

Оценка долговечности лопаток рабочего колеса турбины ТНА при наличии дефектов, вызванных особенностями изготовления

Иванов А.В., Рудис М.А.

АО «НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко», г. Химки
e-mail: iav308@inbox.ru

Рассмотрены вопросы, связанные с оценкой циклической долговечности рабочих лопаток колеса турбины турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя при наличии на лопатках следующих дефектов: поверхностного дефектного слоя, формирующегося в процессе изготовления лопаток турбин с применением электроэрозионной обработки, и дефектов типа несплавления, полученных при изготовлении с применением аддитивных технологий.

Ключевые слова: рабочее колесо турбины, блиск, лопатка, дефект, число циклов, напряжение, трещина.

Durability assessment of turbopump turbine wheel blades with manufacturing feature defects

Ivanov A.V., Rudis M.A.

JSC «NPO Energomash named after academician V.P. Glushko», Khimki

The article discusses issues related to assessment of cyclic life of turbine rotor blades of a liquid rocket engine's turbopump, considering following defects of blades: a defective surface layer, which is formed during manufacturing of turbine blades by electrical discharge machining, and lack-of-fusion defects formed during manufacturing using additive technologies.

Keywords: turbine wheel, blisk, blade, defect, number of cycles, stress, crack.

Введение

Одним из перспективных направлений развития ракетно-космической техники является многократное применение первых ступеней ракет-носителей или многократное включение в полете двигателей верхних ступеней и разгонных блоков. При этом на узел турбины – один из основных элементов конструкции турбонасосного агрегата (ТНА), определяющий параметры и работо-



Рис. 1. Ротор ТНА с РК турбины типа блиск

способность жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) [1], – действуют высокие переменные нагрузки: давление, частота вращения, температура. Рабочие колеса (РК) турбин ТНА ЖРД, как правило, изготавливают в виде монолитного элемента типа блиск (рис. 1), состоящего из диска и лопаток [2].

В процессе производства и эксплуатации РК на их поверхности, а также в основном материале возможно возникновение дефектов, вызванных особенностями технологического процесса и условиями эксплуатации:

- хрупкий поверхностный слой при изготовлении с применением электроэрозионной обработки;
- повреждение поверхности при сборке и эксплуатации (например, посторонними частицами);
- дефекты литья по выплавляемым моделям (неслитины, раковины, плены и т.п.);
- дефекты, вызванные применением аддитивных технологий (несплавление гранул, раковины).

Постановка задачи, метод и результаты исследования

Наиболее широко применяемым в настоящее время технологическим процессом изготовления лопаток РК турбины является электроэрозионная обработка (ЭЭО), а перспективным методом изготовления РК – аддитивные технологии [3]. Эти способы изготовления рассмотрены ниже с точки зрения влияния на ресурс РК. **Электроэрозионная обработка.** Структура и состав поверхностного слоя, образовавшегося в процессе ЭЭО, обусловлены мощным тепловым воздействием электрического разряда, химическим воздействием плазмы разряда и рабочей жидкости, в которой производится обработка. В результате теплового воздействия поверхность оплавляется, и в поверхностном слое возникают структурные изменения и растягивающие остаточные напряжения с максимумом на поверхности детали. Возможно насыщение поверхностного слоя компонентами, входящими в состав материала инструмента, а также содержащимися в рабочей жидкости [4]. Микротвердость поверхностного слоя металла возрастает. Глубина слоя (иногда называемого белым или дефектным) зависит от теплофизических свойств обрабатываемого металла, шероховатости поверхности и режима обработки [5]. Физико-механические и структурно-фазовые свойства такого измененного тонкого поверхностного слоя обусловлены химическим и механическим взаимодействием материалов заготовки, электрода-инструмента и рабочей среды.

Микрогеометрия поверхности определяется формой и размерами лунок, образованных единичными разрядами и их перекрытием [5]. Радиус R_{\max} и глубина лунки зависят от энергии импульса

$$R_{\max} = C_R W_{\text{и}}^{b_1},$$

где C_R – коэффициент, определяемый материалом заготовки, для жаропрочных никелевых сплавов $C_R \approx 100$; $W_{\text{и}}$ – энергия импульса; b_1 – коэффициент, учитывающий форму лунок, для жаропрочных никелевых сплавов $b_1 = 0,37 \dots 0,4$.

Толщина дефектного слоя возрастает с увеличением энергии и длительности импульсов [6]:

$$h = C_H W_{\text{и}}^{b_2} = C_H \left(\frac{U_{\text{пр.ср}} I_{\text{пр.ср}}}{f_{\text{и}}} \right)^{b_2},$$

где C_H – эмпирический коэффициент, определяемый материалом заготовки, для жаропрочных никелевых сплавов $C_H = 0,04 \dots 0,06$; b_2 – эмпирический коэффициент, для жаропрочных никелевых сплавов $b_2 \approx 0,39$; $U_{\text{пр.ср}}$ – среднее напряжение пробоя; $I_{\text{пр.ср}}$ – среднее значение силы тока пробоя; $f_{\text{и}} = 1/T_{\text{и}}$ – частота следования импульсов; $T_{\text{и}}$ – период повторения импульсов.

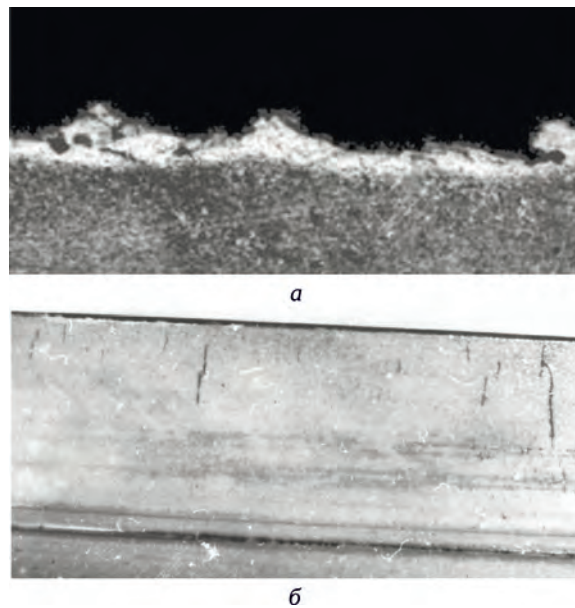


Рис. 2. Дефектный слой после проведения ЭЭО: а – на стали [7]; б – на поверхности лопатки [8]

Структура поверхностного слоя лопатки после ЭЭО показана на рис. 2.

После проведения ЭЭО дефектный слой, как правило, удаляют механическим или электрохимическим способом. Однако на отдельных участках поверхности полностью удалить его не удастся. Металлографический анализ показывает, что глубина такого слоя на данных участках поверхности лопатки в зависимости от режима ЭЭО и способа его удаления составляет $0,02 \dots 0,05$ мм, причем значение $0,05$ мм следует рассматривать как максимальное.

Материал поверхностного слоя достаточно хрупок, обладает незначительной пластичностью и склонен к образованию микротрещин при сравнительно малых нагрузках.

Аддитивные технологии изготовления РК из различных материалов и сплавов, основанные на методе послойного синтеза заготовок, – одно из наиболее динамично развивающихся направлений «цифрового» производства. Для изготовления РК турбины чаще всего применяют технологию сплавления порошкового материала лазерным излучением. Особенности технологии: разброс размеров гранул порошкового материала, разброс температуры поверхностей разных элементов заготовки, расфокусировка лазера и др. – обуславливают появление в структуре основного материала дефектов типа несплавления гранул (рис. 3). Для анализа влияния дефектов, возникающих при изготовлении заготовок с применением аддитивных технологий, может использоваться та же модель долговечности, что и для учета влияния поверхностного слоя.

Метод исследования. Массив металла имеет поверхностный (дефектный) хрупкий слой (рис. 4,а) толщи-

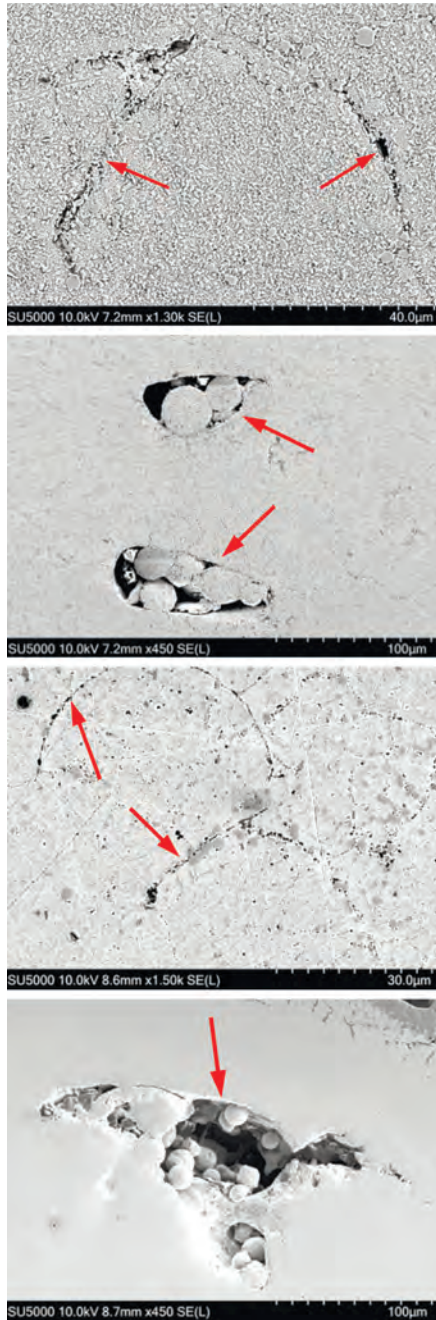


Рис. 3. Электронное изображение структуры лопатки из никелевого сплава [9] (стрелками показаны раковины с несплавленными гранулами)

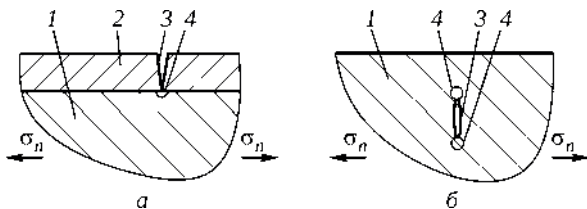


Рис. 4. Схема лопатки с дефектным слоем:
 а – дефект в поверхностном слое после ЭЗО;
 б – дефект основного материала после сплавления;
 1 – основной массив металла; 2 – дефектный слой;
 3 – трещина; 4 – пластическая область

ной h_0 или дефект сплавления материала (рис. 4,б). Напряжение, действующее в детали, составляет σ_n . Механические свойства массива металла выше, чем хрупкого материала поверхностного (дефектного) слоя, поэтому трещина образуется в поверхностном слое при первом нагружении напряжением σ_n . В этом случае пластическую область следует рассматривать как зону начала образования трещины в основном материале. При применении аддитивных технологий роль трещины играет дефект сплавления материала.

Поскольку пластические свойства материала слоя низки, предполагаем, что при первом нагружении образуется трещина, глубина которой равна толщине слоя (h_0), а протяженность трещины $s \gg h_0$.

Принято, что в хрупких материалах радиус закругления основания трещины составляет $r_0 \approx 0,01$ мм [10]. Теоретический коэффициент концентрации напряжений в зоне трещины [10]

$$\alpha_{\sigma_1} = 1 + 2 \sqrt{\frac{h_0}{r_0}} \quad (1)$$

При такой концентрации упругое напряжение в основании трещины составляет (здесь и далее индекс «к» означает, что параметр относится к зоне концентрации напряжений)

$$\sigma_{\max k} = \alpha_{\sigma_1} \sigma_n \quad (2)$$

Для дальнейших расчетов используются следующие параметры материала РК турбины (применена степенная аппроксимация кривой деформирования):

$$-\sigma_i = \sigma_y \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_y} \right)^m;$$

$$-\sigma_y = \left[\frac{\sigma_{0,2}}{(2 \cdot 10^{-3} E + \sigma_{0,2})^m} \right]^{\frac{1}{1-m}} \text{ – предел упругости}$$

(предел пропорциональности) [10];

– $\varepsilon_y = \sigma_y / E$ – деформация, соответствующая пределу упругости (пределу пропорциональности);

– характеристика упрочнения материала (m);

– вязкость разрушения (K_{1c} , МПа·м^{0,5}).

Трещина, являясь источником концентрации напряжений, приводит к образованию упругопластических деформаций в зоне ее основания. Относительная упругопластическая деформация с учетом (2) может быть определена при помощи зависимости [11]

$$\bar{\varepsilon}_{\max k} = \left(\frac{\sigma_{\max k}}{\sigma_y} \right)^{\frac{2}{m+1}} = \left(\frac{\alpha_{\sigma_1} \sigma_n}{\sigma_y} \right)^{\frac{2}{m+1}} \quad (3)$$

Величина деформации при $\varepsilon_y = \sigma_y / E$ составляет

$$\varepsilon_{\max k} = \bar{\varepsilon}_{\max k} \varepsilon_y$$

Протяженность пластической зоны [10]

$$x_T = r_0 \left(\sqrt{\bar{\varepsilon}_{\max k}} - 1 \right).$$

Как правило, соотношение $x_T/h_0 \ll 1,0$, поэтому размером пластической зоны можно пренебречь по сравнению с начальной длиной трещины, равной толщине дефектного слоя $h_0 = 0,05$ мм или размеру дефекта, вызванного несплавлением гранул, примерно $0,03 \dots 0,15$ мм.

Максимальное значение первого главного упруго-пластического напряжения в пластической зоне определено по зависимости, приведенной в [10]:

$$\sigma_{1\max} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_y \left[1 + \frac{1}{2m} \left(\bar{\varepsilon}_{\max k}^m - 1 \right) \right]. \quad (4)$$

В дальнейшем при оценке долговечности используется значение $\sigma_{1\max}$, так как обычно оно превышает значение напряжения $\sigma_{\max k}$.

Сначала определим критическую глубину развивающейся трещины. Из соотношения для интенсивности напряжений [10]:

$$K_I = \frac{1,12\sigma_{1\max k}}{1-l/b_n} \sqrt{\pi l/b_n} \sqrt{b_n} = K_{Ic}, \quad (5)$$

где b_n – толщина лопатки в рассматриваемом сечении; l – длина трещины, находим

$$\frac{l_{кр}/b_n}{(1-l_{кр}/b_n)^2} = \frac{K_{Ic}^2}{1,12^2 \pi \sigma_{1\max k}^2 b_n}. \quad (6)$$

Зная все входящие в правую часть уравнения (6) величины, найдем $l_{кр}/b_n$, откуда, зная толщину лопатки в рассматриваемом сечении, определим критическую длину трещины ($l_{кр}$).

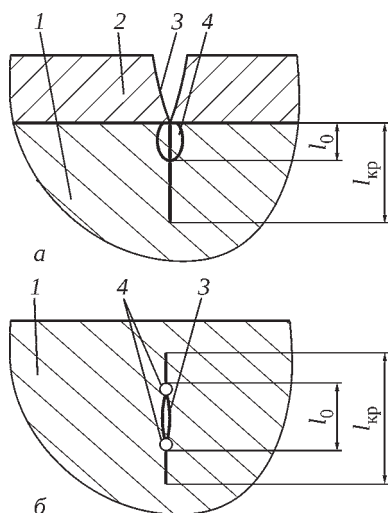


Рис. 5. Схема образования трещины в основном материале: а – дефект в поверхностном слое; б – дефект основного материала; 1 – основной массив металла; 2 – дефектный слой; 3 – трещина; 4 – пластическая область; l_0 – протяженность трещины в пластической зоне; $l_{кр}$ – критическая длина трещины

Предположим, что в массиве металла лопатки образовалась трещина, размер которой равен начальному размеру пластической зоны (рис. 5). Долговечность лопатки определяется расстоянием $\Delta l = l_{кр} - l_0$, которое должна пройти трещина при своем развитии. Число циклов до разрушения определяется по следующей зависимости [10]:

$$N_c = \frac{4\pi \bar{\varepsilon}_f^2}{(\bar{\sigma}_k \sqrt{\pi})^{\gamma_0} (\gamma_0 - 2) l_0^{(\gamma_0 - 2)/2}} \left[1 - \left(\frac{l_0}{l_{кр}} \right)^{(\gamma_0 - 2)/2} \right], \quad (7)$$

где $\bar{\sigma}_k = \bar{\varepsilon}_{\max k}^{(1-m)/(2(1+m))} 0,44 \bar{\sigma}_{1k}(0) + 0,68 \bar{\sigma}_{1k}(l_0)$ – приведенное относительное напряжение, определенное в соответствии с [10]; $\bar{\sigma}_{1k}(0)$ – приведенное первое главное напряжение в зоне концентрации при нулевой длине трещины; $\bar{\sigma}_{1k}(l_0)$ – приведенное первое главное напряжение в зоне концентрации при длине трещины l_0 ; $P_0 = [2 - 0,5(1 - m)(1 - \bar{\sigma}_k)] / (1 + m)$; $m_0 = 0,36 + 0,002\sigma_B$; $\gamma_0 = P_0 / m_0$.

Под циклом в рассматриваемом случае понимаем: для двигателя с однократным включением в полете – цикл полетного использования; для двигателя с многократным включением в полете – цикл одного включения.

Значение относительной разрушающей деформации $\bar{\varepsilon}_f = \varepsilon_f / \varepsilon_y$, где $\varepsilon_y = \sigma_y / E$, а также:

– для плоской деформации [10]

$$\varepsilon_f^{пл} \approx \frac{0,84\varepsilon_k}{1,8 + 0,54} = 0,359\varepsilon_k;$$

– для плоского напряженного состояния [10]

$$\varepsilon_f^{пл} \approx \frac{0,84\varepsilon_k}{1,8} = 0,467\varepsilon_k.$$

На основании полученных зависимостей можно определить минимальное число циклов до разрушения. Результаты дают нижнюю оценку по числу циклов от образования трещин и до разрушения, если рассматривать плоскую деформацию в зоне трещины. В случае плоского напряженного состояния в связи с увеличением $\bar{\varepsilon}_f$ число циклов может возрасти примерно в 1,7 раза, однако расчетные оценки должны основываться на минимальных параметрах долговечности.

Результаты исследования. На основании полученных зависимостей и предположений проведен расчет числа циклов до разрушения РК по данным [12].

При анализе лопатки РК турбины методом конечных элементов напряжение в зоне возможного наличия остатков дефектного слоя – на корыте лопаток – составляет ~ 147 МПа.

Вместо исходного материала РК – никелевого сплава ХН59МВТКЮЛ – рассмотрены два варианта материала: сплав ХН43БМТЮ-ВД и сплав типа Inconel 718. С учетом того, что температура рабочего тела на входе

в РК составляет $\sim 400^{\circ}\text{C}$, а свойства рассматриваемых сплавов мало отличаются в диапазоне температуры $20\dots 500^{\circ}\text{C}$, для оценочных расчетов используем их свойства при температуре 20°C .

1. *Никелевый сплав ХН43БМТЮ-ВД*. Свойства сплава [13]:

- предел прочности $\sigma_b \geq 1127$ МПа;
- условный предел текучести $\sigma_{0,2} \geq 735$ МПа;
- относительное удлинение $\delta \geq 13\%$.

Принято, что лопатки РК турбины изготовлены с применением ЭЭО и после удаления дефектного слоя на их поверхности остались незначительные его участки толщиной до $0,05$ мм. Наличие дефектного слоя – причина зарождения трещины в зоне кромки лопатки со стороны корыта.

2. *Никелевый сплав тина Inconel 718*. РК изготовлено из гранул размером $0,03\dots 0,08$ мм с применением аддитивных технологий, минимальные механические свойства при вертикальном направлении выращивания составят [14]:

- предел прочности $\sigma_b \geq 1120$ МПа;
- условный предел текучести $\sigma_{0,2} \geq 920$ МПа;
- относительное удлинение $\delta \geq 7,2\%$;
- относительное сужение $\psi \geq 6,8\%$.

Часть элементов в процессе изготовления с применением аддитивных технологий синтезируется не вертикально, а под углом, в связи с чем свойства материала снижаются [3]. В зависимости от угла падения свойств может составить $20\dots 40\%$. При расчете числа циклов предполагаем, что в теле лопатки имеется дефект, вызванный локальным несплавлением гранул.

В результате расчетов для каждого рассмотренного варианта получено минимальное число циклов до разрушения. Результаты расчетного анализа представлены на рис. 6 – рис. 8 в виде зависимости относительной длины трещины – отношения текущей длины трещины к ее критическому значению ($l/l_{кр}$) – от относительного числа циклов – отношения текущего числа циклов к максимальному из полученного числа циклов до разрушения (N/N_{max}) для каждого расчетного случая.

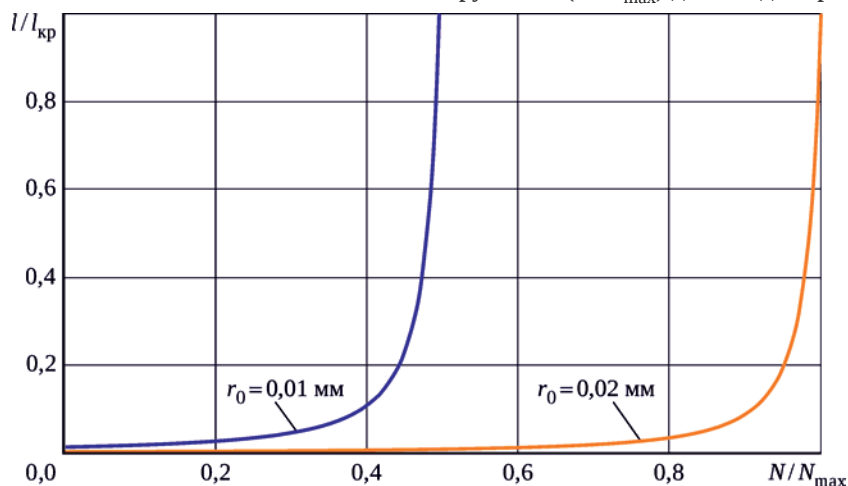


Рис. 6. Зависимость относительной длины трещины от относительного числа циклов при наличии дефектного поверхностного слоя

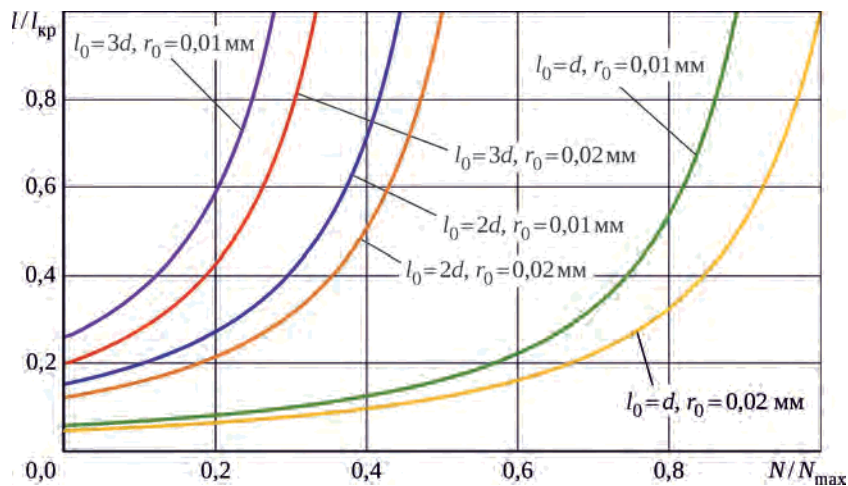


Рис. 7. Зависимость относительной длины трещины от относительного числа циклов при наличии дефекта, вызванного несплавлением гранул при изготовлении

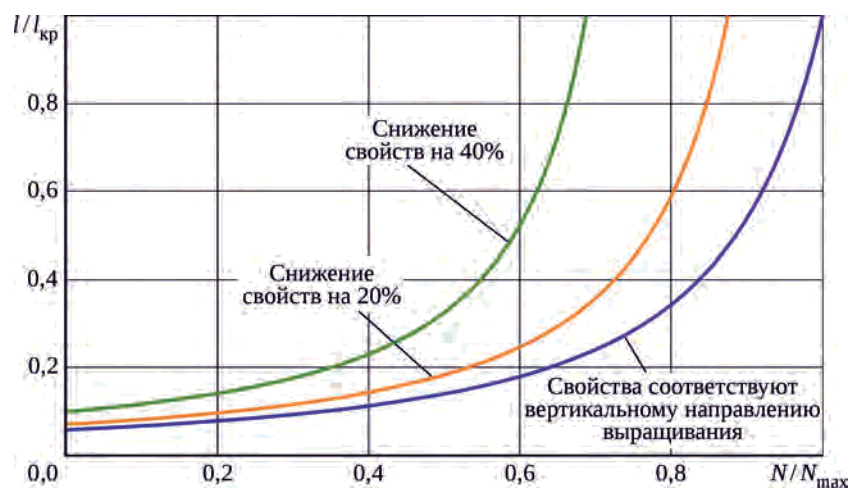


Рис. 8. Зависимость относительной длины трещины от относительного числа циклов при наличии дефекта и снижении механических свойств, $l_0 = d$, $r_0 = 0,01$ мм

В случае изготовления лопаток РК с применением ЭЭО сравнение проведено для двух вариантов радиуса у вершины трещины (r_0) – 0,01 и 0,02 мм.

Расчеты по приведенной выше методике показали, что максимальное число циклов до разрушения у трещины с $r_0 = 0,02$ мм примерно в два раза больше, чем у трещины с $r_0 = 0,01$ мм (рис. 6). До достижения 80% максимального числа циклов до разрушения рост трещины незначителен и не приводит к разрушению РК, дальнейшее увеличение числа циклов вызывает интенсивный рост трещины, приводя в итоге к разрушению лопатки.

При анализе случая изготовления с применением аддитивных технологий рассмотрены следующие варианты размера дефекта при выращивании детали (рис. 7): первоначальная протяженность дефекта (l_0) составляет один, два и три минимальных размера гранулы исходного материала (d), минимальный радиус в зоне несплавления гранул $r_0 = 0,01$ и 0,02 мм.

На рис. 7 видно качественное отличие результатов: рост размера трещины/дефекта начинается практически с первого нагружения, особенно ярко это проявляется для дефектов с большей первоначальной протяженностью. Чем больше первоначальный размер дефекта, тем больше влияет величина радиуса у его вершины на максимальное число циклов до разрушения: при изменении радиуса у вершины с 0,01 до 0,02 мм для детали с первоначальной длиной дефекта $1d$ оно увеличивается на ~10%, для $2d$ – на ~12%, для $3d$ – на ~20%. При количественном анализе влияния первоначальной протяженности дефекта на число циклов установлено, что максимальное число циклов для лопатки РК турбины с первоначальным дефектом длиной $1d$ примерно в 3 раза больше, чем для лопатки такого же колеса с первоначальным дефектом длиной $3d$.

В связи с тем, что для деталей, изготовленных с применением аддитивных технологий, характерно

снижение механических свойств в зависимости от направления синтеза элемента детали, был проведен анализ влияния снижения механических свойств на максимальное число циклов до разрушения (рис. 8). Во всех трех вариантах первоначальный размер дефекта был равен минимальному размеру гранулы, минимальный радиус в зоне несплавления гранул $r_0 = 0,01$ мм. Отличия между рассмотренными вариантами:

- механические свойства соответствуют вертикальному направлению выращивания;
- снижение механических свойств по сравнению с вертикальным направлением выращивания составляет 20%;
- снижение механических свойств составляет 40%.

Количественная оценка, проведенная для одинаковой конструкции с одинаковыми условиями нагружения, показала, что уменьшение максимального числа циклов при снижении механических свойств составляет до 30%, при этом общая качественная картина роста трещины от цикла к циклу остается аналогичной независимо от начального уровня механических свойств.

Предложенная методика позволяет выполнять оценку минимального числа циклов до разрушения при наличии разного вида дефектов, связанных с особенностями изготовления деталей турбомашин.

Заключение

Выполненная оценка влияния дефектов, обусловленных технологическими процессами, на циклическую долговечность рабочего колеса турбокомпрессорных агрегатов ЖРД носит достаточно консервативный характер и дает минимально возможное для заданных условий число циклов. Предложенный метод может применяться для оценки ресурса не только рабочих колес турбин, но и сопловых аппаратов и других деталей, подвергаемых циклическому нагружению.

Литература

1. Иванов А.В., Белоусов А.И., Дмитренко А.И. Турбонасосные агрегаты кислородно-водородных ЖРД / Воронеж. гос. техн. ун-т. Воронеж: ВГТУ, 2011. 283 с.
2. Unified Low-Risk Single-Shaft Turbopump for Cryogenic Expander-Cycle Rocket Engines / S.A. Bouley, R.C. Grabowski, V.S. Rachuk, A.I. Dmitrenko and A.V. Ivanov. 2010. 14 p. (46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit; AIAA 2010-7130).
3. Перспективы применения аддитивных технологий для создания деталей и узлов авиационных ГТД и ПВРД / Л.А. Магеррамова, Ю.А. Ножницкий, С.А. Волков и др. // Вестн. Самар. ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 3. С. 81–98.
4. Материаловедение и технология металлов: допущено ... в качестве учеб. для студентов вузов, обучающихся по машиностроит. специальностям / Фетисов Г.П., Карпман М.Г., Матюнин В.М. и др. М.: Высшая школа, 2001. 639 с.
5. Елисеев Ю.С., Саушкин Б.П. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / под ред. Б.П. Саушкина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 437 с.
6. Технология производства жидкостных ракетных двигателей: допущено ... в качестве учеб. для студентов вузов, обучающихся по направлению «Двигатели летательных аппаратов» специальности «Ракетные двигатели» / В.А. Моисеев, В.А. Тарасов, В.А. Колмыков, А.С. Филимонов; под ред. В.А. Моисеева и В.А. Тарасова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 381 с. (Технологии ракетно-космического машиностроения).
7. Панов Д.О., Абляз Т.Р., Абросимова А.А. Металлографический анализ поверхности стали 65Г после электроэрозионной обработки // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=10218>. Дата публикации: 2013-10-01.
8. Коденцев С.Н., Ростиславин А.Б., Сухочев Г.А. Технологическое обеспечение эксплуатационных показателей агрегатов перспективных двигателей // Научно-технический юбилейный сборник, 1941–2011: посвящается 70-летию образования Конструкторского бюро химвавтоматики: в 3 т. / КБХА; глав. ред.: В.С. Рачук. Воронеж: Кварта, 2012. Т. 3. С. 22–29.
9. Исследование стойкости к возгоранию в среде окислительного генераторного газа образцов лопаток рабочего колеса и статора турбины, изготовленных с использованием технологии селективного лазерного сплавления / Белов Е.А., Иванов А.В., Иванов Н.Г. и др. // Труды НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко. 2018. № 35. С. 121–138.
10. Прочность и ресурс ЖРД / Н.А. Махутов, В.С. Рачук, М.М. Гаденин и др.; под ред. Н.А. Махутова и В.С. Рачука; Рос. акад. наук, Ин-т машиностроения им. А.А. Благовраова. М.: Наука, 2011. 525 с. (Исследования напряжений и прочности ракетных двигателей).
11. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.
12. Исследование долговечности лопаток турбины модельной паротурбинной установки / М.А. Рудис, В.Я. Свистов, А.В. Иванов, А.В. Колтаков // Вестник ВГТУ. 2008. Т. 4, № 11. С. 53–59.
13. Ткачев В.И., Холодный В.И., Левина И.Н. Работоспособность сталей и сплавов в среде водорода. Львов: Вертикаль, 1999. 256 с.
14. EOS: Industrial 3D Printing: Success Stories: Products and Services: Innovations: site / EOS GmbH. URL: <https://www.eos.info/en> (дата обращения: 2020-03-27).

References

1. Ivanov A.V., Belousov A.I., Dmitrenko A.I. Turbonasosnye agregaty kislородno-vodorodnykh ZhRD [Oxygen-Hydrogen LRE Turbopumps] / Voronezh State Technical University. Voronezh: VSTU, 2011. 283 p.
2. Unified Low-Risk Single-Shaft Turbopump for Cryogenic Expander-Cycle Rocket Engines / S.A. Bouley, R.C. Grabowski, V.S. Rachuk, A.I. Dmitrenko and A.V. Ivanov. 2010. 14 p. (46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit; AIAA 2010-7130).
3. Perspektivy primeneniya additivnykh tekhnologii dlya sozdaniya detalei i uzlov aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei i pryamotochnnykh vozduшно-reaktivnykh dvigatelei [Prospects of Application of Additive Technologies to Develop Parts and Components of Gas Turbine Engines and Ramjet Engines] / L.A. Magerramova, Yu.A. Nozhnitskii, S.A. Volkov et al. // Vestnik of Samara University. Aerospace and mechanical engineering. 2019. Vol. 18, nr 3. P. 81–98.

-
4. Materialovedenie i tekhnologiya metallov: uchebnik dlia studentov vuzov, obuchayushchikhsia po mashinostroitel'nyh spetsial'nostyam [Materials Science and Technology of Metals. Textbook for Higher Education Mechanical Engineering Students] / Fetisov G.P., Karpman M.G., Matyunin V.M. et al. Moscow: Vysshaya shkola, 2001. 639 p.
 5. Eliseev Yu.S., Saushkin B.P. Elektroerozionnaya obrabotka izdelii aviatsionno-kosmicheskoi tekhniki [Electroerosion Processing of Aeronautical and Space Engineering Products] / edited by B.P. Saushkin. Moscow: MSTU Publishing House, 2010. 437 p.
 6. Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigatelei: uchebnik dlia studentov vuzov, obuchayushchikhsia po napravleniyu "Dvigateli letatel'nykh apparatov" spetsial'nosti "Raketnye dvigateli" [Technology of Manufacturing of Liquid Rocket Engines. Textbook for Higher Education "Aircraft Engines" Students Specializing in "Rocket Engines"] / V.A. Moiseev, V.A. Tarasov, V.A. Kolmykov, A.S. Filimonov; edited by V.A. Moiseev and V.A. Tarasov. Moscow: MSTU Publishing House, 2008. 381 p.
 7. Panov D.O., Abliaz T.R., Abrosimova A.A. Metallograficheskii analiz poverkhnosti stali 65G posle elektroerozionnoi obrabotki [Metallographic Analysis of 65g Steel Surface after Electrical Discharge Machining] // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya [Modern Problems of Science and Education]. 2013. Nr 5. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=10218>. Publication date: 2013-10-01.
 8. Kodentsev S.N., Rostislavin A.B., Sukhochev G.A. Tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnykh pokazatelei agregatov perspektivnykh dvigatelei [Technological Support of Advanced Engine Units' Operational Parameters] // Nauchno-tekhnicheskii yubileinyi sbornik [Scientific and Technical Anniversary Collection], 1941–2011: dedicated to the 70th anniversary of the Chemical Automatics Design Bureau (CADB): in 3 vols. / CADB; edited by V.S. Rachuk. Voronezh: Kvarta, 2012. Vol. 3. P. 22–29.
 9. Issledovanie stoikosti k vozgoraniyu v srede okislitel'nogo generatornogo gaza obrabotkov lopatok rabocheho koleasa i statora turbiny, izgotovlennykh s ispol'zovaniem tekhnologii selektivnogo lazernogo splavleniya [Investigation of Resistance to Ignition in an Oxidizing Generator Gas Medium of Turbine Wheel and Stator Blades Made Using Selective Laser Fusion Technology] / Belov E.A., Ivanov A.V., Ivanov N.G. et al. // Proceedings of NPO Energomash. 2018. Nr 35. P. 121–138.
 10. Prochnost' i resurs ZhrD [LRE Strength and Life]; N.A. Makhutov, V.S. Rachuk, M.M. Gadenin et al.; edited by N.A. Makhutov and V.S. Rachuk; Russian Academy of Sciences, Mechanical Engineering Research Institute named after A.A. Blagonravov (IMASH RAN). Moscow: Nauka, 2011. 525 p.
 11. Makhutov N.A. Deformatsionnye kriterii razrusheniya i raschet elementov konstruksii na prochnost' [Deformation Criteria of Failure and Calculation of Structural Elements for Strength]. Moscow: Mechanical Engineering, 1981. 272 p.
 12. Issledovanie dolgovechnosti lopatok turbiny model'noi paroturbinnnoi ustanovki [Study of Durability of a Model Steam Turbine Plant's Turbine Blades] / M.A. Rudis, V.Ya. Svistov, A.V. Ivanov, A.V. Koltakov. Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2008. Vol. 4, nr 11. P. 53–59.
 13. Tkachev V.I., Kholodnyi V.I., Levina I.N. Rabotosposobnost' stalei i splavov v srede vodoroda [Performance of Steels and Alloys in a Hydrogen Environment]. Lviv: Vertical, 1999. 256 p.
 14. EOS: Industrial 3D Printing: Success Stories: Products and Services: Innovations: site / EOS GmbH. URL: <https://www.eos.info/en> (publication date: 2020-03-27).

Материалы получены редакцией 20.03.2020