

качестве и конкурентоспособности авиакосмической продукции и, в конечном счете, на оборонном потенциале страны.

Основу минерально-сырьевой базы титана РФ составляют 20 месторождений (из них 11 коренных и 9 россыпных), сравнительно равномерно размещенных по территории страны. Уникальным по своему происхождению, запасам и содержанию диоксида титана в рудах, а также по наличию в нем нефти является Ярегское месторождение лейкоксеновых нефтеносных песчаников, расположенное в Республике Коми. К ильменитоносным россыпям относятся Тулунское (Иркутская обл.) и Николаевское (Кемеровская обл.) месторождения, россыпи комплексного состава представлены Центральным (Тамбовская обл.), Лукояновским (Нижегородская обл.), Тарским (Омская обл.), Туганским и Георгиевским (Томская обл.) месторождениями. Проведенный анализ современного состояния минерально-сырьевой базы титана позволяет отнести к активным лишь 31,2% запасов, из которых 29,2% – запасы собственно титановых месторождений и 2% – запасы месторождений, из руд которых титан извлекается попутно. Выделяемые в качестве активных и перспективно оцененных запасы позволяют нашей стране решить вопрос обеспечения внутренних потребностей и возможности выхода ее на сформировавшийся международный рынок титанового сырья.

Решение вышеуказанных проблем, в частности снижения цен на титановую продукцию, по мнению специалистов, может быть осуществлено путем проведения ряда мероприятий, таких как:

- организация альтернативного производства титановых полуфабрикатов на базе Ступинской титановой компании (СТК), Ступинского металлургического комбината (СМК), Всероссийского института легких сплавов (ВИЛС), ОАО МЗ «Электросталь» и др.;
- поставка титановых полуфабрикатов оборонным заводам страны по внутренним ценам;
- создание новых прогрессивных технологических процессов, радикально снижающих энергетические затраты и повышающих коэффициент использования металла, – таких как экструзия, изотермическая деформация, энергосберегающие процессы термической обработки, фасонное литье.

*А.Н. Петухов**

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ И ДЕТАЛЕЙ ИЗ НИХ

Внедрение новых конструктивных решений, перспективных материалов и технологических процессов требует глубоких всесторонних исследований напряженно-деформированного состояния (НДС), механических свойств материалов и прочности натуральных деталей в условиях, приближенных к эксплуатационным по воздействию статических, циклических и вибрационных нагрузок и эксплуатационных температур.

Конструктивные особенности деталей ГТД (лопатки, диски, валы и др.), эксплуатационные условия, формирующие их НДС, и несущая способность тесно связаны с технологией изготовления и оказывают решающее влияние на сопротивление МЦУ и МнЦУ.

В ЦИАМ выполнен ряд комплексных прочностных исследований на МЦУ, МнЦУ с целью выявления роли технологических, конструктивных и эксплуатационных факторов.

* ФГУП «ЦИАМ им. Баранова».

Влияние на МнЦУ технологических факторов

Показано, что несущая способность деталей из титановых сплавов в значительной мере определяется структурным состоянием сплава, которое зависит главным образом от условий термопластической деформации. Поэтому недостатки, допущенные на предварительных операциях и связанные с локальными структурными превращениями, нельзя полностью устранить путем отделочных и упрочняющих обработок (табл. 1).

Таблица 1

Влияние видов механической обработки на сопротивление МнЦУ сплава ВТЗ-1 и на значение величины показателя угла наклона кривой усталости m

Вид механической обработки и параметры шероховатости	σ_{-1} , МПа	Коэффициент влияния обработки β_n	Показатель угла наклона кривой усталости m
Точение ($R_a=5-2,5$ мкм)	310	0,86	21
Точение + шлифование ($R_a=1,25$ мкм)	360	1,0	23
То же + полировка:			
$R_a=0,63$ мкм	460	1,28	108
$R_a=0,16$ мкм	480	1,33	152
То же (при выполнении точения режимы не соблюдались)	330	0,92	24

Проведенные работы позволили выявить зависимость сопротивления усталости деталей из титановых сплавов роторов компрессоров от режимов механической обработки и от особенностей структурного состояния (общего и локального) материала [1–6]. Установлена хорошая корреляционная связь [3] между величиной предела выносливости σ_{-1} и показателем m наклона кривой усталости: чем выше значение m , тем выше предел выносливости (см. табл. 1).

При этом для каждого вида нагружения оптимальным в отношении прочности является структурное состояние. Например, максимальное сопротивление МнЦУ достигается путем измельчения структуры сплава, а максимальная длительная прочность и минимальная ползучесть обеспечиваются более грубой структурой и крупным зерном [1–9].

Показано, что на величину предела выносливости крупногабаритных лопаток в первую очередь влияет технологический, а не масштабный фактор. Для лопаток средней и малой размерности проблема достижения максимального предела выносливости решается однозначно.

В то же время для лопаток вентилятора и дисков, особенно колес типа «блиск», из-за сложности получения в различных зонах детали (ободу, полотне и ступице) оптимальной с точки зрения несущей способности микро- и макроструктуры, требуется компромиссное решение между различными критериями прочности: МнЦУ, МЦУ, длительной прочностью и ползучестью – с целью обеспечения максимальной прочности и необходимого ресурса.

Разработан и научно обоснован механизм комбинированного упрочнения деталей из титановых сплавов, и экспериментально подтверждена существенно более высокая эффективность метода (табл. 2) для повышения сопротивления усталости основных деталей ГТД, имеющих концентраторы напряжений α_σ , по сравнению с традиционными методами поверхностного упрочнения [4, 7, 10].

Влияние на сопротивление МнЦУ образцов с концентраторами напряжений режимов комбинированного упрочнения

Условный номер плавки	Исследованные варианты режимов обработки	σ_{-1} , МПа	Коэффициент влияния обработки β_{II}	Коэффициент концентрации напряжений α_{σ}
<i>I</i>	Исходный (точение + шлифование)	255	1,0	} 1,5
	Поверхностное упрочнение	305	1,2	
	Комбинированное упрочнение по режиму (условный номер):			
	<i>1</i>	380	1,49	
	<i>2</i>	390	1,53	
	<i>3</i>	360	1,41	
<i>II</i>	Исходный (точение + шлифование)	215	1,0	} 2,0
	Поверхностное упрочнение	310	1,44	
	Комбинированное упрочнение по режиму (условный номер):			
	<i>1</i>	365	1,70	
	<i>2</i>	450	2,1	
	<i>3</i>	430	2,0	
	<i>4</i>	420	1,95	
	<i>5</i>	250	1,16	

Влияние на МнЦУ лопаток эксплуатационных повреждений

Наиболее острой проблемой при эксплуатации ГТД является повреждение лопаток от попадания в воздушный тракт посторонних предметов. Показано, что степень снижения МнЦУ лопаток компрессора зависит от:

- глубины забоины, отнесенной к радиусу кромки;
- вида термической и термопластической обработки материала;
- наличия защитного покрытия или упрочняющей обработки.

Образование начальной трещины ($l_{тр}=1-2$ мм) в зоне повреждения существенно (в 3–4 раза) снижает предел выносливости детали [11, 12], при этом амплитуда напряжений, достаточная для роста трещины, может составлять всего 0,1 от величины предела выносливости новой лопатки.

В результате проведенных исследований впервые созданы нормативные документы, регламентирующие:

- методику нанесения повреждений лопаток в лабораторных условиях;
- подтверждение эффективности выполненного ремонта лопаток без их съема с двигателя проведением резонансных испытаний или ЭЦИ;
- нормирование в эксплуатации размеров допустимых повреждений;
- использование поврежденных лопаток компрессора в течение ограниченного ресурса;
- создание требований к разработчикам ГТД по обеспечению возможности контроля состояния всех лопаток компрессоров в процессе эксплуатации;
- обеспечение возможности ремонта поврежденных деталей в роторе в процессе эксплуатации без съема двигателя.

Влияние на МнЦУ фреттинг-коррозии

При отдельных испытаниях на фреттинг-коррозию и усталость титановые сплавы оказались менее чувствительными к повреждениям фреттинг-коррозией, чем стали. Это проявилось в значениях $K_{\sigma}^{\text{фр}}$ ($K_{\sigma}^{\text{фр}}$ – эффективный коэффициент концентрации при фреттинге), величина которых составляла 1,16–1,52, в то время как при повреждениях в аналогичных условиях стали 13X11H2BMФ (отпуск 560°C) коэффициент $K_{\sigma}^{\text{фр}}$ составлял от 1,33 до 2,4.

Однако в условиях одновременного воздействия фреттинга и переменных напряжений предел выносливости титановых сплавов снижается примерно в два раза больше, чем у сталей.

Установлено, что повреждаемость титановых сплавов фреттингом резко возрастает только при увеличении любого из параметров процесса (амплитуды или давления) и при испытаниях на фреттинг-усталость [11].

Способ повышения эксплуатационной живучести широкохордных лопаток вентилятора

Для повышения живучести широкохордных лопаток вентиляторов из титановых сплавов предложен новый способ их изготовления с помощью диффузионной сварки. При реализации этого способа в отличие от изготовления известных конструкций составных лопаток необходим минимальный объем механической обработки, не требуется применения процесса изотермической штамповки в условиях сверхпластичности, а также специального прессового оборудования. Весь процесс создания лопатки, включая проектирование конструкции, заготовок и изготовление, предусматривает обязательную компьютеризацию и автоматизацию.

Такая лопатка, принципиально отличаясь от известных, обладает, кроме того, дополнительными конструктивными и эксплуатационными преимуществами, которые обеспечивают возможность управления демпфирующими способностями материала лопатки; проведения частотной отстройки лопатки при сохранении оптимальных расчетных параметров наружного контура (проточной части компрессора); повышения живучести в несколько раз (за счет торможения роста трещин на границе слоев) и сопротивления повреждаемости лопаток от попадания посторонних предметов и птиц (птицестойкости) [8]; повышения стабильности прочностных свойств лопатки в целом и управления свойствами материала в заданных сечениях лопаток.

Рассмотрим возможность применения в качестве критериев повреждаемости в эксплуатации лопаток традиционных конструкций и слоистых лопаток параметров K_{σ} (эффективный коэффициент концентрации напряжений) и q_{σ} (коэффициент чувствительности к концентрации напряжений). В табл. 3 приведены значения этих коэффициентов, полученных при испытании плоских образцов из сплава Ti–6Al–4V и моделей слоистой лопатки: без повреждений ($\alpha_{\sigma}=1,0$) и при наличии повреждений ($\alpha_{\sigma}=2,9$ и $\alpha_{\sigma}=4,5$) в условиях симметричного (σ_{-1}) и асимметричных циклов нагружения (при $\sigma_m=250$ МПа и $\sigma_m=350$ МПа).

Значения пределов выносливости σ_{-1} , σ_a^* , коэффициентов K_σ и q_σ для различных значений σ_m^* , определенные по результатам испытаний моделей слоистых лопаток (BT6+BT1-0) и плоских образцов из сплава Ti-6Al-4V

Сплав	$\alpha_\sigma=1,0$			$\alpha_\sigma=2,9$						$\alpha_\sigma=4,5$			
	σ_{-1}	σ_a для σ_m		σ_{-1}	$\sigma_m=250$ МПа			$\sigma_m=350$ МПа			σ_{-1} , МПа	K_σ	q_σ
		250	350		σ_a	K_σ	q_σ	σ_a , МПа	K_σ	q_σ			
Слоистый материал Ti-6Al-4V	240	180	150	160	130	1,23	0,12	120	1,25	0,13	135	1,78	0,22
	360	290	250	120	50	2,4	0,73	35	7,14	$\gg 1,0$	30	12	$\gg 1,0$

* Амплитудное (σ_a) и среднее напряжение цикла (σ_m).

Для традиционных лопаток, в сечениях, где σ_m составляет 250 и 350 МПа, величины предельных амплитуд напряжений (σ_a) при наличии повреждений с $\alpha_\sigma=2,9$ снижаются соответственно с 120 до 50–35 МПа, т. е. в 2,4–3,4 раза, что, по существу, подтверждает недопустимость повреждений в данных условиях эксплуатации.

В этом диапазоне асимметрии цикла для слоистых моделей величина пределов выносливости (σ_a) изменяется от 160 до 130–120 МПа, т. е. с ростом асимметрии цикла снижение предела выносливости составляет от 23 до 33% соответственно. Следовательно, критерий живучести, определяемый параметром K_σ , в 2–6 раз, а параметром q_σ – почти в 5 раз, выше, чем при испытании у штамповок. С учетом того, что лопатки вентиляторов испытывают в процессе эксплуатации колебания частотой в основном ~100 Гц, рассчитана долговечность изделия в данных условиях: например, за 1 ч работы при резонансном режиме N составит менее $5 \cdot 10^5$ циклов, что позволяет сократить количество межполетных осмотров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солонина О.П., Глазунов С.Г. Жаропрочные титановые сплавы.– М.: Металлургия, 1976, 448 с.
2. Балашов Б.Ф., Петухов А.Н., Володенко Б.В. Конструкционная прочность титановых сплавов.– М.: ЦИАМ, 1972, труды №545, 24 с.
3. Балашов Б.Ф., Петухов А.Н., Володенко Б.В. Исследование усталостной прочности некоторых титановых сплавов //Технология легких сплавов, 1974, №10, с. 39–43.
4. Балашов Б.Ф., Петухов А.Н., Цейтлин В.И., Архипов А.Н. Влияние поверхностного упрочнения на усталостную прочность титанового сплава BT9 при различных температурах. Технический бюллетень «Новые технологические процессы и надежность ГТД».– М.: ЦИАМ, 1976, №3(7), с. 3–10.
5. Сизова Р.Н., Петухов А.Н., Орлов А.Ф., Вильтер Н.П. Особенности прогнозирования долговечности деталей ГТД из титановых сплавов при циклическом нагружении //В сб.: Методы прогнозирования прочности материалов и конструкций элементов машин большого ресурса.– Киев: Наукова думка, 1977, с. 143–152.
6. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей /Под ред. Б.Ф. Балашова и И.А. Биргера.– М.: Машиностроение, 1981, 222 с.
7. Балашов Б.Ф., Петухов А.Н., Архипов А.Н. Исследование сопротивления усталости деталей из титановых сплавов в связи с применением нового способа упрочнения //В сб.: Новые технологические процессы и надежность ГТД.– М.: ЦИАМ, 1986, №3(59), с. 73–85.

8. Петухов А.Н. Конструктивный облик лопатки вентилятора повышенной эксплуатационной живучести для современного конкурентоспособного ТРДД //Вопросы авиационной науки и техники. Сер.: Авиационное двигателестроение.– М.: ЦИАМ, 2006, Вып. 3 (1327), с. 6–16.
9. Петухов А.Н., Вахромеев А.М. Исследование выносливости титанового сплава BT3-1 при двухосном напряженном состоянии //В сб.: Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии.– Киев: Наукова думка, 1986, с. 61–64.
10. Быков Ю.Г., Петухов А.Н., Черкасова С.А. Циклическая трещиностойкость титановых сплавов BT3-1 и BT25 //ФХММ, 1990, №3, с. 49–53.
11. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД.– М.: Машиностроение, 1993, 240 с.
12. Петухов А.Н. Некоторые проблемы конструкционной прочности, связанные с применением титановых сплавов в ГТД //Титан, 1998, №1 (10), с. 46–49.

А.А. Иноземцев, И.Г. Башкатов*, А.С. Коряковцев**

ПРИМЕНЕНИЕ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА В ИЗДЕЛИЯХ РАЗРАБОТКИ ОАО «АВИАДВИГАТЕЛЬ»

Известные преимущества титановых сплавов перед сталью, в частности по весовым и коррозионностойким характеристикам, привели к их широкому использованию в авиационном двигателестроении. На предприятии ОАО «Авиадвигатель» применение титановых сплавов в конструкции проектируемых двигателей началось в 1964 г. с турбореактивного двухконтурного двигателя Д-30, вот уже более 35 лет находящегося в серийном производстве и эксплуатации.

Возможность снижения массы в 1,7 раза при замене стальных деталей на титановые, с сохранением показателей прочности и долговечности, а также изготовление деталей из прутков, сварных листовых заготовок, штамповок и отливок позволили деталям из титановых сплавов прочно утвердиться в составе узлов так называемой холодной части газотурбинного двигателя.

Во всех следующих за Д-30 двигателях, разработанных в ОАО «Авиадвигатель» (Д-30 второй серии, Д-30 третьей серии, Д-30КУ, Д-30КП, Д-30Ф6 и ПС-90А), титановые сплавы находили все более широкое применение. Так, если на двигателе Д-30Ф6 титановые детали составляли 26,9% от общего количества деталей, то на ПС-90А объем применения титана 40,4% (см. рисунок). Наглядно объем использования титановых сплавов в конструкции двигателя ПС-90А показан в таблице, – видно, что из этих сплавов изготовлены детали самых разных узлов двигателя, но основная доля приходится на компрессоры низкого и высокого давления. При этом используют как деформируемые сплавы средней прочности, высокой прочности и жаропрочные, так и литейные. Благодаря более высокой удельной жаропрочности титановых сплавов по сравнению со сталями разработчикам удалось снизить массу компрессоров на 30–35%.