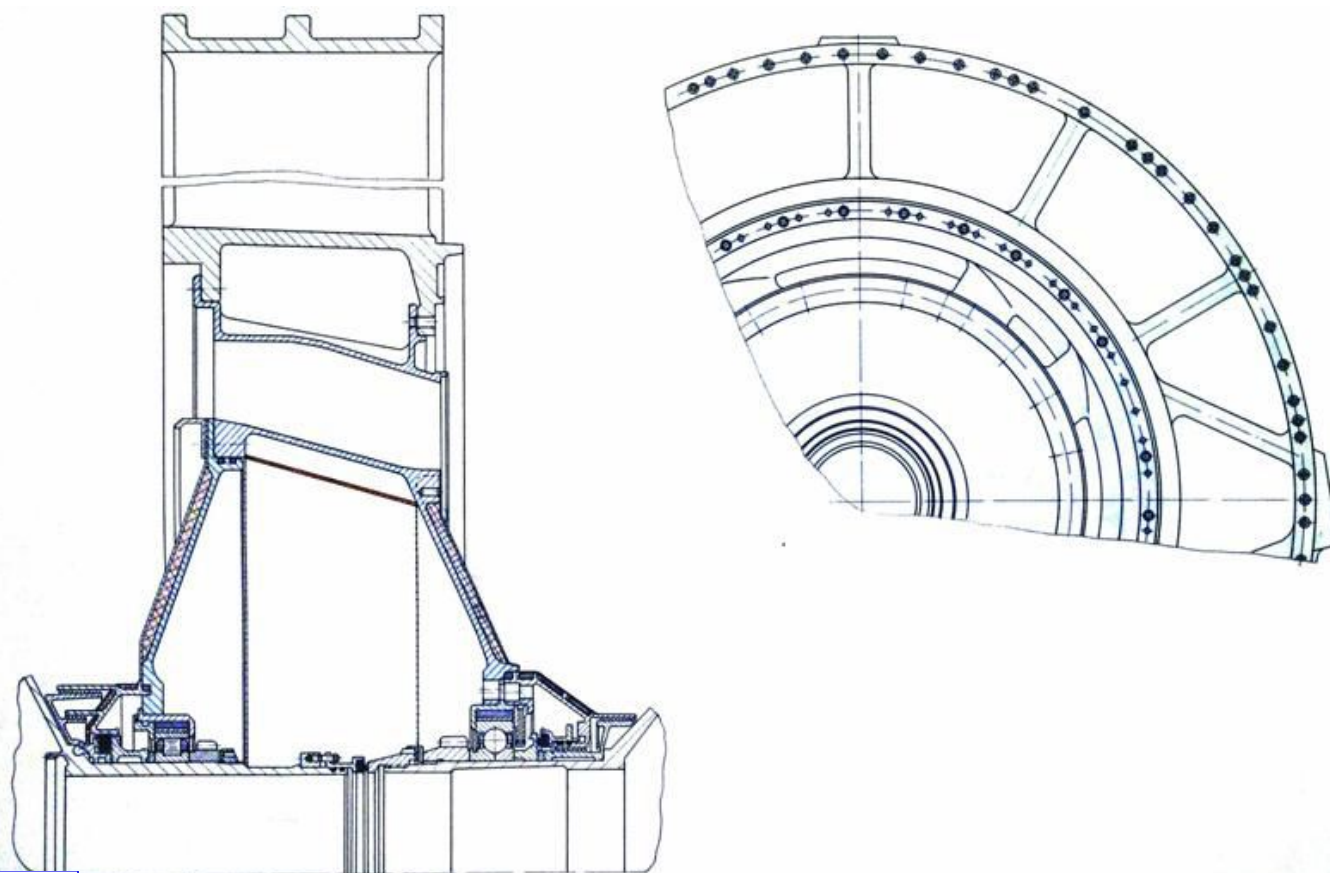
Достоинства композитов
•Малый вес
•Высокое демпфирование

КОРПУСА ОПОР

Корпуса опор – литые (АЛ-5)

или магниевые сплавы (МЛ-5).

Сварные корпуса выполняют из листовой стали (1Х18Н9Т).



ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

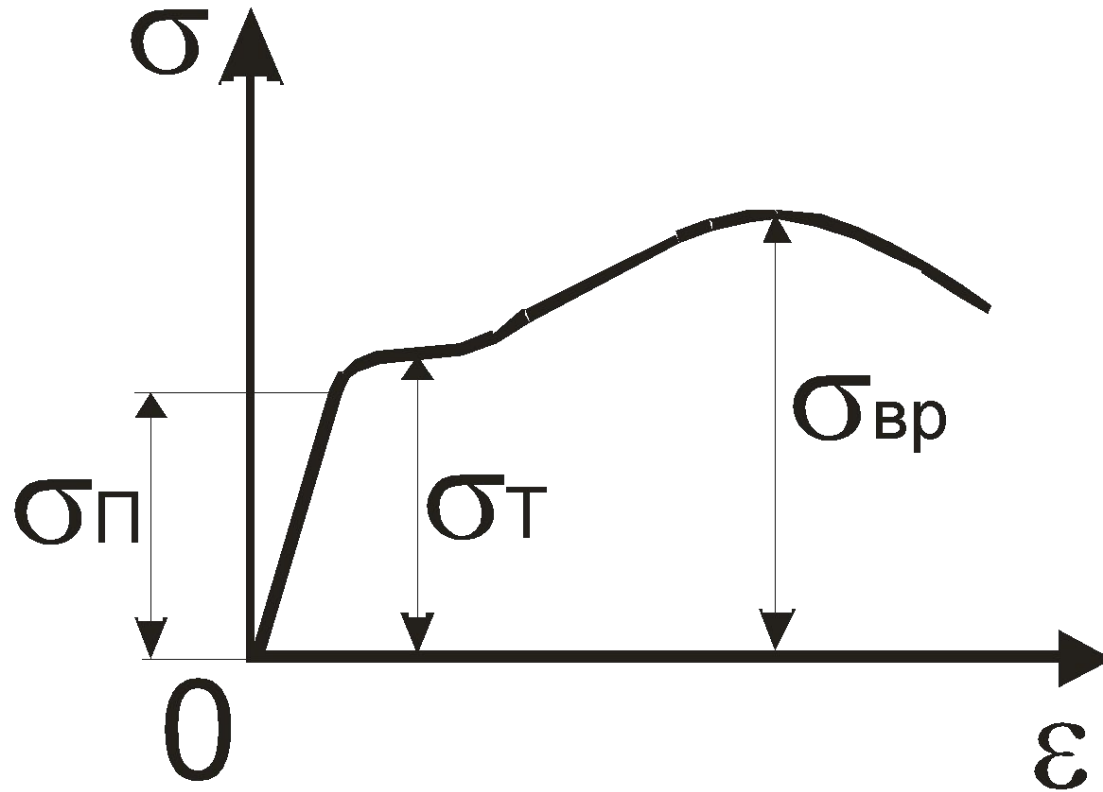
ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ

Детали турбин находятся под действием статических и динамических нагрузок, высокой температуры, работают в среде агрессивных газов

ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ

- Высокое значение жаропрочности
- Высокое значение предела выносливости σ_{-1} , обеспечивающее прочность при переменных нагрузках
- Термостойкость – это способность материала работать без трещин при переходе температуры от минимума к максимуму и наоборот
- Высокая пластичность (низкая чувствительность материала к концентраторам напряжений).
- Жаростойкость – способность материалов сопротивляться газовой коррозии при высокой температуре в течение длительного времени.

ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ



Наибольшее напряжение, до которого материал следует закону Гука, называется пределом пропорциональности $\sigma_{п}$.

Предел текучести - это напряжение, при котором происходит рост деформации без заметного увеличения нагрузки.

Отношение максимальной силы, которую способен выдержать образец, к его первоначальной площади поперечного сечения носит название предела прочности или временного сопротивления $\sigma_{вр}$.

ПРЕДЕЛ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ

$$\sigma_{\tau, T}^{\nu}$$

$$\sigma \text{ [кг/мм}^2\text{]}$$

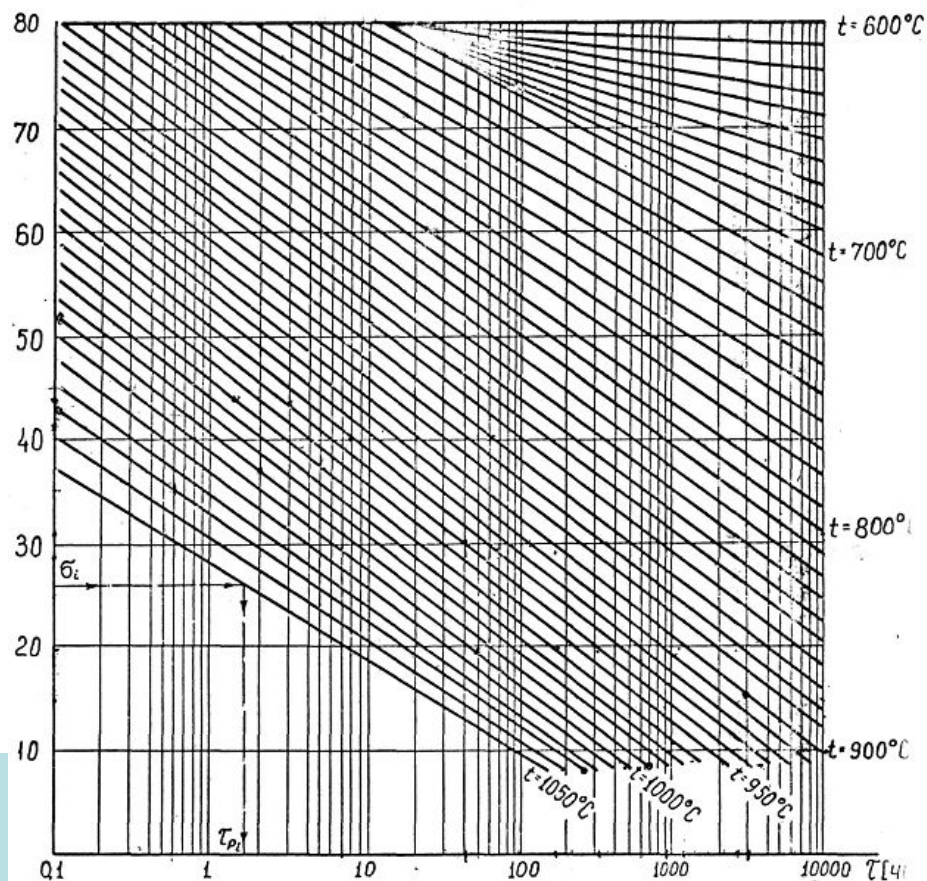
ЖАРОПРОЧНОСТЬ

Пределом длительной прочности для сталей и сплавов, работающих при высокой температуре, называется отношение нагрузки, при которой происходит разрушение растянутого образца через заданный промежуток времени, к первоначальной площади сечения.

На основании предела длительной прочности определяется ресурс работы двигателя.

Для этого из графика по известной величине напряжений и температуры определяется время работы τ до разрушения.

Предел длительной прочности определяет жаропрочность материала.



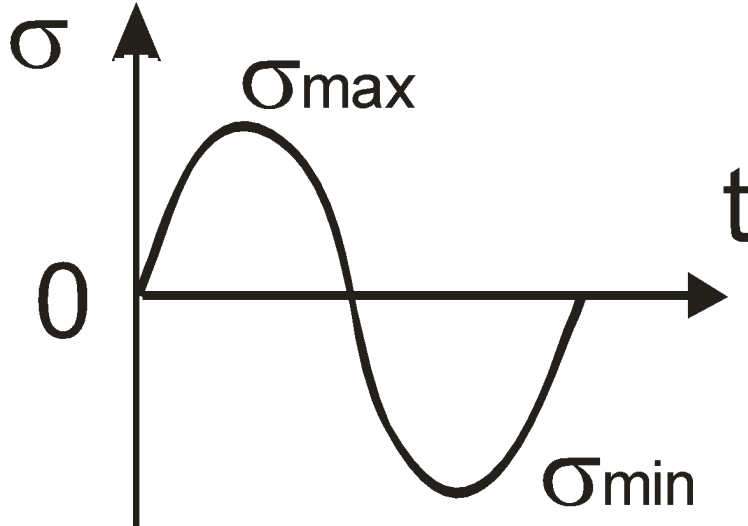
Шкала времени - логарифмическая



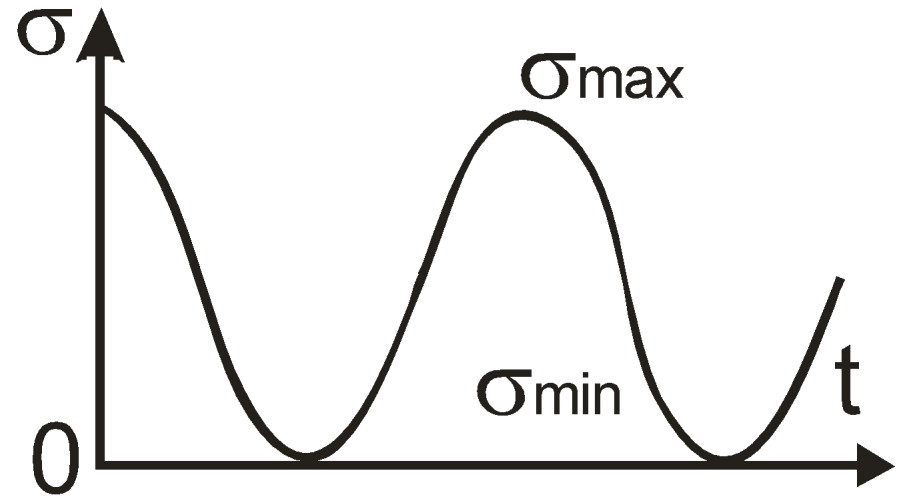
Возникает при динамических (изменяющихся во времени) нагрузках.

ЦИКЛЫ НАГРУЖЕНИЯ

СИММЕТРИЧНЫЙ



ПУЛЬСАЦИОННЫЙ (ОТНУЛЕВОЙ)



Обозначим максимальное и минимальное напряжения цикла соответственно σ_{\max} и σ_{\min} . Их отношение r называется коэффициентом асимметрии цикла.

В случае $\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$ $r = -1$ и цикл называется симметричным.

Если $\sigma_{\max} = 0$ или $\sigma_{\min} = 0$, то цикл называется пульсационным и $r = 0$.

Пример пульсационного цикла – нагружение зуба шестерни при передаче крутящего момента. Пример симметричного – колебания вала при прямой синхронной прецессии.

Циклы, имеющие одинаковые показатели r , называются подобными.

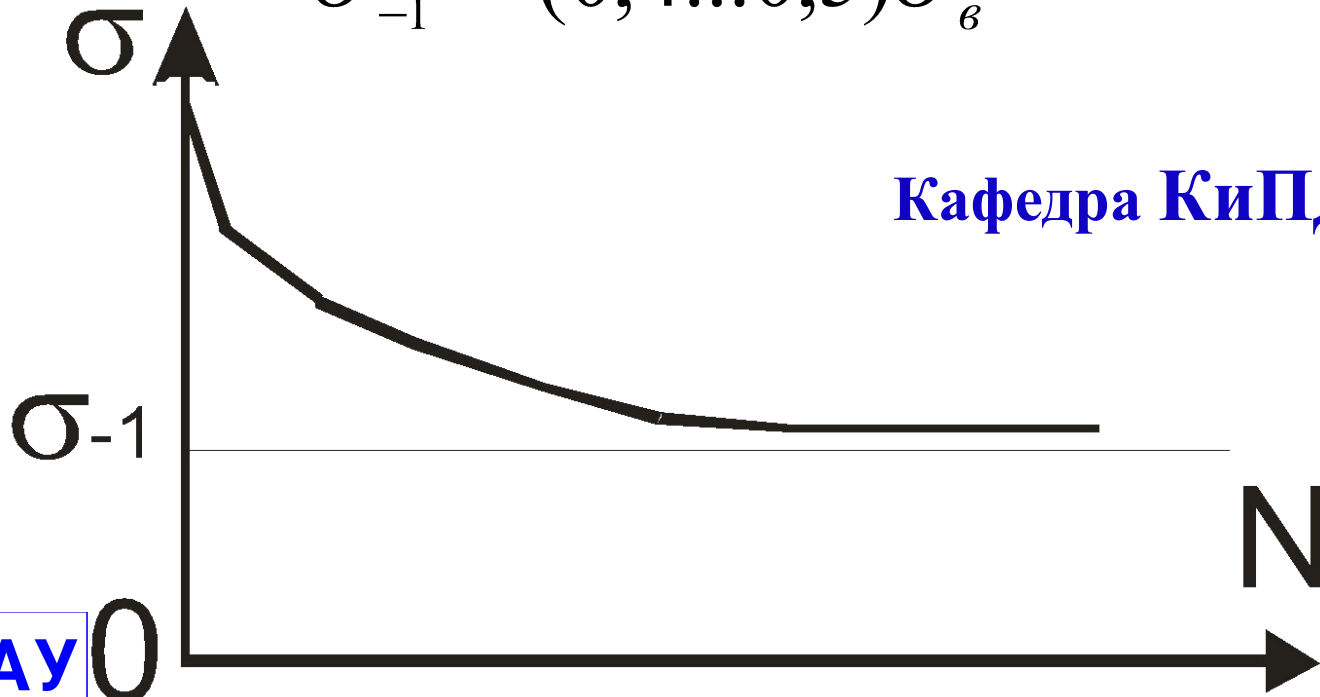
ПРЕДЕЛ УСТАЛОСТИ

Опыт показывает, что для большинства черных металлов можно указать такое наибольшее максимальное напряжение, при котором материал не разрушается при любом числе циклов.

Такое напряжение называется пределом усталости, или пределом выносливости.

Предел выносливости обозначается σ_r , где индекс r соответствует коэффициенту асимметрии цикла. Для симметричного цикла имеем σ_{-1} и т.д. Обычно считается, что

$$\sigma_{-1} \approx (0,4 \dots 0,5) \sigma_{\sigma}$$



Кафедра КиПДЛА

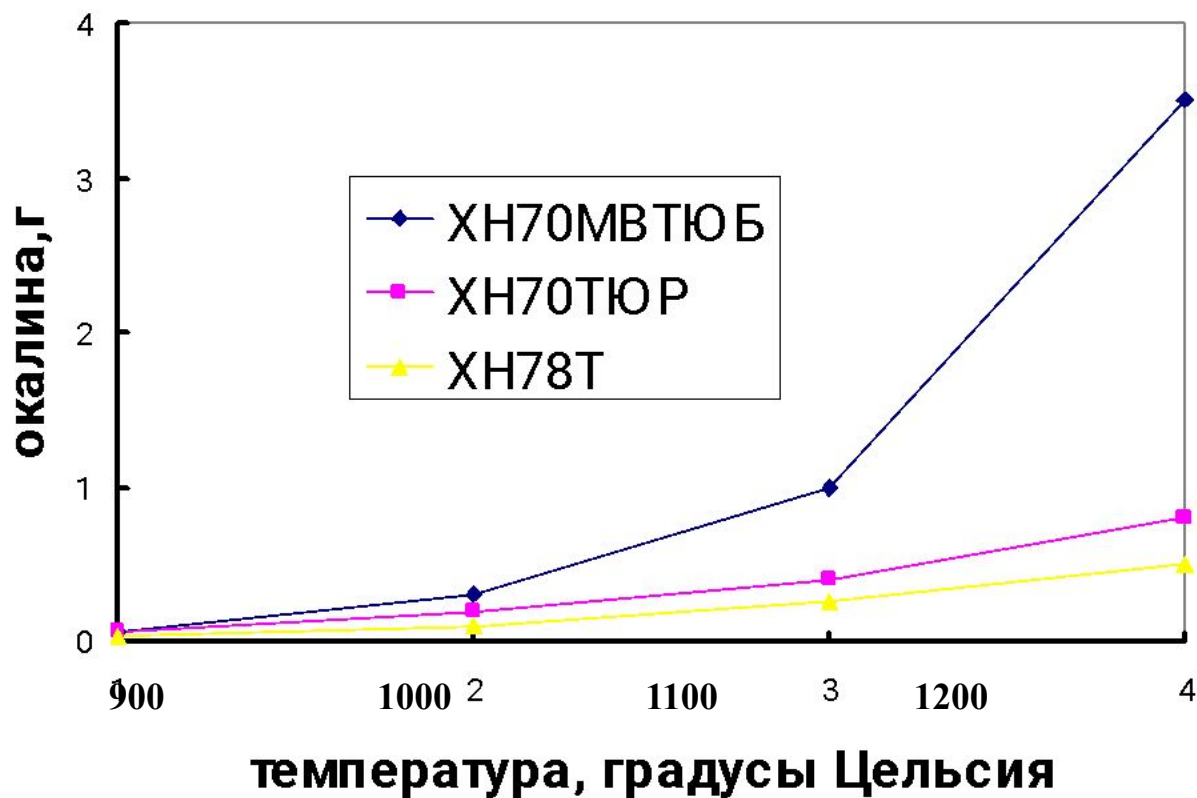
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖАРОСТОЙКОСТИ

Жаростойкость сплава – количество окалины при нагревании в атмосфере воздуха, г/м²•час

Материал	Температура испытания, °С			
	900	1000	1100	1200
ХН70МВТЮБ	0,07	0,3	1,0	3,5
ХН70ТЮР	0,07	0,2	0,4	0,8
ХН78Т	0,03	0,09	0,25	0,50

ЗАВИСИМОСТЬ ЖАРОСТОЙКОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

жаростойкость сплавов



ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ

Жаропрочные сплавы — металлические материалы, обладающие высоким сопротивлением пластической деформации и разрушению при действии высоких температур и окислительных сред.

Начало систематических исследований жаропрочных сплавов приходится на конец 1930-х годов — период нового этапа в развитии авиации, связанного с появлением авиационных ГТД.

СОСТАВ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Жаропрочные сплавы могут иметь следующую основу:

- алюминий
- титан
- железо
- медь
- кобальт
- никель
- хром

Наиболее широкое применение в авиационных двигателях получили **никелевые** жаропрочные сплавы, из которых изготавливают рабочие и сопловые лопатки, диски ротора турбины, детали камеры сгорания и т. п.

ВИДЫ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

В зависимости от технологии изготовления никелевые жаропрочные сплавы могут быть:

- литейными**
- деформируемыми**
- порошковыми**

Наиболее жаропрочными являются литейные сложнолегированные сплавы на никелевой основе, способные работать до температур 1050—1100 °С в течение сотен и тысяч часов при высоких статических и динамических нагрузках.

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ

Первые жаропрочные стали для газотурбинных двигателей были разработаны в Германии фирмой [Krupp](#) в 1936—1938 годах. Высоколегированная аустенитная сталь [Тинидур](#) создавалась как материал рабочих лопаток турбины на температуры 600—700 °С. В 1943-44 годах годовое производство [Тинидур](#) составляло 1850 т

Первые серии реактивного двигателя [Jumo-004](#) выпускались с 1942 года с монолитными рабочими и сопловыми лопатками из материала [Тинидур](#). Позднее заменены полыми охлаждаемыми лопатками из того же материала.

Это позволило повысить температуру газа перед турбиной до 850 °С

С 1944 года на двигателе Jumo-004 применялись охлаждаемые рабочие лопатки из менее дефицитной стали [Cromadur](#).

ПЕРВЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ

К 1942 году в Великобритании создан жаропрочный сплав нимоник-80 — первый в серии высокожаропрочных дисперсионно-твердеющих сплавов на никель-хромовой основе. Основа сплава нимоник-80 — нихром твердеющих сплавов на никель-хромовой основе. Основа сплава нимоник-80 — нихром (80 %Ni — 20 %Cr), известный с начала XX века своей высокой жаростойкостью и высоким электрическим сопротивлением.

Лопатки турбины из сплава нимоник-80 обладали высокой длительной прочностью при температурах 750—850 °С.

В СССР аналогами сплава нимоник-80 являются никелевые жаропрочные сплавы ЭИ437, ЭИ437А (ХН77ТЮ) и ЭИ437Б (ХН77ТЮР), срочным порядком созданные к 1948 году сотрудниками ВИАМ, ЦНИИЧермет и завода «Электросталь».

РАЗВИТИЕ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

жаропрочных сплавов составляли железо жаропрочных сплавов

составляли железо или никель. Добавлялось

значительное количество хрома значительное количество хрома для увеличения коррозионной стойкости.

Добавки алюминия Добавки алюминия, титана Добавки алюминия, титана или ниобия увеличивали сопротивление ползучести.

В конце 40-х годов прекратилось, в основном, использование железа как основы жаропрочных сплавов, предпочтение начали отдавать сплавам на основе никеля и кобальта.

В конце 1940-х годов была обнаружена возможность дополнительного упрочнения жаропрочных сплавов путём легирования молибденом. Позже для этой же цели начали применять добавки таких элементов, как вольфрам элементов, как вольфрам, ниобий элементов, как

обий, тантал элементов, как вольфрам, ниобий, тантал,

ЛИТЕЙНЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ НИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ

Литейные жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС), предназначенные для производства турбинных лопаток авиационных двигателей, по своему химическому составу являются наиболее сложными из всех существующих сплавов конструкционного назначения. Они содержат до 10 основных легирующих элементов, не считая примесей. Жаропрочные сплавы на основе никеля, как правило, обладают сложным химсоставом, включающем 12 — 13 компонентов для получения необходимых свойств. Легирующие элементы, такие как кремний (Si), фосфор (P), сера (S), кислород (O) и азот (N) также контролируются. Содержание таких элементов, как селен (Se), теллур (Te), свинец (Pb) и висмут (Bi) должно быть ничтожно малым. Эти сплавы обычно содержат 10—12 % хрома (Cr), до 8 % алюминия (Al) и титана (Ti), 5-10 % кобальта (Co), а также небольшие количества бора (B), циркония (Zr) и углерода (C). Иногда

МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ЖНС

С переходом на технологию литья турбинных лопаток методом направленной кристаллизации были созданы специальные монокристаллические ЖНС.

В соответствии с международной классификацией в настоящее время разработаны пять поколений ЖНС для литья монокристаллических лопаток авиационных двигателей.

ЖНС первого поколения содержат традиционные легирующие элементы, такие как Al, Ti, Cr, Mo, W, Ta, Nb, Hf.

В состав ЖНС второго и третьего поколений вводят легирующий элемент Re в количестве 2–4% и 5–6% соответственно.

К четвертому и пятому поколениям относятся ренийсодержащие ЖНС, дополнительно легированные Ru. Вполне естественно, что в различных сплавах, условно относящихся к одному из указанных поколений, основные легирующие элементы присутствуют в различных комбинациях.

Каждое новое поколение ЖНС позволяет увеличить рабочую температуру турбинной лопатки на 20–25°C. По данным ЦИАМ, максимальная температура газа перед турбиной увеличилась с 1300–1450 К в двигателях третьего поколения до 1800–1950 К в двигателях пятого поколения. Такой рост температуры рабочего газа был достигнут за счет повышения эффективности систем охлаждения и применения монокристаллических лопаток из ЖНС с повышенными эксплуатационными характеристиками.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ

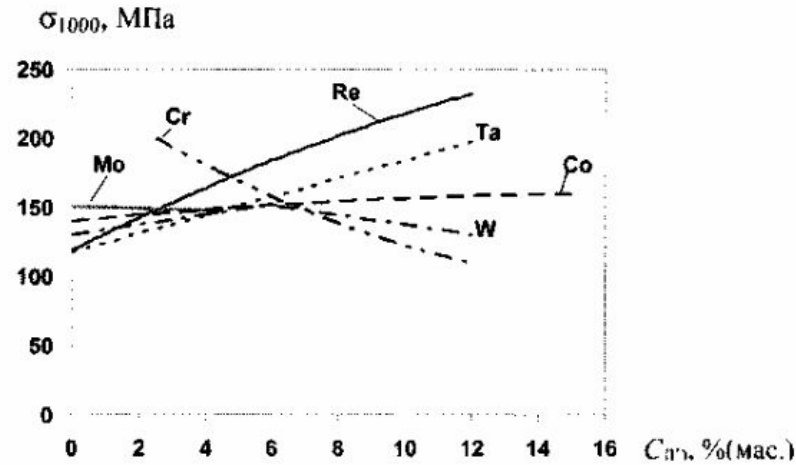


Рисунок 2. Влияние содержания легирующих элементов ($C_{лэ}$) на длительную прочность монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов при температуре 1000°C (база 1000 ч)

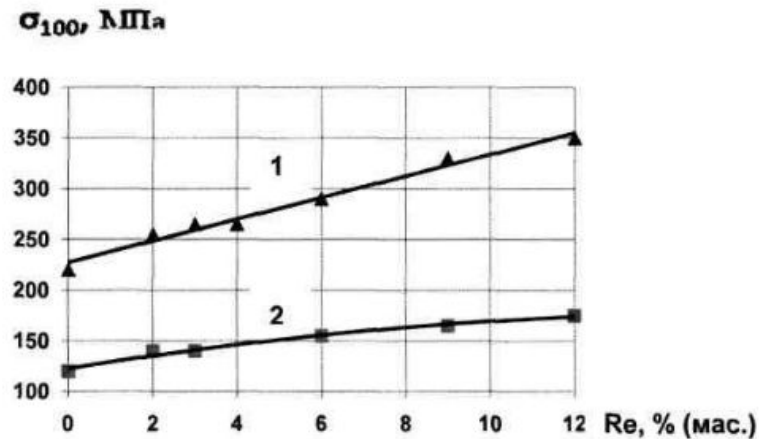


Рисунок 3. Влияние содержания рения на длительную прочность монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов при температурах 1000 (1) и 1100°C (2) (база 100 ч)

Кафедра КиПДЛА

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕМЕНТОВ ТУРБИН

В основном применяются жаропрочные сплавы на никелевой основе, в ряде случаев – на кобальтовой.

Лопатки – ЭП-220, ЖС-6(литейные)
Диски – ЭИ-437Б(ХН77ТЮР)
Корпус – литейные ВЖЛ-14
Листовые детали – ЭИ-435

При увеличении температуры необходимо применять охлаждаемые лопатки (при $T > 1000\text{C}$) или переходить на новые материалы

К ним относятся сплавы на никелевой, вольфрамовой или ниобиевой основе. Однако эти сплавы без специальных покрытий неработоспособны, т.к. уже при $T > 300^{\circ}\text{C}$ они насыщаются газами и интенсивно окисляются. Даже со специальными покрытиями трудно обеспечить необходимый ресурс.

Одним из путей значительного повышения температуры неохлаждаемых лопаток является использование керамических материалов – таких, как нитрид кремния или карбид кремния. Они позволят работать без охлаждения до 1600К.

НОВЕЙШИЕ МАТЕРИАЛЫ

ЖС-32 – 5% рения и 5% тантала. Применяется в ОАО «Авиадвигатель», Пермь и на «Салюте». В ОАО Кузнецов пока не нашел применения из-за высокой стоимости.

Рения в России добывается не более 500кг в год.

На ПС-90 – ЖС-28, на НК-93 – ЖС-26. Это монокристаллические сплавы. Стоимость 1 заготовки диска первой ступени турбины НК-93 – 40000\$.



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ

Детали горячей части ГТД (КС, проточная часть турбины и др., у которых температура поверхности может быть более 850 градусов С) могут длительно работать только при наличии на поверхности специальных защитных покрытий.

Покрытия разделяются на два класса

- **Металлические жаростойкие покрытия** для защиты поверхности от коррозионно-эрозионного воздействия рабочей среды. Покрытия могут быть одно- и многослойными, где каждый слой отличается своим химическим составом и толщиной.
- **Комплексные теплозащитные покрытия (ТЗП)** с керамическим термобарьерным слоем, которые, наряду с защитой поверхности от коррозионного воздействия среды уменьшают воздействие теплового потока.

СОСТАВ ПОКРЫТИЙ

В состав жаростойких покрытий входит больший, чем в основном материале деталей процент элементов, образующих устойчивые оксидные пленки, таких как алюминий или хром.

Механизм действия жаростойких покрытий сводится к непрерывному образованию на поверхности оксидных пленок Al_2O_3 и Cr_2O_3 за счет диффузии алюминия и хрома из покрытия к поверхности деталей под действием высоких температур.

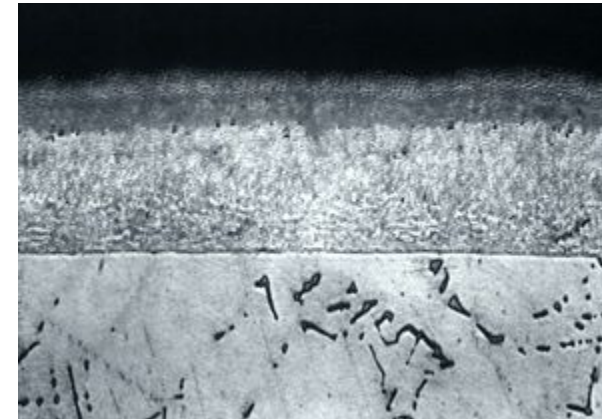
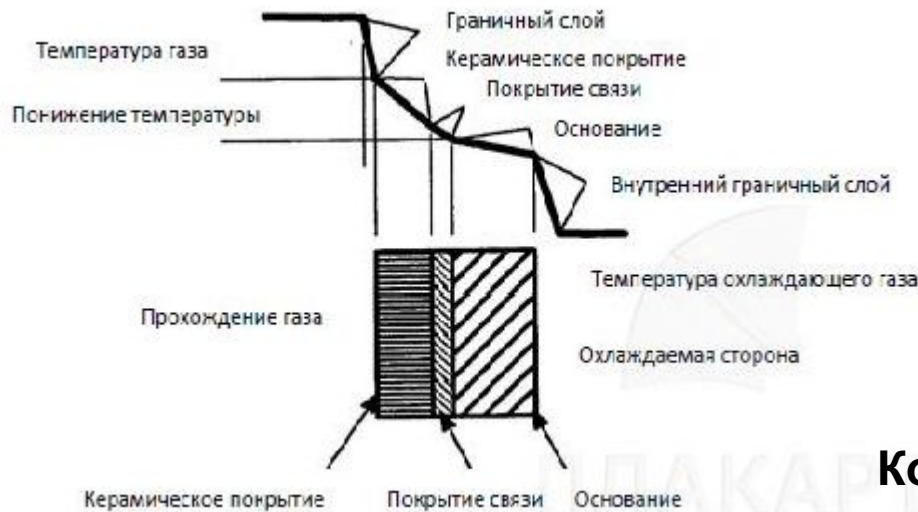
КОМПЛЕКСНЫЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Увеличение несущей способности достигается за счет :

- уменьшения температуры основного материала
- увеличения продолжительности темпов нагрева и охлаждения при изменении режимов работы двигателя.

Одновременно повышается сопротивление высокотемпературному окислению как за счет снижения температуры на металле, так и за счет уменьшения доступа кислорода и продуктов сгорания топлива к поверхности металла.

Керамический слой из-за своей пористости не может полностью изолировать поверхность от коррозионного воздействия среды.



Конденсационно-диффузионное ТЗП

ПРИНЦИП РАБОТЫ ТЗП

Структура покрытия получается столбчатой, где отдельные кристаллы керамики слабо связаны между собой, и тесно связаны только с поверхностью лопатки. Подобная структура со слабой связью между кристаллами снижает модуль упругости керамического слоя и позволяет покрытию расширяться без заметных разрушений.

Особенностью описанной конструкции ТЗП является то, что на окончательно готовом покрытии отмечается структурная сетка, или блочность с незначительным растрескиванием по границам блоков, что не является дефектом и не снижает работоспособности покрытия.

Важным условием надежной работы ТЗП является наличие высокоэффективной системы конвективного охлаждения, когда на основных, а лучше на всех режимах работы двигателя поверхностные слои испытывают напряжения сжатия.

При этом границы между блоками замыкаются и не пропускают к многослою горячий газ, что существенно повышает ресурс деталей.

Можно считать, что качественное нанесение ТЗП увеличивает ресурс лопаток турбины примерно в десять раз.