

УДК 621.92.004.93

С.С. ДУБРОВСКИЙ<sup>1</sup>, А.Ю. КРИВЕНКО<sup>1</sup>, Н.А. КОВЕШНИКОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>Криворожский национальный университет, Украина<sup>2</sup>Национальный авиационный университет, Украина

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛЕЙ

Проведено комплексное исследование влияния структурно-технологических факторов на прочностные характеристики деталей проточной части авиационных ГТД. Установлено, что шероховатая поверхность снижает долговечность деталей за счет концентрации напряжений в районе микронадрывов из-за более интенсивного процесса окисления, при этом более чувствительны высоколегированные, жаропрочные стали и сплавы. Определено, что немаловажную роль играет не только величина шероховатости, но и ее спектр. Предложено выразить зависимость прочности от шероховатости через коэффициент влияния качества поверхности на прочность. Проанализировано влияние микроконцентраторов поверхностного слоя деталей на долговечность при термоциклическом нагружении. Приведены результаты исследований кинетики повреждения стали в процессе термоусталости на образцах, полученных различными методами финишной обработки. Установлено, что зарождение и развитие поперечных трещин на шлифованных и точеных образцах происходит по рискам от обработки. Существенное влияние на усталостную прочность оказывают направления неровностей.

**Ключевые слова:** усталость, шероховатость, наклеп, остаточные напряжения, долговечность деталей, концентрация напряжений, микронадрыв.

### Проблема и ее связь с научными и практическими задачами

Анализ отказов газотурбинных двигателей (ГТД) в процессе эксплуатации показывает, что большинство повреждений деталей носит усталостный характер, поэтому практическое значение проблемы обеспечения их несущей способности трудно переоценить. Непрерывно растут требования к надежности и материалоемкости ГТД, все более жесткими становятся условия работы и режимы эксплуатационной нагруженности. При создании новых ГТД приходится сталкиваться с необходимостью обеспечения максимального резерва прочности каждой детали с учетом условий эксплуатации и конструктивных особенностей. Это обусловлено тем, что на сопротивление усталости деталей ГТД влияет большое количество факторов, совокупное значение которых носит неопределенный характер.

Повышение качества выпускаемой продукции требует решения многочисленных проблем в самых различных областях. Технологические проблемы относятся к ряду важнейших, ибо их успешное решение определяет, в конечном итоге, эксплуатационные показатели даже прекрасно спроектированных изделий [1].

Поэтому современное авиационное машиностроение выдвигает перед технологами задачу по выбору таких методов и режимов изготовления

деталей, особенно отделочных операций, которые бы формировали качественный поверхностный слой с высокими структурно-механическими свойствами [1].

### Анализ исследований и публикаций

В данном направлении проведено значительное количество исследований [1 – 3]. Разработано большое количество различных технологических методов повышения качества поверхности деталей. Но на наш взгляд в современном производстве назначение и технологическое обеспечение оптимальных параметров состояния поверхностей деталей недостаточно обосновано, что приводит либо к завышению требований и удорожанию машин, либо к их занижению и снижению надежности.

### Постановка задания

Несмотря на большое количество исследований, вопрос технологического обеспечения заданного уровня параметров состояния поверхностного слоя остается достаточно актуальным [1 – 3]. Поэтому, целью работы является исследование влияния структурно-технологических факторов на усталостные характеристики, кинетику зарождения и развития усталостного разрушения жаропрочных материалов, применяемых для изготовления деталей ГТД.

### Изложение материалов и результаты

Трудоемкость изготовления дисков и лопаток в большинстве конструкций ГТД составляет 40-50% общей трудоемкости двигателя. Эти детали являются наиболее нагруженными и труднообрабатываемыми деталями современных ГТД. В процессе работы двигателя они подвергаются воздействию знакопеременных нагрузок и сложных условий работы. Эти особенности требуют использования в производстве прогрессивных методов и технологий обработки, особенно на финишных операциях.

Анализ дефектов и разрушений деталей прочной части ГТД [4, 5] показывает, что в большинстве случаев они смешанного характера. На ранней стадии зарождение и развитие трещин происходит на кромках в поверхностном слое. Это можно объяснить высокой нагруженностью поверхности деталей. Точки, наиболее близко расположенные к наружной поверхности детали, испытывают наибольшие нормальные и касательные напряжения. Увеличивает действие сил и моментов наличие концентраторов напряжений и различных дефектов поверхности. Таким образом, поверхностный слой является ослабленным и наиболее напряженным.

Так как качество обработки поверхности деталей ГТД оказывает значительное влияние особенно для высокопрочных сталей, рассмотрим влияние некоторых параметров, характеризующих поверхностный слой (шероховатость, наклеп и остаточные напряжения), на долговечность деталей и технологические методы повышения долговечности.

Исследование проводилось на цилиндрических образцах диаметром 5 мм и длиной рабочей зоны 50 мм. Были исследованы различные виды технологической обработки поверхности образцов: точение, шлифование и механическое полирование. Учитывая тот факт, что глубина и степень наклепа, величина, знак и характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей зависит от технологических режимов их обработки, особенно на этапе окончательных операций, последняя операция в каждом случае полностью снимала слой металла, наклепанный предыдущей операцией. Таким образом, в каждом виде технологической обработки последняя операция формировала не только чистоту поверхности, но также наклеп и остаточные напряжения.

Проводимые исследования цилиндрических образцов с различной шероховатостью показали, что при увеличении шероховатости прочность снижается по определенному закону (рис. 1).

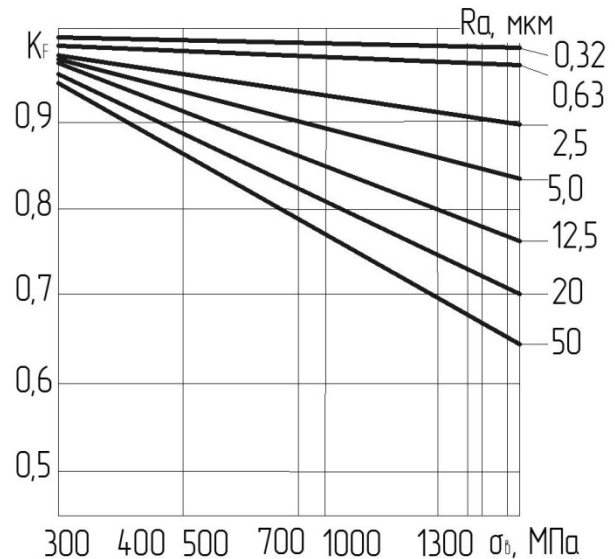


Рис. 1. Влияние коэффициента качества поверхности на сопротивление усталости

На рисунке 1 зависимость прочности от шероховатости выражена через  $K_F$  - коэффициент влияния качества поверхности на прочность. Значение коэффициента определяли по формуле (ГОСТ 25.504-82):

$$K_{F\sigma} = 1 - 0,22 \cdot \lg Rz(\lg(\frac{\sigma_B}{20}) - 1), \quad (1)$$

где  $Rz$  – величина микронеровности по десяти точкам;

$\sigma_B$  – предел прочности материала.

Из рисунка 1 видно, что снижение предела выносливости оказывается тем больше, чем больше величина микронеровностей [2]. Шероховатая поверхность снижает долговечность деталей за счет концентрации напряжений в районе микронадрывов (рис.2) из-за более интенсивного процесса окисления, при этом более чувствительны высоколегированные, жаропрочные стали и сплавы.

Установлено, что немаловажную роль играет не только величина шероховатости, но и ее спектр. Наибольшую опасность в отношении снижения долговечности представляют «высокие» гармоники неровностей поверхности (более 20 мкм), что необходимо учитывать в отделочных операциях при механической обработке поверхностей абразивным материалом.

Учитывая особенности работы элементов горячей части двигателя, исследовано также изменение состояния поверхностного слоя при термоциклировании. Профилограммы поверхности некоторых образцов показаны на рис.3.

Графические зависимости среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$  исследуемых об-

разцов, представленные на рис.4 показывают, что до режима  $50 \leftrightarrow 800^{\circ}\text{C}$  включительно на базе 1000 циклов не происходит существенного изменения шероховатости поверхности.

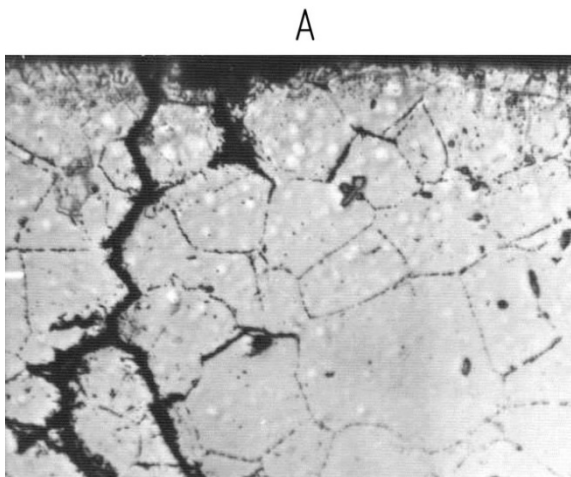
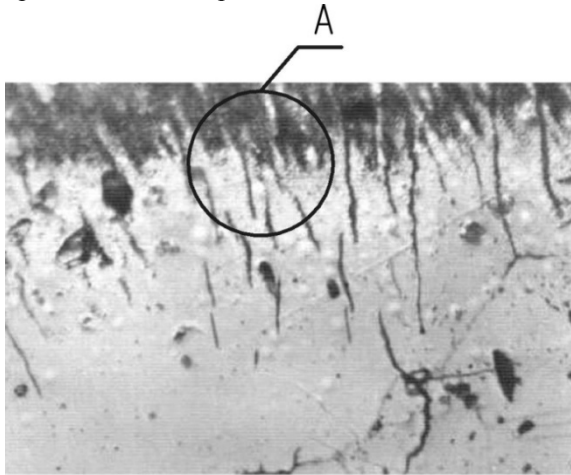


Рис. 2. Приповерхностное разрушение сплава ЭИ598ВД (ВТМО) и микроструктура при  $\times 500$  режим  $50 \leftrightarrow 800^{\circ}\text{C}$  с 1000 циклов

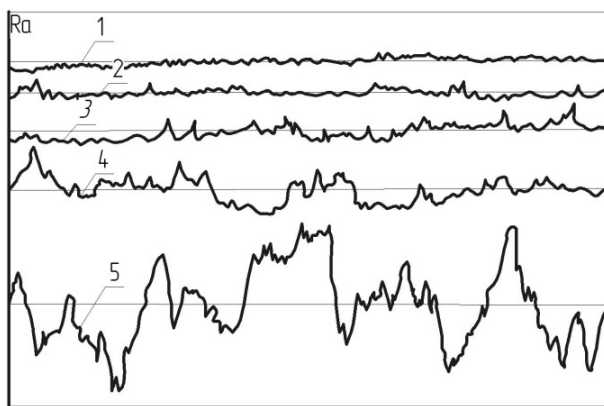


Рис. 3. Профилограммы поверхности образцов сплава ЭИ 598ВД: 1 - не испытанные; 2 -  $50 \leftrightarrow 715^{\circ}\text{C}$ ,  $N=1000$ ; 3 -  $50 \leftrightarrow 715^{\circ}\text{C}$ ,  $N=5000$ ; 4 -  $50 \leftrightarrow 800^{\circ}\text{C}$ ,  $N=1000$ ; 5 -  $50 \leftrightarrow 1000^{\circ}\text{C}$ ,  $N=1000$

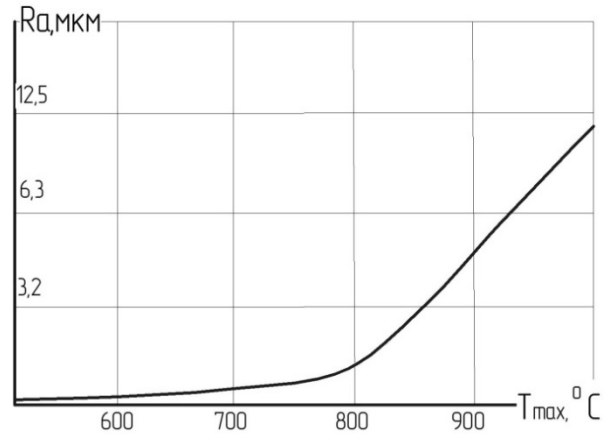


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности образцов (ЖС6КП) от максимальной температуры термоциклов. ( $50 \leftrightarrow 1000$ )

На режимах  $50 \leftrightarrow 920^{\circ}\text{C}$  и  $50 \leftrightarrow 1000^{\circ}\text{C}$  резкое повышение шероховатости объясняется более усиленным окислением поверхности, появлением большого количества трещин, короблением и выкрашиванием зерен, отслаиванием окисной пленки.

Анализ результатов исследования по кинетике повреждения стали в процессе термоусталости показал, что в начальной стадии испытания на всех режимах поверхность образцов покрывается окисной пленкой, далее появляются поперечные трещины, а затем продольные. Так при термоциклировании по режиму  $50 \leftrightarrow 700^{\circ}\text{C}$  уже к 100 циклам наблюдается начало окисления поверхности образцов. Полированные образцы имеют равномерную тонкую окисную пленку.

На шлифованных и точенных образцах происходит более интенсивное окисление по следам от обработки. С увеличением числа циклов на поверхности всех образцов начинают появляться поперечные трещинки. При этом у полированных образцов они достигают длины 0,2-0,3 мм к 750 циклам, у шлифованных к 500 циклам, а у точенных к 400. Зарождение и развитие поперечных трещин на шлифованных и точенных образцах происходит по рискам от обработки. На точенных и шлифованных образцах поперечные трещины имеют отклонения к продольному направлению и при меньшем числе циклов, чем у полированных, но эти трещины опять же идут по рискам от обработки. На шлифованных образцах трещины более плотно расположены друг к другу, что объясняется более плотным количеством рисок от обработки. При 2000 циклах на полированном образце выравнивается количество и величина продольных и поперечных трещин, которые начинают формировать сетку. На шлифованных образцах несколько заметнее преобладание поперечных трещин, но имеются трещины, которые по

направлению занимают промежуточное положение. На точенных образцах явно преобладают поперечные трещины (рис.5,а).

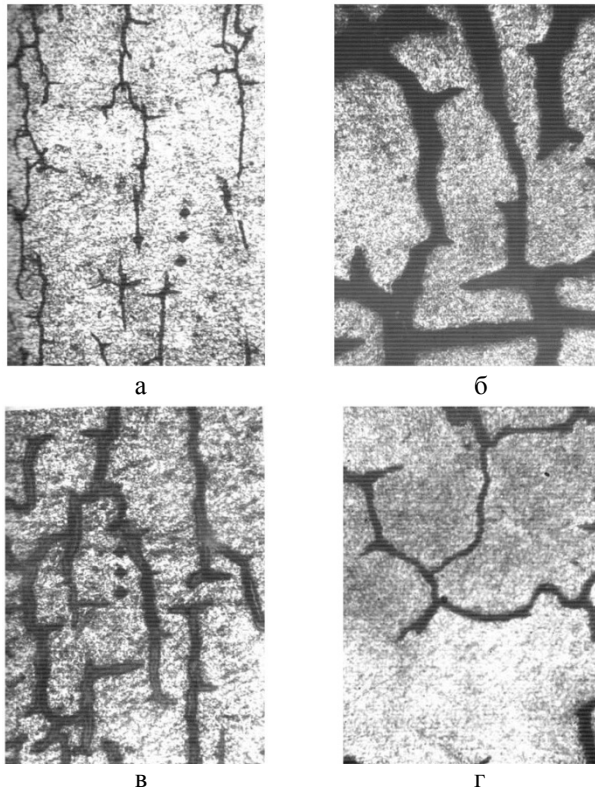


Рис. 5. Термоусталостные трещины на поверхности образцов:

- а – точеные образцы, 50 ↔ 700<sup>0</sup>С, 2000 циклов;
- б – точеные образцы, 50 ↔ 700<sup>0</sup>С, 3000 циклов;
- в – шлифованные образцы, 50 ↔ 700<sup>0</sup>С, 3000 циклов;
- г – полированные образцы, 50 ↔ 700<sup>0</sup>С, 3000 циклов

К 3000 циклов на всех образцах появляется сетка трещин. При этом на точенных образцах наблюдаются крупные трещины по следам обработки и длинные продольные трещины (рис.5,б), а шлифованные образцы по-прежнему сохранили более плотное расположение поперечных трещин (рис.5в). На полированных образцах заметна крупная сетка менее развитых трещин (рис.5,г), причем трещины не имеют такой строгой продольно-поперечной направленности, как на шлифованных и тем более точенных образцах.

Графическая зависимость наибольшей трещины от максимальной температуры термоцикла и от количества циклов (рис.6 а,б) показывает, что риски на поверхности образца не только ускоряют процесс зарождения трещины, но в значительной степени ускоряют ее развитие. На глубину развития трещин большое влияние оказывает величина наклепанного слоя у шлифованных и тем более точенных образцов.

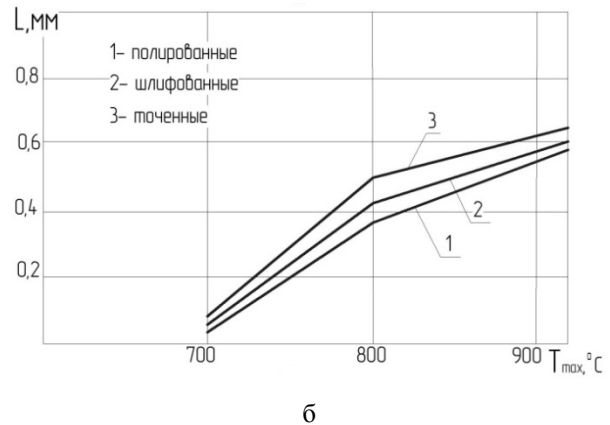
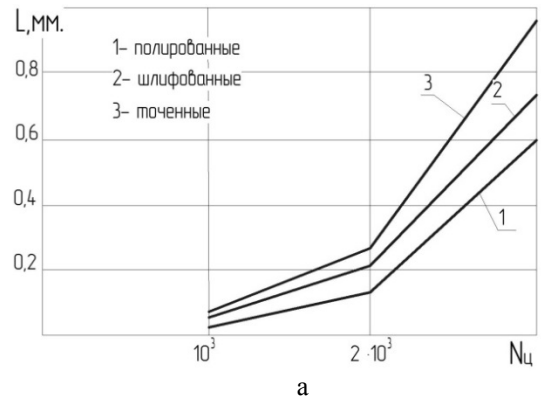


Рис. 6. Глубина максимальных термоусталостных трещин:

- 1 – полирование, 2 – шлифование, 3 – точение

При пониженных температурах поверхностей наклеп и остаточные напряжения сжатия повышают выносливость деталей. При нормальных температурах поверхностей применение поверхностного пластического деформирования с предшествующей лезвийной обработкой позволяет обеспечить повышение износостойкости и выносливости исходной поверхности детали в 2-3 раза. Но с повышением температуры и времени наработки положительное влияние наклепа уменьшается, так как диффузионные процессы, протекающие интенсивно в наклепанном слое, способствуют ускоренному развитию трещин. Существует температурный порог положительного влияния наклепа на долговечность деталей, а величина температурного порога зависит от характеристик наклепа, материала и величины нагрузки.

Результаты исследования по влиянию наклепа на термоусталость материалов у разных авторов противоречивы. Результаты многих работ [6 – 8] показывают отрицательное влияние наклепа на повреждаемость материала при теплосменах, которое проявляется как в более быстром зарождении и развитии трещин, так и в более быстром снижении других прочностных характеристик после предварительного термоциклирования.

Объяснить различное влияние наклепа на сопротивление термической усталости частично можно следующим образом. Наклепанный материал, повышая свои прочностные характеристики и снижая пластичность, изменяет сопротивление тепломенам согласно известным уравнениям термоциклической долговечности:

$$N^2 \left( \Delta \varepsilon - \frac{2\sigma_T}{E} \right) = \frac{\delta}{2} \quad (2)$$

или

$$N = \left( \frac{C}{\Delta \varepsilon_{пл}} \right)^{\frac{1}{c}}, \quad (3)$$

где  $N$  - число циклов до разрушения;

$\Delta \varepsilon$  - полная величина стесненной деформации;

$\Delta \varepsilon_{пл}$  - полная стесненная деформация за цикл;

$\sigma_T$  - предел текучести;

$\delta$  - относительное удлинение;

$C$  и  $c$  - коэффициенты определяете экспериментально.

Если материал деформируется в упругой области, в чем ему способствует наклеп повышением предела текучести, то и долговечность повышается, если в упруго-пластической, то наклеп, снижая пластические свойства, уменьшает долговечность. Это особенно эффективно проявляется в результате снижения длительной пластичности наклепанного материала при выдержке в термо-напряженном состоянии на верхней температуре термоцикла [6]. Исходя из этого можно сделать вывод, что использовать накатывание поверхности как технологический метод улучшения качества и прочности поверхностного слоя для деталей, работающих в условиях термомеханического нагружения нецелесообразно.

Последнее время наметилась тенденция выбора таких методов отделочных операций деталей, работающих при высоких температурах, которые бы давали поверхностный слой без наклепа и остаточных напряжений.

Одним из эффективных средств повышения долговечности деталей, работающих в условиях газовой среды, являются защитные поверхностные покрытия: плазменные, теплостойкие, эмалевые, керамические и диффузионные.

Второй вид технологических способов, благодаря которому материал детали упрочняется по всему объему равномерно, может быть выражен величиной, характеризующей общую энергоемкость металла, которая представляет собою сумму величин поглощенной энергии рабочим объемом, принимавшим участие в пластическом деформировании и разрушении, суммарной предельной энергии искажения кристаллической решетки минимального

объема и суммарной предельной энергии разрушения. Таким образом, прочность материала можно повысить двумя путями: увеличением межатомных связей в кристаллической решетке и созданием такой структуры и качества поверхности, которая бы равномерно по всему объему поглощала энергию разрушения.

## Заключение

Исследования влияния параметров состояния поверхностного слоя на усталостную прочность показали, что одним из резервов повышения усталостной прочности деталей является совершенствование параметров именно поверхностного слоя деталей. Для высоконагруженных деталей необходимо, помимо величины шероховатости поверхности, также учитывать влияние на усталостную прочность направления неровностей: наименьшим оно будет при совпадении расположения неровностей с направлением действия сил или моментов, наибольшее — при перпендикулярном направлении неровностей.

## Литература

1. Влияние состояния поверхности и контактного взаимодействия поверхности [Текст] / В.Т. Троценко, Г.В. Цыбанев, Б.А. Грязнов, Ю.С. Налимов. – Киев: ИПП, 2009. – 664 с.
2. Кравчук, В.С. Сопротивление деформированию и разрушению поверхностно-упрочненных деталей машин и элементов конструкций [Текст] / В.С. Кравчук, Абу Айаши Юсеф, А.В. Кравчук. – Одесса: «Астропринт», 2000. – 160 с.
3. Дальский, А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин [Текст] / А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 1975. – 222 с.
4. Иноземцев, А.А. Динамика и прочность авиационных двигателей и энергетических установок [Текст] / А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий. – М.: Машиностроение, 2008. – 204 с.
5. Дубровський, С.С. Локалізація критичних зон пошкодження роторних деталей газотурбінних двигунів [Текст] / С.С. Дубровський // Вісник Національного авіаційного університету. – 2009. – № 3. – С. 6–10.
6. Дульнев, Р.А. Термическая усталость металлов [Текст] / Р.А. Дульнев, П.И. Котов. – М.: Машиностроение, 1980. – 200 с.
7. Материаловедение и технология конструкционных материалов [Текст] / В.С. Кушнер, А.С. Верецака, А.Г. Схиртладзе, В.А. Горелов, Д.А. Незров, О.Ю. Бургонова; под ред. В.С. Кушнера. – Омск: Издательство ОмГТУ, 2009. – 520 с.

8. *Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок [Текст]: пер. с англ. / под ред. Симса Ч.Т., Столоффа Н.С., Хагеля У.К.: В 2-х книгах. Кн. 1 / под ред. Шалина Р.Е. – М.: Металлургия, 1995. – 384 с.*

*Поступила в редакцию 16.07.2013, рассмотрена на редколлегии 25.09.2013*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. Технологии машиностроения Н.В. Кияновский, Криворожский национальный университет, г. Кривой Рог.

### **ВПЛИВ СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА МІЦНІСНІ ХРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛЕЙ**

*С.С. Дубровський, О.Ю. Кривенко, М.О. Ковешніков*

Проведено комплексне дослідження впливу структурно-технологічних факторів на характеристики міцності деталей проточної частини авіаційних ГТД. Встановлено, що шорстка поверхня знижує довговічність деталей за рахунок концентрації напруги в районі мікронадривів із-за інтенсивнішого процесу окислення, при цьому більш чутливі високолеговані, жароміцні сталі і сплави. Визначено, що важливу роль грає не лише величина шорсткості, але і її спектр. Запропоновано виразити залежність міцності від шорсткості через коефіцієнт впливу якості поверхні на міцність. Проаналізовано вплив мікроконцентраторів поверхневого шару деталей на довговічність при термоциклічному навантаженні. Приведено результати досліджень кінетики ушкодження сталі в процесі термічної втоми на зразках, отриманих різними методами фінішної обробки. Встановлено, що зародження і розвиток поперечних тріщин на шліфованих і точених зразках відбувається по ризках від обробки. Істотний вплив на втомну міцність здійснюють напрями нерівностей.

**Ключові слова:** втома, шорсткість, наклеп, остаточні напруження, довговічність деталей, концентрація напружень, мікронадрив.

### **INFLUENCE OF STRUCTURALLY-ADJUSTING FACTORS ON DURABILITY CHARACTERISTIC OF DETAILS**

*S.S. Dubrovskiy, A.Yu. Krivenko, N.A. Koveshnikov*

Complex research of influence of structural and technological factors is conducted on strength descriptions of details of running part of aviation GTE. It is set that a rough surface reduces longevity of details due to the concentration of tensions in the district of microtear from more intensive process of oxidization, high-alloyed is more sensible here, heatproof alloys became. It is certain that a not insignificant role is played by not only the size of roughness but also her spectrum. It is suggested to express dependence of durability on a roughness through the coefficient of influence of quality of surface on durability. Influence is analysed micro concentrators of superficial layer of details on longevity at a thermal-cycle lading. Results over of researches of kinetics of damage are brought became in the process of thermal fatigue on standards got the different methods of finish treatment. It is set that an origin and development of transversal cracks on the polished and sharpened standards take place on traces from treatment. Substantial influence on tireless durability renders directions of burries.

**Key words:** fatigue, roughness, peening, remaining tensions, longevity of details, concentration of tensions, mikrotear.

**Дубровський Сергей Станиславович** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения ДВНЗ «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог, Украина, e-mail: Sergei.Dubrovski@mail.ru

**Кривенко Алексей Юревич** – канд. техн. наук, доцент кафедры Теплоэнергетика ДВНЗ «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог, Украина.

**Ковешников Николай Алексеевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры авиационных двигателей механико-энергетического факультета, Аэрокосмический институт, Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина.