

**А.Н. Петухов**

## **ТРЕБОВАНИЯ К СВОЙСТВАМ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД И ЭУ**

Рассмотрены современные требования к используемым в ГТД строительных материалов и реализация в деталях ГТД из свойств услуги включены в строительные материалы. Показано, что пространственность разрушения деталей в области многоциклового усталости (ЗСО) на всех этапах “жизненного цикла” ГТД. Это связано с различными факторами (конструктивные, технологические, эксплуатационные и т. д.). Влияющих на сопротивление усталости и сложности прогнозирования опасных амплитуд переменных напряжений.

Ключевые слова: высокий-циклового усталости (ФУО), наследственность, свойства поверхности.

**А**нализ 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 проблеме 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.), практически не локализируются, т.е. последствия их разрушений могут быть весьма тяжелыми. Вместе с тем силовые, циклические, температурные и технологические факторы, определяющие долговечность деталей при МЦУ, с высокой достоверностью могут быть определены еще 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 расчетных условий от реализуемых в эксплуатации, либо грубых отступлений в технологическом процессе изготовления деталей и узлов. Разработка технологического процесса требует не только гарантированного обеспече-

ния 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 на переходных режимах работы, а для МЦУ необходим расчет напряженно-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 учетом 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, а тем более, автоколебаний, срывных или совместных колебаний лопаток и диска, диска и вала, флаттера и т.п.

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

- при проектировании – обеспечением максимального сопротивления МЦУ и МнЦУ детали за счет 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 счет снижения амплитуды эксплуатационных напряжений, регистрация 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 устраненным дефектам.

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

- технологическим процессам изготовления основных деталей ГТД и ЭУ в зависимости от видов напряженного состояния деталей и особенностей эксплуатации;
- параметрам свойств поверхностного слоя, ответственных за формирование прочностных характеристик, включая статическую, циклическую долговечность МЦУ и сопротивление МнЦУ;
- методам и области эффективного применения поверхностного упрочнения.

### **Понятие о технологической наследственности**

Под технологической наследственностью понимается влияние производственных процессов и отдельных операций на несущую способность детали. Как уже отмечено, наиболее распространенным разрушением деталей ГТД является МнЦУ [1, 2, 3], 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 процессов ППД и арсенал физико-химических воздействий на поверхность, и поверхностные слои при обработке и эксплуатации постоянно увеличиваются, а также возрастает роль комбинированных технологических воздействий на финишных операциях. Процессы ППД нередко считаются гарантией обеспечения заданного ресурса и надежности 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 поли-

ровкой, в основе которых лежит разновидность процесса резания с помощью абразивного инструмента.

Элементарный акт резания включает поверхностное пластическое воздействие, представляющий 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, ее 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, обработка 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 электрохимических обработок, позволяющих получать поверхностные слои практически без пластической деформации.

Вследствие этого свойства поверхностного слоя существенно отличаются от свойств сердцевины детали по физическим параметрам, по структурному и химическому составу, и по механическим свойствам [1, 2, 3, 7]. Поэтому понятие технологической наследственности обычно определяется 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 объеме детали после основных технологических процессов или после специальных окончательных операций.

Физические параметры [3] определяются размерами зерен, фаз, блоков  $D$ , плотностью дислокаций  $\rho$ , концентрацией вакансий  $c$ , параметрами кристаллической решетки  $a$ , активационным объемом  $\gamma$ , накопленной энергии кристаллической решетки материала  $W$ , углом разориентировки блоков  $a_{\text{от}}$ .

Химические параметры характеризуются составом фаз (объемной долей, размером и формой, распределением по объему и т. д.), концентрацией химических элементов в объеме сплава, концентрацией элементов в фазе, микрообъеме и т. д.

Деформационные параметры характеризуют: пластическую деформацию  $\epsilon$ , ее глубину  $h$  и степень наклепа  $N_n$ ; 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, формирующимся при термопластической обработке (особенно у титановых сплавов) или при термической обработке у сталей и никелевых сплавов;
- размере зерен, 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, при 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 не равнозначно), определяющих 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 зерен или кристаллической ориентации;
- соответствие техническим условиям (ТУ) характеристик  $\sigma_B; \sigma_T; \sigma_{дл}; \sigma_{-1}; \sigma_N; HB; \delta; \psi$  и т. д.;
- изменение химического состава (локальное или в объеме);
- шероховатость поверхности;
- степень и глубина наклепа;
- величина и знак остаточных напряжений, глубина их залегания и т. д.

Следствием отклонений от заданных параметров являются уменьшение долговечности деталей [1–6], проявляющееся в виде:

- разрушения (растрескивания) поверхностного слоя;
- снижения статической прочности (длительной, циклической долговечности – МЦУ или термопрочности – МнЦУ);
- 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.

Рассматривая процесс резания как взаимодействие инструмента с деталью с деформационной точки зрения (рис. 1), то он состоит из отдельных циклов нагружения материала в локальной зоне. Его можно представить следующим образом. В первом полуцикле 1 при взаимодействии передней кромки реза с металлом реализуется «жесткое» 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 реза взаимодействует с металлом – разгрузка и «мягкий» полуцикл 3 растяжения за счет сил трения ( $\sigma_p = \text{const}$ ,  $\sigma_p < \sigma_{пл}$  при наличии смазки). Следует отметить, что основное

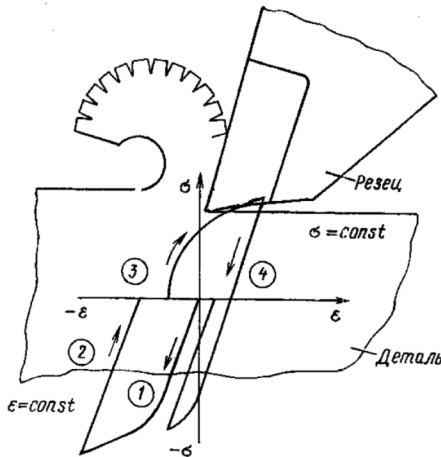


Рис. 1. Схема деформирования материала в зоне передней режущей кромки реза при обработке детали: 1 – полуцикл нагружения при постоянной деформации  $\epsilon = \text{const}$ ; 2, 3 и 4 – полуциклы нагружения при постоянном напряжении  $\sigma = \text{const}$

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.

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 твердость 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 слоев обрабатываемого материала и режущего инструмента [7] методами: металлографии, металлофизики, на растровом электронном микроскопе и микроспектральным анализом химического состава, позволили выявить ряд дополнительных особенностей процесса резания. Показано, что с ростом скорости резания увеличивается средняя температура резания  $\theta_{\text{ср}}$ . В частности, при лезвийной обработке никелевого сплава ХН51ВМТЮКФР инструментом с режущей пластинкой из твердого сплава ВК6М, при скоростях резания от  $V = 10$  м/мин до  $V = 45$  м/мин, глубине резания около  $t = 1,0$  мм, подаче  $s = 0,1$  мм/об, значение температуры  $\theta_{\text{ср}}$  повысилось с  $560$  °С до  $950$  °С. На задней поверхности резца при низкой скорости резания наблюдался полный пластический контакт по площадке износа, а минимальная толщина обрабатываемого материала, удерживаемого силами адгезии, достигала  $2$  мкм. Повышение скорости резания до  $30$  м/мин при  $\theta_{\text{ср}} = 830$  °С сопровождается снижением интенсивности адгезионных явлений. При высоких скоростях ( $45$  м/мин) значение  $\theta_{\text{ср}}$  может достигать  $950$  °С, а пластический контакт до  $30\%$  площадки.

Установлено, что независимо от схемы нагружения и скорости резания в определенном диапазоне  $\theta_{\text{ср}}$  наблюдается зона снижения пластичности сплава. Эта зона для сплава ХН51ВТЮКФР, где меняется механизм разрушения сплава, проявляется в интервале  $\theta_{\text{ср}} = 800 \dots 850$  °С. При  $\theta_{\text{ср}} = 500 \dots 600$  °С, когда материал обладает высокими характеристиками пластичности, деформация протекает внутри зерна, составляя  $68,5\%$  общей деформации по сравнению с  $8,5\%$  доли в деформацию границ зерен (табл. 1).

Таблица 1

*Влияние  $\theta_{cp}$  на соотношение механизмов деформации в деформированном жаропрочном никелевом сплаве ХН51ВТЮКФР [12]*

$\theta_{cp}, ^\circ\text{C}$	Внутри- зеренное скольжение	Межзеренное скольжение	Вклад тела зерна в общую деформацию	Вклад границ зерна в общую деформацию
	%			
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, упрочненного  $\gamma$ -фазами твердого раствора и  $\gamma$ -фазой, интерметаллидные фазы не являются барьерами, блокирующими движение дислокаций, и интенсивно деформируются совместно с матрицей сплава.

При температурах  $\theta_{cp}$ , когда материал имеет минимальные пластические свойства, основной вклад в общую деформацию вносит механизм межзеренного скольжения. Границы зерен оказываются менее прочными, чем матрица, которая вместе с упрочняющими интерметаллидными фазами, более эффективно сопротивляется пластическому деформированию. Об этом свидетельствует невысокое искажение вида  $\gamma'$ -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 «жесткого» нагружения при сжатии), способствует росту диффузионной подвижности атомов при наличии атомарного контакта ювенально чистых поверхностей, наблюдается взаимное проникновение легирующих элементов инструмента и материала детали на глубину до 6 мкм. Положительное влияние при этом играют 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 механо-химическими, физико-химическими процессами и полиморфными превращениями, которые, в итоге, оказывают влияние на несущую способность.

Деформационный фактор, характеризуемый степенью и глубиной наклепанного 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 снижается пластичность и коэффициент упрочнения, а также прочностные параметры поверхностного слоя. У жаропрочных никелевых сплавов при высоких скоростях резания из-за большего процента содержания упрочняющей  $\gamma'$ -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 [1; 6; 8], пластическая неоднородна по поверхности и затухает по глубине слоя. Кроме того, наблюдаются:

- изменение размеров блоков  $\langle a \rangle$ ;
- повышение плотности дислокаций  $\rho$ ;

Таблица 2

**Характеристики параметров поверхностного слоя сплава ВТЗ-1 и стали 15Х16К5Н2 после протягивания и влияние их на пределы выносливости после протягивания [3]**

Материал	$V$ , мм/мин	Подъем на зуб $Z$ , мм/зуб	$R_a$ , мкм	$\langle a \rangle$ , Å	$\langle  W  \rangle$	$\sigma_{-1}$ , МПа, $N = 10^7$ ц, $T_{исп} = 20^\circ C$
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

Таблица 3

*Влияние на предел выносливости  $\sigma_{-1}$  и  $\tau_{-1}$  различных видов механической обработки. Сталь 13X11H2B2MФ,  $T_{исп} = 20^\circ\text{C}$  [2, 10]*

Виды образцов и испытаний	Вид механической обработки	$K_\sigma$	$K_\tau$	$\sigma_{-1}$	$\tau_{-1}$
				МПа	
Круглые стандартные (симметричный изгиб 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 (симметричн. 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

- увеличение накопленной энергии кристалла  $\langle |W| \rangle$ ;
- снижение пластичности  $\delta$ ;
- повышение микротвердости  $H_\mu$ ;
- изменение  $\sigma_{дл}$ ,  $\sigma_{-1}$  и т.д.

В качестве примера в табл. 2 приведены некоторые характеристики параметров поверхностного слоя после протягивания сплава ВТЗ-1 и стали 15X16K5H2 и влияние их на пределы выносливости после протягивания. Можно отметить, что изменение режимов протягивания по-разному проявляются на характеристики поверхностного слоя и предела выносливости.

Существенно влияние на предел выносливости высокопрочных конструкционных материалов при умеренных и нормальных температурах оказывает шероховатость поверхности (табл. 3), особенно при кручении.

Кроме того, при одних и тех же параметрах обработки поверхности у образцов, вырезанных из детали, значения пределов выносливости ( $\sigma_{-1}$  и  $\tau_{-1}$ ) оказались ниже, чем для стандартных образцов. Это объясняется тем, что поверхностный слой детали, являясь носителем технологической наследственности,

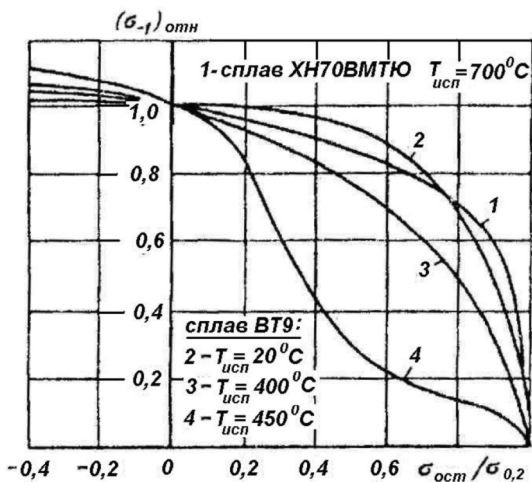


Рис. 2. Зависимость относительной величины предела выносливости от относительной величины остаточных напряжений  $\sigma_{ост} = \sigma_{ост} / \sigma_{0,2}$  и температуры испытаний

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. снизить влияние отрицательной технологической наследственности на эксплуатационные характеристики материала.

Показано, что сжимающие остаточные напряжения всегда способствуют повышению предела выносливости, хотя положительное их влияние значительно меньше, чем отрицательное влияние растягивающих остаточных напряжений (см. рис. 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  $\sigma_a$  — 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 на деталь напряжений и от исходного состояния поверхностного слоя. С повышением эксплуатационной температуры роль остаточных напряжений уменьшается вследствие их релаксации, а увеличивается роль шероховатости поверхности.

При рабочих температурах  $T_3$ , составляющих  $T_3 < 0,7 T_{ст}$  от 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, что ослабляет 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 конструкционную прочность деталей из титановых сплавов определяет ряд 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 в сплаве;
- 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 и детали из них чувствительны к особенностям конструктивных решений, а также к условиям эксплуатации. Кроме того, для них большую роль играет тщательность соблюдения режимов на каждом этапе изготовления, а не только на заключительных отделочных обработках. На это указывает и хорошая корреляционная связь [2, 7] между величиной предела выносливости  $\sigma_{-1}$  и показателем  $m$  кривой усталости: чем выше значение  $m$ , тем совершеннее технологический процесс и выше предел выносливости.

Разработчики ГТД и ГТУ предъявляют ряд требований к:

- стабилизации прочностных свойств полуфабрикатов из титановых сплавов [2];
- обеспечению специальных свойств сплавов [8];
- введению нормированных значений для характеристик трещиностойкости сплавов или критериев, выявляющих связь между характеристиками пластичности и трещиностойкости [10].

В отличие от сталей, структура и свойства которых формируется 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  $T_{\text{пн}}$ , 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 механической обработки на предварительных операциях [2]: при скоростном резании, протягивании пазов или шлиц в дисках компрессоров, а также большой разброс результатов при испытаниях деталей на МнЦУ.

Учет  $T_{\text{пн}}$  особенно важен при ВТМО и ТМО. Например,  $T_{\text{пн}}$  для сплава ВТЗ–1 при номинальном режиме нагрева под штамповку при 930 °С фактически может изменяться от плавки к плавке в пределах 930...1020 °С. Потому не учет  $T_{\text{пн}}$  для конкретной заготовки приведет к большой неоднородности свойств в штамповке: диапазон значений предела прочности может составить  $\sigma_B = 1200...1500$  МПа; пластичность вместо  $\delta > 10\%$  по ТУ может быть  $\delta < 6\%$ , что повышает склонность сплава к хрупкому разрушению. В структуре сплава может наблюдаться мелкодисперсная  $\alpha$ -фаза, обусловленная деформационным наклепом. Кроме МнЦУ и МЦУ параметрами, реагирующими на отклонение характеристик прочности, являются  $K_{\text{ст}}$  и малоцикловая усталость  $\sigma_N$ , определяемая по результатам испытаний образцов с концентраторами напряжений ( $\alpha_\sigma = 3,5...4$ ).

Применение литых лопаток с заданной КГО позволяют повысить эксплуатационную температуру и ресурс лопаток ГТУ, однако при умеренных температурах в профильной и замковой частях лопаток возможны смешанные разрушения. На начальной стадии они подобны разрушениям поликристаллических лопаток, но достигнув плоскости скольжения, трещина может изменить скорость и направления развития, быстро распространяясь по нескольким плоскостям скольжения (например, как на рис. 2). Это является следствием проявления высокой анизотропии свойств сплава в зонах детали, где образуются очаги разрушений: на внутренней поверхности охлаждаемых лопаток, имеющей большой градиент температуры (в перфорационных отверстиях), местных дефектов литья, скопления карбидов и т.п.

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

### **Требования к конструкции лопатки НК**

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

### **Требования к отливкам лопаток НК**

При литье лопаток с заданной кристаллографической ориентацией необходимо:

- регламентировать отклонение величина угла  $\gamma$  КГО [001] от продольной оси  $OZ$  лопатки, которая должна находиться в пределах  $\gamma \leq 10^\circ$ , что гарантирует минимальные разбросы действующих на лопатку напряжений;
- применять специальные затравки (кристаллы с заданной КГО), что позволяет стабилизировать значения угла  $\gamma$  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  $\leq 800$  °С (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 [9].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Н. Д., Цейтлин В. И., Волков В. И. Технологические методы повышения надежности и ресурса деталей машин. Справочник. — М.: Машиностроение, 1993. — 304 с.
2. Петухов А. Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. — М.: Машиностроение, 1993. — 240 с.
3. Сулима А. М., Шулов В. А., Ягодкин Ю. Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. — М.: Машиностроение, 1988. — 240 с.
4. Петухов А. Н. Технологические методы обеспечения надежности и несущей способности высоконагруженных деталей машин / Надежность и долговечность машин и сооружений. Вып. 18. — Киев: Наукова думка, 1990 — С. 71–75.
5. Петухов А. Н. О принципах формирования свойств поверхностного слоя деталей из высокопрочных конструкционных сплавов // Поверхность: технологические аспекты прочности деталей / Под ред. В. С. Мухина. — Уфа: УГАТУ, 1994. — С. 57–63.
6. Мухин В. С., Смыслов А. М., Боровский С. М. Модифицирование поверхности деталей ГТД по условиям эксплуатации. — М.: Машиностроение, 1995. — 254 с.
7. Петухов А. Н. Особенности конструкционной прочности титановых сплавов и технологические методы повышения сопротивления усталости деталей из них // Титан. — 1995. — № 1–2 (5–6). — С. 18–21.
8. Петухов А. Н. О необходимости регламентирования свойств поверхностного слоя при проектировании деталей ГТД с учетом усталости // Техника воздушного флота. — 1995. — Т. LXIX. — № 1–2 (612–613). — С. 74–77.
9. Петухов А. Н. Особенности сопротивления многоцикловой усталости литых деталей жаропрочных никелевых сплавов с заданной кристаллографической структурой / Новые технологические процессы и надежность ГТД. Вып. 7. Обеспечение прочностной надежности рабочих лопаток высокотемпературных турбин. — М.: ЦИАМ, 2008. — С. 62–72. **ПЛАЭ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

*Петухов Анатолий Николаевич* – доктор технических наук, профессор, начальник сектора, e-mail: petukhov.an@mail.ru, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 10, pp. 61–76.

UDC  
629.7.015.4

**A.N. Petukhov**

## **REQUIREMENTS TO QUALITY SUPERFICIAL LAUER OF DETAILS GTE**

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) at all stages of "life cycle" GTE. 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.

Key words: high-cyclic fatigue (FHC), technological heredity, properties of a surface.

## **AUTHOR**

*Petukhov A.N.*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Sector, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russia, e-mail: petukhov.an@mail.ru.

## **REFERENCES**

1. Kuznetsov N. D., Tseytlin V. I., Volkov V. I. *Tekhnologicheskie metody povysheniya nadezhnosti i resursa detaley mashin*. Spravochnik (Processing methods of enhancing reliability and life of machine parts. Handbook), Moscow, Mashinostroenie, 1993, 304 p.
2. Petukhov A. N. *Soprotivlenie ustalosti detaley GTD* (Fatigue resistance of gas turbine engine parts), Moscow, Mashinostroenie, 1993, 240 p.
3. Sulima A. M., Shulov V. A., Yagodkin Yu. D. *Poverkhnostnyy sloy i ekspluatatsionnye svoystva detaley mashin* (Surface layer and service properties of machine parts), Moscow, Mashinostroenie, 1988, 240 p.
4. Petukhov A. N. *Nadezhnost' i dolgovechnost' mashin i sooruzheniy*. Vyp. 18 (Reliability and durability of machines and structures, issue 18), Kiev, Naukova dumka, 1990, pp. 71–75.
5. Petukhov A. N. *Poverkhnost': tekhnologicheskie aspekty prochnosti detaley*. Pod red. V. S. Mukhina (Surface: technological aspects of strength of parts. Mukhin V. S. (Ed.)), Ufa, UGATU, 1994, pp. 57–63.
6. Mukhin V. S., Smyslov A. M., Borovskiy S. M. *Modifitsirovanie poverkhnosti detaley GTD po usloviyam ekspluatatsii* (Modification of surface of gas turbine engine parts with respect to operation conditions), Moscow, Mashinostroenie, 1995, 254 p.
7. Petukhov A. N. *Titan*. 1995, no 1–2 (5–6), pp. 18–21.
8. Petukhov A. N. *Tekhnika vozdushnogo flota*. 1995, vol. LXIX, no 1–2 (612–613), pp. 74–77.
9. Petukhov A. N. *Novye tekhnologicheskie protsessy i nadezhnost' GTD*. Vyp. 7 (New technological processes and reliability of gas turbine engines, issue 7), Moscow, TsIAM, 2008, pp. 62–72.