

УДК 621.81.629.7.015

**А.Н. ПЕТУХОВ***Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Россия***РОЛЬ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ В ФОРМИРОВАНИИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И РЕСУРСА ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД И ЭУ**

*Показано, что преобладание разрушений деталей от многоциклового усталости (МнЦУ) на всех этапах «жизненного цикла» ГТД связано как с многообразием факторов (конструктивных, технологических, эксплуатационных и др.), влияющих на сопротивление усталости, так и со сложностью прогнозирования опасных амплитуд переменных напряжений. Большинство применяемых в ГТД и ЭУ конструкционных материалов склонно к высокой чувствительности к геометрическим концентраторам напряжений и к свойствам поверхностного слоя, характеризуемым как технологическая наследственность (ТН). ТН – результат силовых, деформационных и термических воздействий на поверхностный слой детали, вносимых технологическими процессами и отдельными операциями, что, в конечном счете, формирует несущую способность материала детали. Выбор оптимальных конструктивных и технологических мероприятий, позволяющих повысить надежность конкретной детали, всегда является результатом анализа и компромисса между особенностями различных видов нагружения, оценкой вероятности возможных типов разрушений, тяжестью их последствий, техническим и экономическим обоснованием назначенного ресурса.*

**Ключевые слова:** *многоцикловая усталость (МнЦУ), технологическая наследственность, свойства поверхностного слоя.*

**Введение**

Создание энергетических установок (ЭУ) и ГТД, связано с высокой их трудоемкостью и стоимостью. Поэтому повышение их экономической эффективности существенным образом зависит от величины ресурса и надежности. Выбор основных параметров установок (температуры газа перед турбиной, продолжительность форсированных режимов и др.) непосредственно влияет на величину ресурса и показатели надежности, а у ГТД – на относительную и абсолютную массу двигателя.

В процессе ресурсного проектирования стремятся к оптимизации параметров двигателя в соответствии с полным назначенным ресурсом и заданной надежностью. При этом выполняется расчет на прочность на полный назначенный ресурс, в процессе которого определяется расчетная долговечность основных деталей ГТД по критериям длительной прочности, малоциклового усталости (МЦУ) и в некоторой степени – многоциклового усталости МнЦУ).

**Роль конструктивных факторов**

Значительную сложность при прогнозировании долговечности представляет точность определения температурного поля на стационарных и на переходных режимах работы ГТД, а для прогнозирова-

ния долговечности МЦУ необходим расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) в зонах концентрации напряжений, что требует решения пространственных задач с учетом пластичности.

Предельное состояние материала детали – исчерпание прочности или разрушение – является сложным процессом, зависящим от исходных свойств материала, конструктивных и технологических факторов, условий нагружения, влияющих на конструкционную прочность и т.д. Вместе с тем основные факторы, определяющие долговечность деталей (силовые, циклические, температурные, технологические), с высокой достоверностью определяются на этапе проектирования. Кроме того, в процессе доводки они уточняются по результатам стендовых, лабораторных и эксплуатационных испытаний двигателя в целом и его узлов. Разрушения, связанные с длительной прочностью и МЦУ, являются следствием неучтенных отклонений условий эксплуатации или отступлений в технологическом процессе изготовления деталей или узлов.

В то же время преобладание разрушений деталей от МнЦУ на всех этапах «жизненного цикла» ГТД связано как с многообразием факторов (конструктивных, технологических, эксплуатационных и др.), влияющих на сопротивление усталости, так и со сложностью прогнозирования опасных амплитуд переменных напряжений. Прогнозирование последних осложняется, в первую очередь, трудностями

определения источников и интенсивности возбуждения случайных колебаний, вызванных неравномерностью течения воздушного или газового потоков, вызывающих срывные колебания, автоколебания, флаттер и т.п.

### Учет роли технологической наследственности

Особенность большинства применяемых в ГТД и ЭУ конструкционных материалов (теплостойких нержавеющей сталей, жаропрочных титановых и никелевых сплавов) заключается в том, что для них характерны высокая чувствительность как к геометрическим концентраторам напряжений, так и к параметрам поверхностного слоя:

- $R_a$ ,  $h_n$ ,  $\sigma_{ост}$  и т.д.; структурной неоднородности (общей структуры и локальной); текстуре; размеру зерна и др.;
- к эксплуатационным факторам (деградация материала от силового и теплового воздействия и окружающей среды;
- проявлению отрицательной технологической наследственности).

Под технологической наследственностью понимается влияние повреждений, вносимых технологическими процессами и отдельными операциями на несущую способность детали. Так как чаще всего несущая способность детали при действии на нее переменных напряжений определяется сопротивлением усталости и, в значительной мере, свойствами поверхностного слоя, то обычно понятие технологической наследственности сужается до характеристик состояния поверхностного слоя. Это связано и с тем, что свойства поверхностного слоя детали в результате процессов ее формообразования, может очень существенно отличаться от сердцевины не только по механическим и физическим свойствам, но и по структурному и даже химическому составу [1, 4].

В общем случае технологическую наследственность принято определять геометрическими ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $S_m$ ,  $S$ ,  $R_{ck}$ ,  $d_n$ ), физическими ( $D$ ,  $\rho$ ,  $c$ ,  $a$ ,  $\gamma$ ,  $W$ ,  $a_{bl}$ ), деформационными ( $\epsilon$ ,  $h$ ,  $N_n$ ,  $\sigma_{ост}$ ), химическими и структурными параметрами, сформировавшимися после основных технологических процессов или окончательных операций в слое или в объеме детали.

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

Результаты технологической наследственности [1 – 4] проявляются в структурном состоянии материала при термопластической обработке (особенно у титановых сплавов) и при термической обработке

сталей и никелевых сплавов:

- при горячем (холодном) деформировании в текстуре сплава, а при литье размере зерен или кристаллической ориентации;
  - при образовании технологических остаточных напряжений при штамповке, прокатке, литье, механической обработке, нанесении покрытий, химическом травлении, сборке и т.д., которые формируют характеристики прочности и эксплуатационные свойства конструкционных материалов, что, в конечном счете, и определяет несущую способность деталей.
- Отсюда вытекает представление об операциях «повышенного риска» [1], возможных на разных этапах технологического цикла производства деталей. Поэтому важно выявить основные признаки «опасной» технологической наследственности и контролировать в процессе изготовления соблюдение технических условий на параметры:
- структурной и фазовой однородности;
  - размера зерен или кристаллографической ориентации;
  - характеристик прочности, пластичности ( $\sigma_B$ ;  $\sigma_T$ ;  $\sigma_{дл}$ ;  $\sigma_{-1}$ ;  $\sigma_N$ ; HB;  $\delta$ ;  $\psi$  и т.д.);
  - химического состава;
  - шероховатости поверхности;
  - степени и глубины наклепа, величины остаточных напряжений и т.д.

Поверхностный слой детали является носителем технологической наследственности, где проявляются все параметры слоя одновременно, так как многие из них взаимосвязаны и не могут существовать отдельно, например, деформационные и физические и т.п.

Следствием отклонений параметров слоя от технических условий являются уменьшение долговечности деталей, проявляющееся в виде растрескивания поверхности, в снижении коррозионной стойкости материала, длительной прочности, циклической долговечности, сопротивления усталости, жаропрочности, ведущие к преждевременному разрушению детали.

Большинство технологических методов формообразования деталей сопровождается пластической деформацией и тепловым воздействием на поверхностный слой, вследствие чего возникают структурные изменения в материале, а в кристаллической решетке 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 механической обработке деталей (особенно из жаропрочных сплавов и теплопрочных корро-

зионно-стойких сталей) в поверхностном слое на глубине до 200 мкм проходят сложные механохимические и физикохимические процессы, изменяющие в нем механические свойства, химический и фазовый состав, влияющие на несущую способность деталей.

С деформационной точки зрения процесс резания металла (взаимодействие инструмента с металлом) состоит из отдельных циклов нагружения материала в локального объема, который можно представить следующим образом [1]: в первом полуцикле при взаимодействии передней кромки резца с металлом реализуется «жесткое» сжатие ( $\varepsilon_{сж} = \text{const}$ , при  $\sigma_{сж \max} = \sigma_T$ , где  $\varepsilon_{сж}$  – деформации и  $\sigma_{сж}$  – напряжение сжатия;  $\sigma_T$  – предел текучести) при трехосном напряженном состоянии. В следующем полуцикле задняя кромка резца взаимодействует с металлом по «мягкому» полуциклу растяжения ( $\sigma_p = \text{const}$ ,  $\sigma_p < \sigma_{пл}$ ). При этом максимальное повреждение слой получает в первом полуцикле нагружения, а глубина пластически деформированного слоя может превышать 100...150 мкм, где формируются остаточные напряжения I, II и III рода, изменяются локально и по глубине механические характеристики, химический и структурно-фазовый состав материала.

Пропорционально росту степени пластической деформации возрастает внутренняя энергия деформированного металла, а материал переходит в неравновесное состояние [2, 4].

В работах [1 – 4] показано, что сжимающие остаточные напряжения всегда способствуют повышению предела выносливости, но положительное их влияние значительно меньше, чем отрицательное влияние растягивающих остаточных напряжений. Связь между относительной величиной предела выносливости и относительной величиной остаточных напряжений можно представить в виде функции

$$\sigma_a^n + \sigma_{ост}^n = 1,$$

где  $\sigma_a$  – относительная величина амплитуды напряжений;

$\sigma_{ост}$  – относительная величина остаточных напряжений.

Наибольшее влияние остаточных напряжений на МЦУ и МнЦУ наблюдается при нормальной и умеренной температурах. С ростом температуры вследствие релаксации остаточных напряжений влияние остаточных напряжений уменьшается, но увеличивается роль параметра шероховатости.

Интенсивность процессов разупрочнения и перераспределения остаточных напряжений зависит не только от уровня эксплуатационной температуры и амплитуды напряжений, но и от исходного состояния поверхностного слоя. Кроме того, из-за интенсивного силового и термического воздействия на

материал при взаимодействии материала резца с деталью имеют место адгезионные и диффузионные процессы, протекающие при повышенных температурах. Данные показывают, что при механической обработке резанием в поверхностном слое деталей (особенно из жаропрочных сплавов и теплопрочных коррозионностойких сталей) проходят сложные механохимические и физико-химические процессы, влияющие на изменение в нем не только механических свойств материала детали, но и на изменение химического и фазового состава поверхностного слоя.

Вместе с тем, значительный вклад в формирование поверхностного слоя вносит деформационный фактор, характеризуемый степенью и глубиной наклепа, которая может достигать десятки и сотни мкм в зависимости от исходных свойств материала и режимов обработки.

Отмечено, что по мере повышения жаропрочности сплавов снижаются характеристики пластичности и коэффициент упрочнения, следовательно снижаются прочностные параметры поверхностного слоя. Однако у жаропрочных никелевых сплавов, содержащих упрочняющую  $\gamma'$ -фазу, при высоких скоростях резания отсутствуют конкурирующие процессы разупрочнения. На задней поверхности резца при низкой скорости резания имел место полный пластический контакт по площадке износа, а минимальная толщина обрабатываемого материала, удерживаемого силами адгезии составляла 2 мкм [4].

Таким образом, при обработке материала резанием протекают два взаимно исключаящих процесса: *деформационное упрочнение и разупрочнение*.

С повышением у сплавов жаропрочности снижаются их характеристики пластичности и коэффициент упрочнения, т.е. изменяются параметры поверхностного слоя.

Широко применяемое в двигателестроении поверхностное пластическое деформирование (ППД) представляет собой совокупность процессов, позволяющих, как правило, снизить шероховатость поверхности детали, создать поверхностный слой с благоприятными (сжимающими) остаточными напряжениями, получить в нем более однородную структуру, создать необходимый рельеф поверхности, снизить влияние на сопротивление усталости концентраторов напряжений и др., что позволяет повысить сопротивление усталости материала детали.

В то же время эти благоприятные процессы с точки зрения повышения сопротивления МнЦУ в условиях нормальной и умеренных температур при повышенных температурах и больших ресурсах современных ГТД применение ППД сопровождается отрицательными явлениями:

– интенсифицируются процессы релаксации остаточных сжимающих напряжений;

– высокие энергетический потенциал кристаллической решетки материала повышает диффузионную подвижность атомов легирующих элементов в поверхностном слое, приводящие к снижению характеристик жаростойкости и длительной прочности материала [1 – 4].

Кроме того, для деталей, которые в эксплуатации подвергаются упругопластическим деформациям и которым важно иметь запас пластичности для увеличения сопротивления МЦУ, требуется всесторонний анализ возможной эффективности применения методов ППД с учетом конкретных условий эксплуатации [5].

Процесс ППД в общем случае может быть представлен системой процессов локального деформирования:

1) общий очаг, определяющий локальное формоизменение (контур локальной площадки, внеконтактная деформация и т.п.);

2) локальные очаги смятия исходных или промежуточных шероховатостей поверхности;

3) локальные очаги сдвига, возникающие вследствие дискретности фактического контакта твердых тел и др.;

4) сопутствующие ППД другие физические и химические процессы.

В основе современной физики поверхностей лежит представление о том, что одни явления в приповерхностном слое протекают так же, как в объеме, другие трансформируются, третьи способны протекать на поверхности (при взаимодействии на электронном, атомном, молекулярном уровнях и уровне дефектов, субмикр-, микро- и макроуровнях). Следовательно, процессы ППД являются фоном, на котором протекает ряд других физических процессов [1 – 4].

При рабочих температурах  $T_3$ , не достигающих  $0,7 T_{ст}$ , т. е. температуры старения, влиянием пластического деформирования на длительную прочность материала можно пренебречь.

Однако при температурах  $T_3 > 0,7 T_{ст}$  в сплавах наблюдаются процессы возврата и рекристаллизации, которые сопровождаются интенсивным окислением, вызванным термодинамической неустойчивостью материала и повышением диффузионной активности атомов легирующих элементов, что приводит к снижению характеристик длительной прочности и жаростойкости пластически деформированного слоя сплавов.

Поэтому детали из жаропрочных сплавов после механической обработки должны иметь минимальную пластическую деформацию поверхностного слоя.

Сквозной наклеп тонкостенных деталей (кромок лопаток) недопустим, так как при этом резко снижается сопротивляемость материала развитию

трещин.

Термообработка готовых деталей снимает остаточные напряжения, но не устраняет последствия наклепа в жаропрочных сплавах.

После стабилизирующего отпуска в деталях из сталей и титановых сплавов предел выносливости снижается примерно на 10%, но это устраняется последующими виброполировкой или глянцовкой, наводящих в поверхностном слое детали сжимающие остаточные напряжения.

Статическая нагрузка, равная пределу текучести материала, снимает примерно 50% величины остаточных напряжений. Полная релаксация остаточных напряжений в зависимости от степени легирования сплава может произойти при нагреве в течение 12 ч, что обычно применяют для окончательно готовых деталей (лопаток, дисков, валов и др.), однако у высокопрочных материалов, имеющих высокий предел текучести, релаксация напряжений происходит медленнее.

В процессе эксплуатации (ресурсы ЭУ превышают  $10^5$  ч, ГТД –  $10^4$  ч) у конструктивных материалов основных деталей под воздействием силовых полей напряжений (статических и переменных), теплового и агрессивного воздействия окружающей среды происходит деградация механических свойств (снижение пластичности, повышение склонности к хрупкому разрушению, рекристаллизация и т.д.). Интенсивность протекания этих процессов в значительной мере связана с технологической наследственностью, заложенной в материале при изготовлении деталей.

На разных стадиях ресурса может наблюдаться различная интенсивность повреждаемость деталей. Это особенно опасно для лопаток, отливаемых с заданной кристаллографической ориентацией, у которых пластическая деформация в зоне действия высоких температур может вызвать процесс рекристаллизации, т.е. деградацию в поликристаллический сплав [6].

## Выводы

Выбор оптимальных конструктивных и технологических мероприятий, позволяющих повысить несущую способность конкретной детали, как правило, является результатом анализа и компромисса между особенностями различных видов нагружения, оценке вероятности возможных типов разрушений, тяжестью их последствий и величиной технически и экономически обоснованного ресурса.

## Литература

1. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД / А.Н. Петухов – М.: Машиностроение

ние, 1993. – 240 с.

2. Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

3. Петухов А.Н. Технологические методы обеспечения надежности и несущей способности высоконагруженных деталей машин / А.Н. Петухов // Надежность и долговечность машин и сооружений. – К.: Наукова думка, 1990. – Вып. 18. – С. 71-75.

4. Мухин В.С. Модифицирование поверхности деталей ГТД по условиям эксплуатации / В.С. Мухин, А.М. Смыслов, С.М. Боровский. – М.: Машиностроение, 1995. – 254 с.

5. Петухов А.Н. Особенности формирования свойств поверхностного слоя основных деталей ГТД при применении традиционных и современных методов упрочнения / А.Н. Петухов // Вестник двигателестроения. Herald of aeroenginebuilding. – Запорожье: «Мотор Сич», 2006. – № 2. – С. 20-24.

6. Петухов А.Н. Особенности сопротивления много-циклового усталости литых деталей из жаропрочных никелевых сплавов с заданной кристаллографической структурой / А.Н. Петухов // Новые технологические процессы и надежность ГТД. Вып. 7. Обеспечение прочностной надежности рабочих лопаток высокотемпературных турбин. – М.: ЦИАМ, 2008. – С. 62-72.

Поступила в редакцию 27.05.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Конструкция двигателей ЛА и теплотехника» Ю.И. Павлов, МАТИ им. К.Э. Циолковского, Москва, Россия.

### РОЛЬ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ У ФОРМУВАННІ ЗДАТНОСТІ, ЩО НЕСЕ, І РЕСУРСУ ОСНОВНИХ ДЕТАЛЕЙ ГТД І ЕУ

*А.Н. Петухов*

Показано, що переважання руйнувань деталей від багаточислової втоми на всіх етапах «життєвого циклу» ГТД пов'язане як з різноманітністю чинників (конструктивних, технологічних, експлуатаційних і ін.), що впливають на опір втоми, так і із складністю прогнозування небезпечних амплітуд змінної напруги. Більшість вживаних в ГТД і ЕУ конструкційних матеріалів схильні до високої чутливості як геометричних концентраторів напруги і до властивостей поверхневого шару, що характеризуються як технологічна спадковість (ТС). ТС – результат силових, деформаційних і термічних дій на поверхневий шар деталі, що вносяться технологічними процесами і окремими операціями, що, кінцем кінцем, формує здатність матеріалу деталі, що несе. Вибір оптимальних конструктивних і технологічних заходів, що дозволяють підвищити надійність конкретної деталі, завжди є результатом аналізу і компромісу між особливостями різних видів вантаження, оцінкою вірогідності можливих типів руйнувань, тягарем їх наслідків, технічним і економічним обґрунтуванням призначеного ресурсу.

**Ключові слова:** багаточислова втома, технологічна спадковість, властивості поверхневого шару.

### ROLE SURFACE IN FORMATION OF BEARING ABILITY AND THE RESOURCE OF BASIC DETAILS GTE

*A.N. Petukhov*

It is shown that prevalence of destructions of details for high-cyclic 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. Applied in GTE constructional materials possess high sensitivity to geometrical concentrators of pressure and to properties of a surface. These properties, characterised as a technological heredity (TH) – result of pressure, deformation and thermal influences on a surface of the detail, brought by technological processes and separate operations. It, finally, forms bearing ability of a material of a detail. A choice of the optimum constructive and technological actions, allowing to raise reliability of a concrete detail, always grows out of the analysis and the compromise between features of various kinds loading, an estimation of probability of possible types of destructions, weight of their consequences, a technical and economic substantiation of the appointed resource.

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

**Петухов Анатолий Николаевич** – д-р техн. наук, профессор, начальник сектора отделения «Динамика и прочность двигателей» ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», Москва, Россия.