

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ НА ФОРМИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГТД

© 2006 А.Н. Петухов

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

Рассмотрены особенности формирования параметров поверхностного слоя и структурное состояние материала деталей, которые характеризуют технологическую наследственность и определяют её влияние на конструкционную прочность деталей ГТД.

Разработка технологического процесса требует не только гарантированного получения заданных чертежом геометрических параметров, но получения специальных свойств материала деталей, без которых невозможно обеспечить им необходимые прочностные, эксплуатационные свойства и ресурс. Преобладание усталостных разрушений деталей на всех этапах «жизненного цикла» ГТД связано как с многообразием факторов, влияющих на сопротивление усталости (технологических, конструктивных, эксплуатационных, физической природы материала и др.), так и со сложностью прогнозирования опасных амплитуд переменных во времени напряжений даже резонансных колебаний, вызываемых неравномерностью воздушного или газового потоков.

Проблема предупреждения усталостных разрушений деталей ГТД очень сложна. Она требует решений [1-3] на всех этапах создания и эксплуатации ГТД:

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

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

3) *в эксплуатации* - за счёт *снижения амплитуды эксплуатационных напряжений, забросов температуры; внедрения мероприятий (конструктивных, технологических и эксплуатационных), снижающих влияние эксплуатационных повреждений*;

4) *при ремонте* (на крыле или в заводских условиях) тщательностью выпол-

нения дефектации и строгим соблюдением технологии ремонта.

Учёт технологической наследственности требует глубокого анализа природы физико-химических процессов, протекающих при формообразовании детали из различных конструкционных материалов, а также учёта критериев, лимитирующих несущую способность деталей в эксплуатационных условиях при статическом, циклическом МЦУ и многоцикловом МнЦУ нагружениях, включая влияние окружающей среды. Это позволяет сформулировать требования к техпроцессам получения заготовок (когда формируется структура материала основных деталей ДЛА и ЭУ) в зависимости от видов напряженного состояния деталей и особенностей эксплуатации; параметрам свойств поверхностного слоя, ответственных за формирование прочностных характеристик, включая длительную статическую, циклическую долговечность и сопротивление МнЦУ.

В процессе формообразования детали свойства её поверхностного слоя существенно отличаются от свойств сердцевины материала по физическим параметрам, структурному и химическому составам, а также по механическим свойствам. Что в первую очередь проявляется при усталостных разрушениях, очаги которых располагаются в поверхностном слое. Поэтому понятие технологической наследственности для МнЦУ будет сужаться до параметров, характеризующих свойства поверхностного слоя.

Физические параметры 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 разоориентировки 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 степень деформации материала ε , глубину h и степень наклёпа N_n , остаточные напряжения $\sigma_{\text{ост}}$ (макронапряжения- напряжения первого рода, напряжения 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, играющих, по существу, роль концентраторов напряжений; волнистостью, направлением неровностей и т. п.

Технологическая наследственность проявляется:

- в структурном состоянии материала, формирующимся при термопластической обработке (в первую очередь у титановых сплавов), при термической обработке сталей и никелевых сплавов;

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

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

Перечисленные факторы по существу формируют основные характеристики прочности и эксплуатационные свойства материала, определяющих несущую способность деталей, но вклад отдельных операций не равнозначен.

На основе понятия о технологической наследственности, анализа сложной природы физико-химических процессов, протекающих в процессе формообразования детали для различных конструкционных материалов, и с учётом критериев, лимитирующих несущую способность деталей в эксплуатационных условиях при статическом, циклическом и вибрационных (Мн-ЦУ) нагруже-

ниях, а также окружающей среды, формулируются требования к:

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

- параметрам свойств поверхностного слоя, ответственных за формирование прочностных характеристик, включая статическую, циклическую долговечность и сопротивление многоциклового усталости.

Отсюда вытекает представление об операциях «повышенного риска», которые существуют на всех этапах технологического цикла производства. При этом важно знать основные признаки «опасной» технологической наследственности, к которым относятся обычно контролируемые в процессе производства параметры:

- структурная и фазовая однородность;
- размер зёрен или кристаллической ориентации;

- соответствие техническим условиям (ТУ) характеристик прочности, твёрдости и пластичности ($\sigma_B; \sigma_T; \sigma_{\text{дл}}; \sigma_{-1}; \sigma_N; HB; \delta; \psi$ и т.д.);

- изменение химического состава (локальное или в объёме);

- шероховатость поверхности;
- степень и глубина наклёпа;
- величина и знак остаточных напряжений и т. д.

Следствием таких отклонений являются уменьшение долговечности деталей [1-3], проявляющееся в виде разрушения (растрескивания) поверхностного слоя, снижения статической, циклической или усталостной прочности, коррозионной стойкости материала (разрушения детали) и т. п.

Особое внимание должно уделяться повышению предела выносливости деталей, т.к. предел выносливости в значительной мере зависит от технологических факторов.

Для основных деталей ДЛА и ЭУ разработаны и применяются различные виды специальных и периодических контрольных испытаний, являющихся неотъемлемой частью технологического процесса, как на отдельных этапах производства, так и в различные периоды эксплуатации. Они направлены на поддержание стабильности технологического процесса, гарантирующего фор-

мирование в деталях необходимые несущую способность и ресурс.

Учёт условий эксплуатации, величины ресурса и особенностей напряженно деформированного состояния детали не позволяет формального применения технологических процессов или выбора структурного состояния материала. Эффективные технологические методы для деталей в условиях умеренных температур или ограниченного ресурса обычно оказываются деструктивными при повышенных температурах и больших ресурсах.

Большинство технологических методов формообразования деталей сопровождается пластической деформацией и тепловым воздействием на поверхностный слой, вследствие чего возникают структурные изменения в материале, а в кристаллической решётке металла резко возрастает плотность дислокаций, вакансий и других дефектов; происходит полигонизация и двойникование зерен, дробление их на фрагменты и блоки, которые у поверхности измельчаются.

При обработке материал текстурируется, а его структура ориентируется в направлении силового воздействия. Около 10% энергии, затраченной на пластическую деформацию, поглощается металлом, при этом 98% энергии идёт на искажение кристаллической решётки металла в поверхностном слое, который становится термодинамически неустойчивым, метастабильным. Кроме того, механическая обработка сопровождается комплексом других процессов (деформационных, тепловых, диффузионных, химических), которые зависят от режимов обработки, природы материалов взаимодействующих тел (детали, инструмента и т. д.) [1-6].

Рассматривая процесс резания металла (взаимодействие инструмента с деталью) с деформационной точки зрения, состоящий из отдельных циклов нагружения материала в локальном пространстве, то можно его представить следующим образом. В первом полуцикле при взаимодействии передней кромки резца с металлом реализуется «жёсткое» сжатие металла ($\epsilon_{сж} = const$, при $\sigma_{сж} > \sigma_{пл}$, где $\epsilon_{сж}$ - деформации сжатия, $\epsilon_{пл}$ - пластические деформации), а в следующем полуцикле «мягком» - разгрузка. Когда задняя кромка резца взаимодействует с метал-

лом реализуется «мягкий» полуцикл растяжения ($\sigma_p = const, \sigma_p < \sigma_{пл}$). При этом следует отметить, что основное повреждение поверхностный слой получает в первом «жёстком» полуцикле нагружения, где глубина пластически деформированного слоя может превышать 100-150 мкм и более, в котором формируются растягивающие остаточные напряжения.

Тщательные исследования процесса резания показывают, что он представляет собой сложный физико-химический процесс, объединяющий комплекс явлений как в зоне образования стружки, так и на поверхностях взаимодействия инструмента с деталью. В поверхностном слое механические характеристики материала изменяются как локально, так и по глубине слоя. С ростом интенсивности силового и термического воздействия на материал уменьшается его пластичность, повышается твёрдость и т. д., а при взаимодействии материала инструмента с деталью имеют место адгезионные и диффузионные процессы, приводящие к изменению химического и структурно-фазового состава поверхностного слоя. У титановых сплавов в полуцикле I может локально реализовываться процесс полиморфного превращения, что в последствие может явиться источником разрушения.

Исследования состояния тонких слоёв обрабатываемого материала и режущего инструмента методами металлографии, металлофизики, на растровом электронном микроскопе и микроспектральным анализом химического состава позволили выявить ряд особенностей процесса резания. Пластической деформации в зоне контакта, вызванная высоким уровнем контактных напряжений (условия «жёсткого» нагружения при сжатии), способствующих росту диффузионной подвижности атомов при наличии атомарного контакта ювенильно чистых поверхностей. Положительное влияние при этом играют также градиенты химических потенциалов элементов, температуры, электрического потенциала, давления и др. Показано, что с ростом скорости резания увеличивается средняя температура резания $\theta_{ср}$ [4]. Дальнейшее повышение скорости резания способствует росту температуры, интенсификации диффузионных процессов и допол-

нительной активизации новых химических элементов. Глубина взаимного проникновения элементов при скорости 45 м/мин достигает 10 мкм. Диффузионные процессы сопровождаются образованием новых фаз. Например, в титановом сплаве ВТ9, наряду с диффузионными процессами, наблюдались химические реакции с образованием интерметаллидов типа Ti_2Co , $TiCo$, $TiCo_2$, Co_2Al_9 , $Co_{14}Al_{13}$

Показано, что при механической обработке резанием в поверхностном слое деталей (особенно из жаропрочных сплавов и коррозионностойких сталей) проходят сложные механохимические и физикохимические процессы, влияющие на изменение в нём не только механических свойств материала детали, но и на изменение химического и фазового состава поверхностного слоя. Значительный вклад в формирование поверхностного слоя вносит и деформационный фактор, характеризуемый степенью и глубиной наклёпа, которая может достигать десятки и сотни микрон в зависимости от исходных свойств материала и режимов обработки. По мере повышения жаропрочности сплавов снижаются характеристики пластичности и коэффициент упрочнения, следовательно снижаются прочностные параметры поверхностного слоя. У никелевых сплавов, содержащих большой процент упрочняющей γ -фазы, при высоких скоростях резания отсутствуют конкурирующие процессы разупрочнения.

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 детали.

Можно отметить, что пластическая деформация материала неоднородна как по поверхности, так и по глубине слоя. Она, как следствие силового и термического воздействия на металл в зоне резания, сопровождается структурными изменениями, [1-3]:

- изменяются размеры блоков $\langle a \rangle$;

- повышается плотность дислокаций ρ ;
- увеличивается накопленная энергия кристалла $\langle IWI \rangle$;
- уменьшается пластичность материала;
- повышается микротвердость H_μ ;
- изменяются характеристики (длительной прочности σ_{dl} , предела выносливости σ_{-1} и т.др.

Показано, что сжимающие остаточные напряжения всегда способствуют повышению предела выносливости, но положительное их влияние значительно меньше, чем отрицательное влияние растягивающих остаточных напряжений. С повышением температуры эксплуатации роль остаточных напряжений уменьшается вследствие их релаксации. Интенсивность процессов разупрочнения и перераспределения остаточных напряжений зависит от температуры, уровня действующих напряжений и от исходного состояния поверхностного слоя. Если при умеренных и нормальных температурах влияние на сопротивление усталости высокопрочных конструкционных материалов оказывают остаточные напряжения большее, чем шероховатость, то при повышенных температурах роль последней увеличивается.

При рабочих температурах T_3 , составляющих $T_3 < 0,7T_{cm}$ (T_{cm} - температура старения), влиянием пластического деформирования на длительную прочность материала можно пренебречь. Однако при температурах $T_3 > 0,7T_{cm}$ в сплавах наблюдаются процессы возврата и рекристаллизации, которые сопровождаются интенсивным окислением, вызванным повышением диффузионной активности атомов легирующих элементов. В результате ослабляются границы зерен, по которым развиваются микротрещины, переходящие в очаги усталостных разрушений.

Следствием таких обработок является снижение характеристик долговечности для длительной прочности, жаростойкости сплава на 100...150°C и ползучести. Вопрос термостабильности актуален и для титановых сплавов.

Для титановых сплавов большое значение соблюдение режимов на всех операциях, включая заключительные отделочные. Установлена хорошая корреляционная связь [3] между величиной предела выносливости σ_{-1} и показателем m кривой усталости: чем вы-

ше значение m , тем выше предел выносливости.

Показано, что конструкционная прочность деталей из титановых сплавов определяется не только основными технологическими факторами, к которым относятся:

-термические и деформационные режимы термопластической обработки, формирующие макро- и микроструктуру сплава, а также характеристики прочности 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.;

- особенности конструктивных решений при проектировании детали, а также условиями эксплуатации деталей и конструкции в целом.

Разработчики ГТД предъявляют ряд требований:

- по стабилизации прочностных свойств полуфабрикатов титановых сплавов;

- по обеспечения специальными служебными свойствами сплавов;

- по введению нормированных значений для характеристик трещиностойкости сплавов или критериев, выявляющих связь между характеристиками пластичности и трещиностойкости.

Проблема трещиностойкости особенно актуальна для титановых дисков, подвергающихся в эксплуатации циклическим нагрузкам. Она вызвана тем, что ряд локальных дефектов в материале (газонасыщенные включения, ликвации, структурная неоднородность и т. п.) не выявляются современными методами неразрушающего контроля. Эта проблема актуальна как в нашей стране, так и за рубежом, о чём свидетельствуют разрушения дисков зарубежных ГТД различных типов.

Формирование механических свойств титановых сплавов зависит как от качества исходного губчатого титана, из которого путем легирования получают титановые сплавы, так и от структуры, формирующейся

в процессе термопластической деформации и термообработки заготовок.

В отличие от сталей, структура и свойства которых формируется при термообработке (закалки и отпуска), изменить структурное состояние титановых сплавов можно только совмещением термической обработки с объемной деформацией (*ТМО*) в узком температурном интервале, определяемого температурой полиморфного (фазового) превращения T_m , которая индивидуальна для каждой заготовки и зависит от содержания кислорода в ней. Знание T_m особенно важен при *ВТМО* или при *ТМО*. Например, T_m для сплава ВТЗ-1 может изменяться от плавки к плавке в пределах от 930 до 1020°C при номинальном режиме нагрева под штамповку при 930°C. Потому неучёт T_m приведёт к неоднородности структуры и свойств материала штамповки: возрастёт разброс значений предела прочности $\sigma_B = 1200...1500$ МПа; снизится пластичность вместо $\delta > 10$ % по ТУ до $\delta < 6$ %; возникнет вероятность склонности сплава к хрупкому разрушению. В структуре сплава может наблюдаться мелкодисперсная α -фаза, обусловленная деформационным наклепом [3].

Исследование конструкционной прочности титановых сплавов показали, что предел выносливости стандартных образцов из них обычно составляет $0,5\sigma_B$, а лопаток может составлять - $0,25\sigma_B$. Такое различие в пределах усталости обычно стараются связать с влиянием формы и масштабным фактором. Проведенные исследования [3] выявили решающее влияние на усталость технологической наследственности и показали, что при соблюдении оптимальных режимов резания различие в пределах выносливости лопаток и стандартных образцов исчезает.

Для конструкционных сталей и сплавов, применяемых в современных ГТД, характерна повышенная чувствительность к концентрации напряжений (надрезам, рискам, галтелям и т.д.). Это проявляется и в высокой восприимчивости материалов к технологической наследственности о чём свидетельствуют данные по чувствительности к концентрации напряжений титановых сплавов, коррозионноустойчивых сталей мартенситного или аустенитного класса, жаропрочных деформируемых никелевых сплавов.

Эти свойства конструкционных материалов проявляются и в эксплуатационной повреждаемости деталей, что становятся очагами усталостных разрушений

Максимальные параметры длительной прочности и ползучести достигаются за счёт увеличения размеров зерна, т.е. уменьшения площади границ зёрен, и образования столбчатой или моно структуры, расположенной параллельно направлению действия главных напряжений. Последнее способствует также увеличению долговечности материала при воздействии на деталь циклически изменяющихся статических и термических напряжений, повышению стойкости сплава к высокотемпературной коррозии. Однако в получаемых таким методом отливках, легко провоцируется формирование рекристаллизации даже за счёт возникновения внутренних напряжений в отливке, не говоря уже о пластически деформированном слое, возникающем при обработке лопаток. Последний становится потенциальным источником деградации МОНО структуры лопатки в эксплуатации. Следует помнить что, достигнув максимальных характеристик по параметрам длительной прочности и ползучести в направлении [001], сплав становится анизотропным, т.е. его механические характери-

стики зависят от кристаллографических направлений [5,6].

Список литературы

1. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. - 240 с.
2. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И., Волков В.И. Технологические методы повышения надёжности и ресурса деталей машин. М.: Машиностроение, 1993. - 304 с.
3. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. М.: Машиностроение, 1993. - 240 с.
4. Мухин В.С., Смыслов А.М., Боровский С.М. Модифицирование поверхности деталей ГТД по условиям эксплуатации. М.: Машиностроение, 1995. - 254 с.
5. Петухов А.Н. Специальные требования к технологии изготовления лопаток турбин из сплавов с заданной кристаллографической ориентацией. Научные труды. Выпуск 9 (81), ИЦ МАТИ, Москва, 2005. - с. 107-111
6. Петухов А.Н. Физические основы технологической наследственности и методы обеспечения конструкционной прочности основных деталей ГТД. Конверсия в машиностроении - Conversion in machine building of Russia. 2005, №1-2 (68-69). - с. 44-58

TECHNOLOGICAL HEREDITY END CONSTRUCTIONAL DURABILITY

© 2006 A.N. Petukhov

Central Institute of Aviation Motors, Moscow

The requirements for the control of introduced structural materials and stability of technological processes providing the component life and reliability are formulated on the basis of the criteria limiting bearing capacity under static, cyclic and multicyclic loading GTE.