

ТРЕБОВАНИЯ К СВОЙСТВАМ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД И ЭУ

© 2011 А. Н. Петухов

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

На основе понятия о технологической наследственности и анализа сложной природы физико-химических процессов, протекающих в процессе формообразования детали из современных конструкционных материалов, формулируются требования к свойствам поверхностного слоя с учётом критериев, лимитирующих сопротивление многоциклового усталости (МнЦУ) и несущую способность основных деталей ГТД и ЭУ.

Сопротивление многоциклового усталости (МнЦУ), технологическая наследственность, свойства поверхностного слоя.

Анализ опыта создания отечественных и зарубежных ДЛА и ЭУ показывает, что на этапе освоения изделий (при стендовых испытаниях и опытной эксплуатации) прочностные дефекты и разрушения могут достигать 60% от общего числа выявляемых недостатков, из них около 70% приходится на долю разрушений от МнЦУ [1,2]. Тем не менее наибольшее внимание ресурса на этапе проектирования уделяется проблемам прогнозирования статической прочности и МЦУ. Это объясняется тем, что разрушения основных деталей ротора, например от МЦУ (дисков компрессоров и турбин, лопаток вентиляторов, валов и т. п.), часто не локализируются и последствия их разрушений весьма тяжёлые. При этом силовые, циклические, температурные и технологические факторы, определяющие долговечность деталей при МЦУ, с высокой достоверностью могут быть получены ещё на этапе проектирования. Кроме того, в процессе доводки они уточняются по результатам стендовых, лабораторных и эксплуатационных испытаний двигателя в целом или его узлов. Разрушения, связанные с длительной прочностью и МЦУ, скорее являются следствием существенных отклонений расчётных условий от реализуемых в эксплуатации, либо грубых отступлений в процессе изготовления деталей и узлов. Разработка технологического процесса требует не только гарантированного обеспечения заданных чертежом геометрических параметров, но и специальных свойств материала деталей, без которых невозможно обеспечить им необходимые прочностные эксплуатационные свойства и ресурс.

Под долговечностью понимается способность объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Большое значение при прогнозировании долговечности имеет точность определения температурного поля на стационарных и переходных режимах работы, а для МЦУ необходим расчёт напряжённо - деформированного состояния (НДС) в зонах концентрации напряжений (отверстиях, галтелях, фланцах, пазах и т.п.). Для этого, кроме применения численных методов, может потребоваться решение пространственных задач теории упругости с учётом пластичности.

Преобладание разрушений деталей от МнЦУ на всех этапах «жизненного цикла» ДЛА связано как с многообразием факторов, влияющих на сопротивление усталости (технологических, конструктивных, эксплуатационных, физической природы материала и др.), так и сложностью прогнозирования опасных амплитуд переменных во времени напряжений даже резонансных колебаний, вызываемых неравномерностью воздушного или газового потоков, автоколебаний, срывных или совместных колебаний лопаток и диска, диска и вала, флаттера и т. п.

Проблема предупреждения усталостных разрушений деталей ДЛА очень сложна. Она может быть решена несколькими методами [1,2] на разных этапах жизненного цикла ГТД:

- *при проектировании* - обеспечением максимального сопротивления МЦУ и МнЦУ детали за счёт минимизации роли концентраторов напряжений и регламентации свойств поверхностного слоя;

- при изготовлении - выполнением ТУ чертежа, минимизацией или нейтрализацией последствий отрицательной технологической наследственности при выполнении операций повышенного риска;

- в эксплуатации - за счёт снижения амплитуды эксплуатационных напряжений, регистрации забросов температуры, фактического числа циклов, а также внедрения мероприятий (конструктивных и технологических), снижающих влияние эксплуатационных повреждений;

- при ремонте (на крыле и в заводских условиях) - тщательностью выполнения дефектации и строгим соблюдением технологии ремонта, применением объективных диагностических средств, накоплением, анализом и обобщением банка данных по выявленным и устранённым дефектам.

На основе понятия о технологической наследственности, анализа сложной природы физико-химических процессов, протекающих в процессе формообразования детали из современных конструкционных материалов, и с учётом критериев, лимитирующих несущую способность основных деталей ГТД, необходимы требования:

- к технологическим процессам изготовления основных деталей ГТД и ЭУ в зависимости от видов напряженного состояния деталей и особенностей эксплуатации;

- к параметрам свойств поверхностного слоя, ответственных за формирование прочностных характеристик, включая статическую, циклическую долговечность МЦУ и сопротивление МнЦУ;

- к методам и области эффективного применения поверхностного упрочнения.

Технологическая наследственность

Под технологической наследственностью понимается влияние производственных процессов и отдельных операций на несущую способность детали. Как уже отмечено, наиболее распространённым разрушением деталей ГТД является МнЦУ [1;2], которая, в первую очередь, определяется свойствами поверхностного слоя.

Абсолютное большинство методов обработки деталей сопровождается локальным силовым воздействием на деталь. К ним относятся не только черновая обработка, где

наиболее резко выражено деформационно-силовое воздействие, но и чистовая, размерно-чистовая, а тем более упрочняющая обработка поверхностей деталей – поверхностная пластическая деформация (ППД). При этом разновидности ППД и арсенал физико-химических воздействий на поверхность и поверхностные слои при обработке постоянно увеличиваются, возрастает также роль комбинированных технологических воздействий на финишных операциях. ППД нередко считается гарантией обеспечения заданного ресурса и надёжности основных деталей ГТД.

Как правило, основной формообразующей операцией для большинства деталей является механическая обработка резанием (черновая, получистовая и чистовая), которая обычно завершается отделочными операциями шлифованием и полировкой, в основе которых лежит разновидность процесса резания с помощью абразивного инструмента.

Элементарный акт резания включает поверхностное пластическое воздействие, представляющее собой результат локального действия нормальных и касательных сил за пределами упругости в условиях статического или динамического характера нагружения. Это связано с тем, что в процессе формообразования детали её поверхностный слой при взаимодействии с режущим и отделочным инструментами в условиях «жесткого» и «мягкого» нагружения при высоком градиенте температуры в зоне резания многократно воспринимает интенсивные по степени и глубине циклические деформации.

Важно отметить, что при изготовлении ответственных деталей ГТД (дисков, валов и др.) операции резания оказываются *окончательными*. Это относится к операции протягивания пазов и шлицев в дисках или валах, сверлению отверстий, обработке лабиринтов (уплотнений) в дисках. Такие операции трудно контролируются по параметрам поверхностного слоя и относятся к операциям повышенного риска.

В качестве альтернативы механическим методам обработки следует осваивать и внедрять современные методы электроэрозионной и электрохимической обработок, позво-

ляющих получать поверхностные слои практически без пластической деформации.

Вследствие этого свойства поверхностного слоя существенно отличаются от свойств сердцевины детали по физическим параметрам, структурному и химическому составу и по механическим свойствам [1-5]. Поэтому понятие технологической наследственности обычно характеризуется параметрами, характеризующими состояние и свойства поверхностного слоя.

В целом технологическую наследственность принято определять физическими, химическими, структурными, деформационными и геометрическими параметрами, сформировавшимися в поверхностном слое и в объёме детали после основных технологических процессов или после специальных окончательных операций.

Физические параметры [2] определяются размерами зёрен, фаз, блоков D , плотностью дислокаций ρ , концентрацией вакансий c , параметрами кристаллической решётки a , активационным объёмом γ накопленной энергии кристаллической решётки материала W , углом разориентировки блоков $a_{\text{бл}}$.

Химические параметры характеризуются составом фаз (объёмной долей, размером и формой, распределением по объёму и т. д.), концентрацией химических элементов в объёме сплава, концентрацией элементов в фазе, микрообъёме и т. д.

Деформационные параметры характеризуют: пластическую деформацию ϵ , её глубину h и степень наклёпа N_n ; остаточные напряжения $\sigma_{\text{ост}}$ (макронапряжения, напряжения первого рода и микронапряжения второго и третьего рода).

Геометрические параметры характеризуются шероховатостью поверхности (R_a , R_z , R_{ax} , S_m , S , R_{ck} , d_n), которая определяется совокупностью микронеровностей, образующих профиль поверхности, а по существу - играющих роль концентраторов напряжений; волнистостью, направлением неровностей и т. п.

Технологическая наследственность проявляется:

- в структурном состоянии материала, формирующемся при термопластической обработке (особенно у титановых сплавов) или

при термической обработке у сталей и никелевых сплавов;

- размере зёрен, текстуре материала, формирующихся при горячем (холодном) деформировании, а при литье дополнительно в направлении кристаллической ориентации;

- образовании технологических остаточных напряжений в штамповках, прокате, литье, при механической обработке, сборке, при нанесении покрытий, химическом травлении и т. д.

В результате взаимодействия перечисленных факторов формируются основные характеристики прочности и эксплуатационные свойства конструкционного материала (хотя влияние отдельных операций неравнозначно), определяющие несущую способность деталей.

Отсюда вытекает представление об операциях «повышенного риска», которые присутствуют на различных этапах технологического цикла производства деталей. При этом важно знать основные признаки «опасной» технологической наследственности, которые должны контролироваться в процессе производства:

- структурная и фазовая однородность;
- размер зёрен или кристаллической ориентации;
- соответствие техническим условиям (ТУ) характеристик σ_B ; σ_T ; $\sigma_{\text{дл}}$; σ_L ; σ_N ; HB ; δ ; ψ и т.д.;
- изменение химического состава (локальное или в объёме);
- шероховатость поверхности;
- степень и глубина наклёпа;
- величина и знак остаточных напряжений, глубина их залегания и т. д.

Следствием отклонений от заданных параметров является уменьшение долговечности деталей [1-5,], проявляющееся в виде:

- разрушения (растрескивания) поверхностного слоя с последующей МнЦУ;
- снижения статической прочности (длительной, циклической долговечности – малоцикловая усталость – МЦУ, или термопрочности);
- снижения коррозионной стойкости материала и т. п.

Тщательные комплексные исследования процесса резания показывают, что он

представляет собой как сложный деформационный, так и физико-химический процесс, протекающий в зоне образования стружки и на поверхностях взаимодействия инструмента с деталью, включая окружающую среду.

Процесс резания как взаимодействие инструмента с деталью с деформационной точки зрения (рис. 1) состоит из отдельных циклов нагружения материала в локальной зоне. Его можно представить следующим образом. В первом полуцикле 1 при взаимодействии передней кромки резца с металлом реализуется «жёсткое» сжатие металла ($\epsilon_{сж} = \text{const}$ при $\sigma_{сж \max} > \sigma_{пл}$, где $\epsilon_{сж}$ - деформации сжатия, $\epsilon_{пл}$ - пластические деформации), а в следующем полуцикле 2, когда задняя кромка резца взаимодействует с металлом - разгрузка и «мягкий» полуцикл 3 растяжения за счёт сил трения ($\sigma_p = \text{const}$, $\sigma_p < \sigma_{пл}$ при наличии смазки).

Следует отметить, что основное деформационное повреждение поверхностный слой получает в первом полуцикле нагружения, а глубина пластически деформированного слоя, где формируются растягивающие остаточные напряжения, может превышать 100-150 мкм, последствия которых не могут быть полностью устранены последующими отделочными обработками.

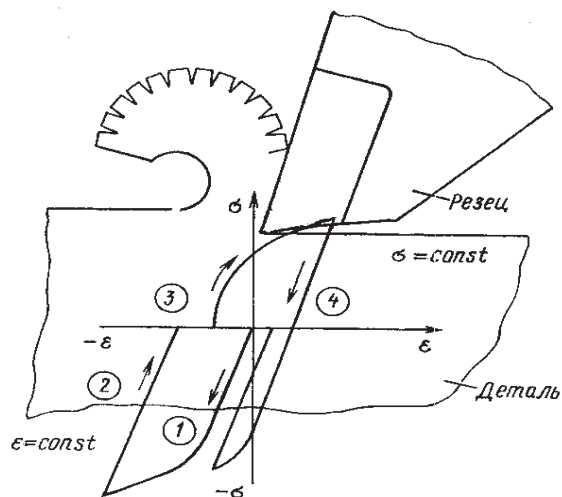


Рис.1. Схема деформирования материала в зоне передней режущей кромки резца при обработке детали:

1 - полуцикл нагружения при постоянной деформации $\epsilon = \text{const}$; 2; 3 и 4 - полуциклы нагружения при постоянном напряжении $\sigma = \text{const}$

Вследствие интенсивности силового и термического (термопластического) воздействия в поверхностном слое механические характеристики материала изменяются как локально, так и по глубине слоя: уменьшается его пластичность, повышается твёрдость и т.д. Кроме того, при взаимодействии материала инструмента с деталью проявляются адгезионные и диффузионные процессы, приводящие к изменению химического и структурно-фазового состава поверхностного слоя, которые отрицательно влияют на его прочностные свойства.

Исследования состояния тонких слоёв обрабатываемого материала и режущего инструмента [2] методами металлографии, металлофизики, на растровом электронном микроскопе и микроспектральным анализом химического состава и позволили выявить ряд дополнительных особенностей процесса резания. Показано, что с ростом скорости резания увеличивается средняя температура резания $\theta_{ср}$. В частности, при лезвийной обработке никелевого сплава ХН51ВМТЮКФР инструментом с режущей пластинкой из твёрдого сплава ВК6М при скоростях резания от $V=10$ м/мин до $V=45$ м/мин и глубине резания около $t = 1,0$ мм и подаче $s = 0,1$ мм/об значение температуры $\theta_{ср}$ повысилось с 560°C до 950°C . На задней поверхности резца при низкой скорости резания наблюдался полный пластический контакт по площадке износа, а минимальная толщина обрабатываемого материала, удерживаемого силами адгезии, составила 2 мкм.

Рост скорости резания до 30 м/мин при $\theta_{ср} = 830^\circ\text{C}$ сопровождается снижением интенсивности адгезионных явлений. При высоких скоростях (45 м/мин) значение $\theta_{ср}$ может достигать 950°C , а пластический контакт до 30% площадки.

Установлено, что независимо от схемы нагружения и скорости резания в определённом диапазоне $\theta_{ср}$ наблюдается зона снижения пластичности сплава. Эта зона для сплава ХН51ВМТЮКФР, где меняется механизм разрушения сплава, проявляется в интервале $\theta_{ср} = 800 \dots 850^\circ\text{C}$. При $\theta_{ср} = 500 \dots 600^\circ\text{C}$, когда материал обладает высокими характеристиками пластичности, деформация протекает внутри зерна, составляя 68,5% общей деформации по сравнению с 8,5 % доли в деформации границ зёрен (табл. 1).

Таблица 1. Влияние θ_{cp} на соотношение механизмов деформации в деформированном жаропрочном никелевом сплаве ХН51ВТЮКФР [2]

θ_{cp} , °С	Внутри- зёрненное скольже- ние	Межзё- ренное сколь- жение	Вклад тела зерна в общую дефор- мацию	Вклад границ зерна в общую дефор- мацию
650	3,7	0,46	68,5	8,5
850	0,85	5,3	12,5	78
950	8,2	4,7	40	57

При относительно низких температурах деформации в процессе обработки резанием этого сплава, упрочнённого γ -фазами твёрдого раствора и γ -фазой, интерметаллидные фазы не являются барьерами, блокирующими движение дислокаций, и интенсивно деформируются совместно с матрицей сплава.

При температурах θ_{cp} , когда материал имеет минимальные пластические свойства, основной вклад в общую деформацию вносит механизм межзёрненного скольжения. Границы зёрен оказываются менее прочными, чем матрица, которая вместе с упрочняющими интерметаллидными фазами более эффективно сопротивляется пластическому деформированию. Об этом свидетельствует невысокое искажение вида γ' -фазы.

При повышении скорости резания до $V=20$ м/мин, когда в зоне резания температура достигает $\theta_{cp}=750^\circ\text{C}$, возникают благоприятные условия в зоне контакта: высокая степень пластической деформации, вызванная высоким уровнем контактных напряжений (условия «жёсткого» нагружения при сжатии), способствующих росту диффузионной подвижности атомов при наличии атомарного контакта ювенально чистых поверхностей, наблюдается взаимное проникновение легирующих элементов инструмента и материала детали на глубину до 10 мкм.

Активное влияние при этом имеют также градиенты химических потенциалов элементов, температуры, электрического потенциала, давления и др. Дальнейшее повышение скорости резания сопровождается ростом температуры и интенсификацией диффузионных процессов, дополнительной активизацией новых химических элементов.

Глубина взаимного проникновения элементов при скорости 45 м/мин достигла 10 мкм, а диффузионные процессы сопровождались образованием новых фаз.

Подобные процессы имеют место и при обработке других конструкционных материалов. Так, при обработке титанового сплава ВТ9, наряду с диффузионными процессами наблюдались химические реакции с образованием интерметаллидов типа Ti_2Co , $TiCo$, $TiCo_2$, Co_2Al_9 , $Co_{14}Al_{13}$.

Таким образом, приведенные данные показывают, что при механической обработке резанием в поверхностном слое деталей (особенно из жаропрочных титановых и никелевых сплавов, теплопрочных коррозионно-стойких сталей) термопластические деформации сопровождаются сложными механохимическими, физико-химическими процессами и полиморфными превращениями, которые в итоге оказывают влияние на несущую способность.

Деформационный фактор, характеризуемый степенью и глубиной наклёпанного слоя, вносит значительный вклад в формирование поверхностного слоя, который в зависимости от исходных свойств материала и режимов обработки может достигать десятки и сотни мкм. Отмечено, что по мере повышения жаропрочности сплавов снижаются пластичность и коэффициент упрочнения, а также прочностные параметры поверхностного слоя. У жаропрочных никелевых сплавов при высоких скоростях резания из-за большего процента содержания упрочняющей γ' -фазы, ответственной за повышение температуры разупрочнения, отсутствуют конкурирующие процессы разупрочнения. При механической обработке резанием, как следствие силового и термического воздействия на металл в зоне резания [2;4], пластическая деформация неоднородна по поверхности и затухает по глубине слоя.

Кроме того, наблюдаются:

- изменение размеров блоков $\langle a \rangle$;
- повышение плотности дислокаций ρ ;
- увеличение накопленной энергии кристалла $\langle |W| \rangle$;
- снижение пластичности δ ;
- повышение микротвёрдости H_μ ;
- изменение $\sigma_{дл}$, σ_{-1} и т.д.

Таблица 2. Характеристики параметров поверхностного слоя сплава ВТЗ-1 и стали 15Х16К5Н2 после протягивания и влияние их на пределы выносливости после протягивания [2]

Материал	V , мм/мин	Подъём на зуб Z , мм/зуб	R_a , мкм	$\langle a \rangle$, Å	$\langle W \rangle$	σ_{-1} , МПа $N=10^7$ ц, $T_{исп}=20^\circ\text{C}$
ВТЗ-1	23,7	0,05	0,36	765	1,47	330
	27,3	0,11	0,36	780	1,48	290
Сталь	9,6	0,02	0,80	624	1,20	210
	17,4	0,05	0,72	550	1,20	250
	17,4	0,11	0,65	520	1,37	230

В качестве примера в табл. 2 приведены некоторые характеристики параметров поверхностного слоя после протягивания сплава ВТЗ-1 и стали 15Х16К5Н2 и влияние их на пределы выносливости после протягивания. Можно отметить, что изменение режимов протягивания по-разному влияет на характеристики поверхностного слоя и предел выносливости.

Существенно влияние на сопротивление усталости высокопрочных конструкционных материалов при умеренных и нормальных температурах шероховатости поверхности (табл. 3), особенно при кручении.

Таблица 3. Влияние на предел выносливости σ_{-1} и τ_{-1} различных видов механической обработки.

Сталь 13Х11Н2В2МФ, $T_{исп} = 20^\circ\text{C}$ [2]

Вид образца	Вид механической обработки	K_σ	K_τ	σ_{-1} , τ_{-1} МПа	
				σ_{-1}	τ_{-1}
Круглые стандартные изгибы с вращением или кручением)	Точение + шлифование + полировка, $R_a = 0,63$ мкм	1,0	1,0	520	380
	Точение $R_a = 5$ мкм, $R_z = 40$ мкм	1,93	2,1	270	180
	Точение + шлифование $R_a = 1,25$ мкм, $R_z = 40$ мкм	1,73	1,8	300	210
Образцы, вырезанные из вала с сохранением поверхности и концентратора напряжений (симметрич. пл. изгиб или симметричное кручение)	Точение + шлифование + полировка, $R_a = 0,63$ мкм	1,53	1,5	340	255
	Точение + шлифование + полировка + ППД микрошариками, $R_a = 0,63$ мкм	1,16	1,19	450	320

Кроме того, при одних и тех же параметрах обработки поверхности у образцов, вырезанных из детали, значения пределов выносливости (σ_{-1} и τ_{-1}) ниже, чем для стандартных образцов.

Поверхностный слой детали, являясь носителем технологической наследственности, характеризуется рассмотренными выше параметрами, а их влияние на несущую способность взаимосвязано. Поэтому задача технолога состоит в том, чтобы уменьшить отрицательные последствия такого воздействия на материал детали, т.е. нейтрализовать влияние отрицательной технологической наследственности на эксплуатационные характеристики материала.

Показано, что сжимающие остаточные напряжения всегда способствуют повышению предела выносливости, но положительное их влияние значительно меньше, чем отрицательное влияние растягивающих остаточных напряжений (рис. 2).

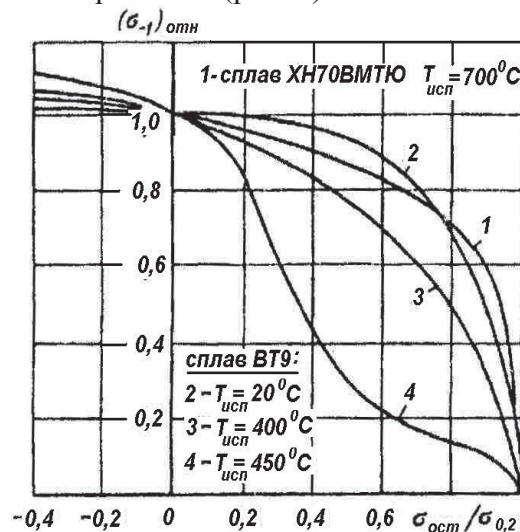


Рис. 2. Зависимость относительной величины предела выносливости от отношения величины остаточных напряжений к условному пределу текучести $\sigma_{отн} = \sigma_{ост} / \sigma_{0,2}$

Связь между относительной величиной предела выносливости и относительной величиной остаточных напряжений можно представить в виде функции [2]

$$(\sigma_{-1})_{отн}^n + (\sigma_{ост})_{отн}^n = 1,$$

где σ_a - относительная величина предела выносливости $(\sigma_{-1})_{отн}$;

$(\sigma_{ост})_{отн}$ - относительная величина остаточных напряжений.

Интенсивность процессов разупрочнения и перераспределения остаточных напряжений зависит от температуры, уровня действующих напряжений и от исходного состояния поверхностного слоя. С повышением температуры эксплуатации роль остаточных напряжений уменьшается вследствие их релаксации, а роль шероховатости поверхности увеличивается.

При рабочих температурах T_3 , составляющих $T_3 < 0,7T_{ст}$, т. е. температуры старения, влиянием пластического деформирования на длительную прочность можно пренебречь. Однако при температурах $T_3 > 0,7 T_{ст}$ в сплавах наблюдаются процессы возврата и рекристаллизации, сопровождающиеся интенсивным окислением поверхности, вызванным повышением диффузионной активности атомов легирующих элементов. В результате ослабляются границы зерен, по которым развиваются микротрещины, переходящие в очаги усталостных разрушений.

Особые требования к технологии изготовления деталей из титановых сплавов

Опыт применения титановых сплавов показывает, что конструкционная прочность деталей из титановых сплавов определяется рядом технологических факторов:

- термические и деформационные режимы термопластической обработки, формирующие макро- и микроструктуру сплава, а также основные характеристики прочности и пластичности материала заготовок или полуфабрикатов;
- наличие металлургических дефектов и вредных газовых примесей;
- механическая обработка, формирующая свойства поверхностного слоя детали и влияющая на прочность при статическом, циклическом и вибрационном нагружении;
- электронно-лучевая сварка при изготовлении, например, роторов с последующей их термообработкой и др.

Титановые сплавы чувствительны к особенностям конструктивных решений при проектировании деталей из них, а также к условиям эксплуатации деталей. Кроме того, для них большую роль играет тщательность соблюдения режимов на предварительных операциях, а не только на заключительных при отделочных обработках. На это указыва-

ет и хорошая корреляционная связь [2,5] между величиной предела выносливости σ_{-1} и показателем m кривой усталости: чем выше значение m , тем совершеннее технологический процесс и выше предел выносливости.

Разработчики ДЛА предъявляют ряд требований:

- к стабилизации прочностных свойств полуфабрикатов из титановых сплавов [2];
- к обеспечению специальных свойств сплавов [1,2];
- к введению нормированных значений для характеристик трещиностойкости сплавов или критериев, выявляющих связь между характеристиками пластичности и трещиностойкости [5].

В отличие от сталей, структура и свойства которых формируются при термообработке (закалка с последующим отпуском), изменить структурное состояние титановых сплавов можно только совмещением термической обработки с объемной деформацией (ТМО) в узком температурном интервале, определяемом температурой полиморфного (фазового) превращения $T_{пп}$, которая индивидуальна для каждой заготовки и зависит от содержания в ней кислорода.

Именно проявлением такой локальной ТМО может быть объяснено резкое снижение предела выносливости титановых сплавов при нарушении режимов обработки на предварительных операциях [1,2] и при скоростном протягивании пазов или шлиц в дисках компрессоров, а также большой разброс результатов при испытаниях на МнЦУ.

Учет $T_{пп}$ особенно важен при ВТМО и при ТМО. Например, $T_{пп}$ для сплава ВТЗ-1 при номинальном режиме нагрева под штамповку при 930°C фактически может изменяться от плавки к плавке в пределах 930...1020°C. Потому незнание $T_{пп}$ для конкретной заготовки приведёт к большой неоднородности свойств в штамповке: диапазон значений предела прочности составит $\sigma_B = 1200...1500$ МПа.

Пластичность вместо $\delta > 10$ % по ТУ может быть $\delta < 6$ %, т.е. повысится склонность сплава к хрупкому разрушению. В структуре сплава может наблюдаться мелкодисперсная α -фаза, обусловленная деформационным наклёпом.

Кроме МнЦУ, параметрами, реагирующими на отклонение характеристик прочности, являются $K_{ст}$ и малоцикловая усталость σ_N , определяемая по результатам испытаний образцов с концентраторами ($\alpha_\sigma = 3,5 \dots 4$) напряжений.

Применение лопаток с заданной КГО позволяет повысить эксплуатационную температуру и ресурс лопаток ГТД, однако при умеренных температурах в профильной и замковой части лопаток возможны смешанные разрушения.

В начальной стадии они подобны разрушениям поликристаллических лопаток, но достигнув плоскости скольжения, трещина может изменить скорость и направления развития, быстро распространяясь по нескольким плоскостям скольжения, что является следствием проявления высокой анизотропии свойств сплава в зонах детали, где образуются очаги разрушений: на внутренней поверхности лопаток, имеющей большой градиент температуры (в перфорационных отверстиях), от дефектов литья, скопления карбидов и т. п.

Проявляется провоцирующая роль фреттинга, который обычно для лопаток турбин с равноосной структурой, по сравнению с деталями компрессора, был и сейчас находится вне поля зрения разработчиков.

Требования к конструкции лопатки НК:

- в профильной части, где необходимы максимальные свойства МОНО сплава, не допустимы резкие изменения формы, в том числе наличие бандажной полки;
- конструкция лопатки в профильной части после литья не должна подвергаться механической доработке, особенно в зонах, где рабочие температуры превышают 800°C ;
- традиционные щели на выходной кромке для выпуска охлаждающего воздуха следует заменять отверстиями;
- без специальной проработки конструкции, включая экспериментальные и расчётные исследования, замена материала лопатки из равноосного сплава на МОНО не допустима.

Требования к отливкам лопаток. При литье лопаток с заданной кристаллографической ориентацией необходимо:

- регламентировать отклонение величины угла γ КГО [001] от продольной оси OZ ло-

патки, которая должна находиться в пределах $\gamma \leq 10^\circ$, что гарантирует минимальные разбросы действующих на лопатку напряжений;

- применять специальные заправки (кристаллы с заданной КГО), что позволяет стабилизировать значения угла γ и снизить разброс собственных частот колебаний лопаток;
- проектировать отливки лопаток так, чтобы в критических зонах профильной части не требовалась обрезка литниковой системы и последующая механическая обработка;
- избегать в отливках технологических приливов, а при их наличии они должны удаляться бездеформационным методом – электрохимическим;
- не допускать обработку ГИП лопаток и отливки с пластически деформированным или рекристаллизованным слоем в профильной части.

Требования к обработке поверхности лопаток НК. Обычная механическая обработка профильной части лопаток сопровождается пластической деформацией, поэтому на профильной части лопатки с моноструктурой нельзя допускать пластическую деформацию, которая при эксплуатационной температуре будет вызывать рекристаллизацию, т.е. деградацию свойств материала по параметрам жаропрочности и длительной прочности.

Лопатка в зонах с рабочей температурой $\leq 800^\circ\text{C}$ (удлинительной ножки и хвостовика) должна иметь защитный (модифицированный) слой с равноосной структурой, препятствующий разрушениям сколом и фреттинг-усталости.

Подготовка поверхности профильной части лопатки к нанесению жаростойкого или теплозащитного покрытия не должна приводить к образованию рекристаллизованного слоя [5].

Библиографический список

1. Кузнецов, Н.Д. Технологические методы повышения надежности и ресурса деталей машин [Текст]: справочник / Н.Д. Кузнецов, В.И. Цейтлин, В.И. Волков.- М.: Машиностроение, 1993.- 304 с.

2. Петухов, А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД [Текст] / А.Н. Петухов - М.: Машиностроение, 1993. - 240 с.

3. Петухов, А.Н. Многоцикловая усталость материалов и деталей газотурбинных двигателей [Текст] / А.Н. Петухов // Проблемы прочности. – 2005. - №3 (375). - С.5-21.

4. Петухов, А.Н. Многоцикловая усталость материалов и деталей ГТД [Текст]:

международ. конф. 17-20 июня 2008. Т.1 / А.Н. Петухов – СПб.: Политехнический институт. - С. 282-285.

5. Петухов, А.Н. Проблемы многоцикловой усталости материалов для современных ГТД и ЭУ [Текст] / А.Н. Петухов // Деформация и разрушение. – 2009. - № 10. - С.30-35.

REQUIREMENTS TO QUALITY SUPERFICIAL LAUER OF DETAILS GTE

© 2011 A. N. Petukhov

Central Institute of aviation Motors, Moscow, Russia

Modern requirements to used in GTE to constructional materials and feature of realization in details GTE of the service properties incorporated in constructional materials are considered. It is shown that prevalence of destructions of details for high-cycle fatigue (FCH). It is connected with variety of factors (constructive, technological , exploitation etc.). Influencing resistance of fatigue strength and complexity of forecasting of dangerous amplitudes of variable pressure.

High-cyclic fatigue (FHC), technological herediry, properties of a surface.

Информация об авторах

Петухов Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор МАИ и МАТИ, начальник сектора «Многоцикловая усталость материалов и деталей ГТД» Центрального института авиационных моторов им. П.И. Баранова, г. Москва. Тел.: (495) 362-40-09. E-mail: pan_ustalost@ciam.ru. Научные интересы: многоцикловая и малоцикловая усталость конструкционных материалов и деталей ГТД в широком диапазоне температур с учётом технологических и эксплуатационных факторов (фреттинг, фреттинг-усталость и др.).

Petukhov Anatoly Nikolatvich, professor, chief department “High-cycle fatigue materifls and component GTE” of Central Institute of aviation Motors, Moscow. E-mail: pan_ustalost@ciam.ru. Area of research: Account problems at stages of a choice of constructional materials of features of manufacturing techniques of details and the operational factors influencing HFC are considered, fretting-fatugue.