

УДК 621.438:621.822

А.С. БУКАТЫЙ¹, С.А. БУКАТЫЙ¹, А.А. ИВАНОВ²¹ООО Научно-коммерческая фирма «СБК», Рыбинск, Россия²ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРОЧНЕНИЯ МЕТОДОМ ВЫГЛАЖИВАНИЯ ШАРИКОМ НА ОБРАЗОВАНИЕ ЗАБОИН КРОМОК ЛОПАТОК ГТД

В статье рассмотрено влияние упрочнения кромок лопаток ГТД методом многократного выглаживания поверхности шариком (ВШ) на образование повреждений в виде забоин кромок лопаток компрессора ГТД. В работе использованы аналитический и конечно-элементный методы. На основе анализа энергии упругих и пластических деформаций, возникающих при повреждении кромок посторонними предметами, показана эффективность упрочнения кромок методом ВШ, который создаёт в кромках небольшую предварительную пластическую деформацию. Установлено, что энергия упругих деформаций при образовании повреждений мала по сравнению с энергией пластических деформаций.

Ключевые слова: лопатки компрессора, упрочнение кромок, выглаживание шариком, сквозной наклёп, повреждение кромок, энергия пластической деформации.

Введение

Для повышения сопротивления лопаток ГТД усталости, эрозионному износу и повреждениям от попадания в тракт посторонних предметов, широко используется упрочнение поверхностным пластическим деформированием (ППД). При этом большое значение придаётся методам, обеспечивающим повышение сопротивляемости лопаток повреждению посторонними предметами [1]. Одним из таких методов, широко рекламируемых в иностранной литературе, является метод многократного выглаживания поверхности шариком (ВШ). Метод ВШ создаёт наклёпанный слой глубиной до 1 мм и тонкие кромки лопаток компрессора подвергаются сквозному наклёпу при небольшой ~5 % относительной пластической деформации. В этом случае по данным зарубежных работ, приведенных в [1], повреждения в виде забоин глубиной до 1 мм не снижают предел выносливости лопаток, что подтверждает эффективность метода ВШ.

Поскольку внедрение новых технологий связано с большими затратами, то немаловажным является всесторонний анализ преимуществ и недостатков этих технологий.

В работе [2] показано, что наведение в кромках больших остаточных напряжений (ОН) может привести к значительным технологическим остаточным деформациям. Но использование подходов и методик, изложенных в [3], позволяет определять режимы упрочнения внекромочной поверхности лопатки методами ППД, обеспечивающие наряду с повышением сопротивления усталости необходимую геометрическую точность.

В работе [4] автор на основе гипотетического рассмотрения возможных повреждений кромок с образованием трещин пытается доказать несостоятельность эффективности метода ВШ. Однако рассматриваемые им варианты и размеры трещин могут появиться только после значительной наработки лопаток при эксплуатации или циклических испытаниях. При этом не учитывается, что забоины кромок находятся в условиях сжатия остаточными напряжениями от ВШ, которые существенно замедляют процесс образования и скорость роста усталостных трещин. По данным работ, приведенных в [1], сжимающие ОН по сравнению с традиционными методами упрочнения распределяются на большей глубине и обладают повышенной стойкостью к релаксации при повышенных температурах. В силу самоуравновешенности во вне кромочной части поперечного сечения лопатки возникают несколько большие чем обычно растягивающие ОН. Однако соотношение величин ОН в кромках и остальной части лопатки обратно пропорционально отношению их площадей поперечного сечения и отрицательная роль небольших растягивающих ОН полностью компенсируется поверхностным упрочнением микрошариками по всей вне кромочной поверхности лопатки.

Кроме вышеуказанных факторов следует учитывать, что при сквозном наклёпе кромок происходит изменение свойств – упрочнение материала, предел текучести увеличивается и для образования повреждений одинаковых размеров потребуется большее количество кинетической энергии при ударе посторонним предметом. Поэтому в данной работе предпринята попытка оценить количественно

влияние упрочнения кромок сквозным пластическим деформированием на энергоёмкость образования повреждений в виде забоин.

1. Аналитический метод решения

Поскольку расчёт является сравнительным, то в силу малости толщины входной и выходной кромок можно полагать, что поверхность забоины (рис. 1) является цилиндрической, характеризуется параметрами – радиусом R и глубиной a , определяющими теоретический K_T и эффективный K_{σ} коэффициенты концентрации напряжений [5].

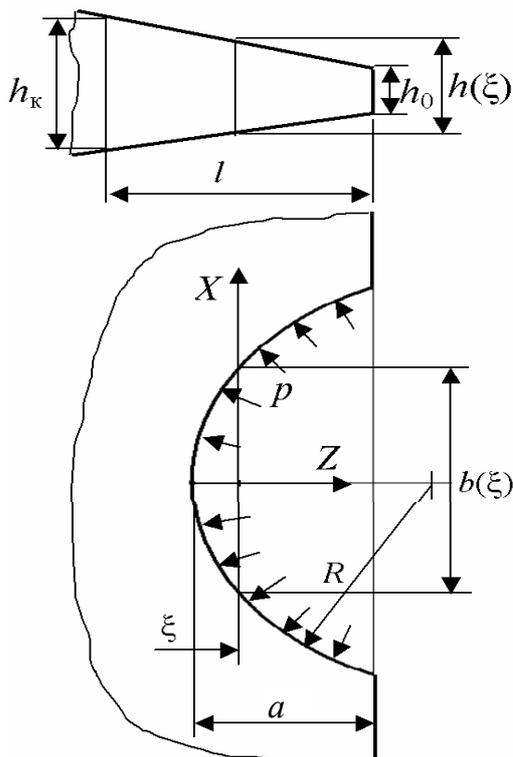


Рис. 1. Схема повреждения кромки в виде забоины

Толщина кромки $h(\xi)$ и протяжённость забоины $b(\xi)$ в зависимости от координаты ξ (рис. 1) определяются следующими выражениями

$$\begin{aligned} h(\xi) &= h_0 + k(a - \xi); \\ b(\xi) &= 2\sqrt{\xi(2R - \xi)}, \end{aligned} \tag{1}$$

где $k = (h_k - h_0)/l$.

Энергию, необходимую для образования повреждения кромки, будем определять как энергию пластического деформирования упрочняющегося материала при $p = \sigma_T$ с помощью интеграла:

$$A_{\text{п}} = \int_0^a \sigma_T(\xi) F(\xi) d\xi, \tag{2}$$

где $F(\xi)$ – проекция площади поверхности забоины на плоскость, перпендикулярную оси ξ ; $\sigma_T(\xi)$ – пре-

дел текучести упрочняющегося материала.

Для определения площади $F(\xi)$ введём дополнительные координаты $0 \leq z \leq a - \xi$ и $0 \leq x \leq 0,5b(\xi)$ (рис. 1), связанные зависимостью $x = \sqrt{z(2R - z)}$.

Тогда

$$F(\xi) = 2 \int_0^{b(\xi)/2} h(\xi, x) dx = 2 \int_0^{a-\xi} h(\xi, z) dz. \tag{3}$$

Здесь $h(\xi, z)$ с учётом расплющивания кромки, определяемого из условия неизменности объёма материала при пластической деформации, выражается зависимостью

$$h(\xi, z) = h(\xi) + 2z \cdot \left(\frac{h(a)}{a} - k \right) \frac{R - z}{\sqrt{z(2R - z)}}. \tag{4}$$

Учитывая, что напряжённое состояние кромки является плоским, энергию упругой деформации, предшествующей пластической, можно представить выражением

$$A_y = \int_0^V \frac{\sigma_T^2(\xi)(1-\mu)}{E} dv = \int_0^a \frac{\sigma_T^2(\xi)(1-\mu)}{E} F(\xi) d\xi, \tag{5}$$

где максимальная величина упругих напряжений $\sigma_{y \max} = \sigma_T$; E и μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала.

Оценка соотношения энергий показывает, что для всех конструкционных материалов

$$\eta = \frac{A_y}{A_{\text{п}}} \cdot 100 \approx \frac{\sigma_T^2(1-\mu)}{E \cdot \sigma_T} \cdot 100 = \frac{\sigma_T(1-\mu)}{E} \cdot 100 < 1\%. \tag{6}$$

Следовательно, энергией упругой деформации можно пренебречь и для определения энергии образования повреждений достаточно выражения (2) с использованием для зависимости $\sigma_T(\xi)$ схематизированной диаграммы жёстко-пластичного упрочняющегося материала. В первом приближении будем считать, что в рассматриваемом диапазоне деформаций свойства материалов при растяжении и сжатии одинаковы (рис. 2).

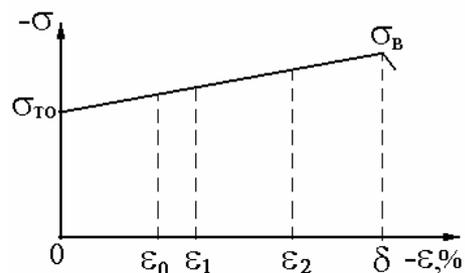


Рис. 2. Схематизированная диаграмма сжатия материала

Для расчёта энергии пластического деформирования необходимо задать параметры a, R, h_k, h_0, l , а также зависимость $\sigma_T(\epsilon)$, которую в соответствии с

диаграммой для упрочняющегося материала (рис. 2) можно представить в виде

$$\sigma_T(\varepsilon) = \sigma_{\text{ТО}} + k_{\sigma}\varepsilon; \quad k_{\sigma} = \frac{(\sigma_{\text{В}} - \sigma_{\text{ТО}})}{\delta}, \quad (7)$$

где $\sigma_{\text{В}}$ – предел прочности; δ – относительное удлинение материала.

Для реализации расчётов в системе Mathcad в соответствии с диаграммой (рис. 2) и выражениями (7) введём следующие обозначения. Для материала кромки без упрочнения методом ВШ: $\sigma_{\text{ТО1}} = \sigma_{\text{ТО}}$, через $\sigma_{\text{max1}} = \sigma_{\text{ТО}} + k_{\sigma}\varepsilon_1$, где ε_1 – относительная деформация, соответствующая глубине забоины a ; для материала кромки, упрочнённой ВШ, $\sigma_{\text{ТО2}} = \sigma_T(\varepsilon_0) = \sigma_{\text{ТО}} + k_{\sigma}\varepsilon_0$ и $\sigma_{\text{max2}} = \sigma_{\text{ТО}} + k_{\sigma}\varepsilon_2$, где $\varepsilon_2 = \varepsilon_0 + \varepsilon_1$ и в соответствии с [1] $\varepsilon_0 \leq 5\%$. Тогда выражение для $\sigma_T(\xi)$, необходимое для интегрирования (2), будет иметь вид

$$\sigma_T(\xi) = \sigma_{\text{ТО}i} + k_{\xi}(a - \xi); \quad k_{\xi} = \frac{(\sigma_{\text{max}i} - \sigma_{\text{ТО}i})}{a}, \quad (8)$$

где индекс $i = 1$ или 2 соответственно для рассчитываемого варианта.

В качестве примера проведены расчёты для лопатки длиной 190 мм и шириной 56–69 мм из сплава ВТ3–1 [2]. Необходимые для расчёта параметры и характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1
Характеристики материала и параметры лопатки

Материал	$\sigma_{\text{ТО}}$ МПа	$\sigma_{\text{В}}$ МПа	δ %	$h_{\text{к}}$ мм	h_0 мм	l мм
ВТ3–1	1050	1450	10	1,13	0,4	10

В соответствии с [6] для лопаток с толщиной кромок менее 0,8 мм без экспериментальной проверки надёжности допускаются лопатки с забоинами глубиной не более 0,25 мм. Поэтому в работе сделаны несколько вариантов расчётов с различной глубиной повреждений, приведённые в табл. 2.

Таблица 2
Характеристики повреждений кромок и результаты расчётов

№	a мм	R мм	ε_0 %	ε_1 %	A_1 Дж	A_2 Дж	$\eta = \frac{A_2}{A_1} \cdot 100$ %
1	0,25	1	5	1	0,0274	0,0309	12,8
2	0,25	5	5	1	0,0645	0,0727	12,8
3	0,5	5	5	3	0,3792	0,4259	12,3
4	5	5	5	5	119,1	133,3	11,9

Результаты расчётов показывают, что для тонких кромок при различной глубине забоин эффект от упрочнения методом ВШ составляет ~12 – 13%. Очевидно, что данный эффект зависит от степени упрочнения материала при пластическом деформировании. Поскольку фактические диаграммы сжатия по сравнению с растяжением свидетельствуют о большей степени упрочнения, то следует ожидать более существенного влияния предварительной деформации материала при ВШ на образование повреждений кромок. Для не упрочняющихся материалов рассматриваемый эффект отсутствует.

2. КЭ – метод решения

Создание конечно-элементной модели кромки лопатки с забоиной осуществлялось в системе ANSYS с использованием элементов Solid 45 и Solid-Shell 190. Модель представляет собой объем, геометрические параметры которого соответствуют лопатке компрессора ГТД из материала ВТ3-1. Дефект кромки, вызванный попаданием в проточную часть инородных предметов, был взят в виде вмятины цилиндрической формы. Радиус вмятины составляет 1 мм, глубина дефекта 0,25 мм относительно вершины входной кромки. Эффективность сквозного проклёпа кромок исследовалась путем анализа двух расчетных моделей. Первая модель – модель лопатки без проклёпа кромки, представляющая собой пластину с размерами 50×50 мм с толщиной кромки 0,4 мм и толщиной 4 мм на противоположном крае пластины. Модель имеет стандартные упругие и пластические свойства материала ВТ3-1. Остаточное напряжённое состояние кромки после нанесения забоины показано на рис. 3, а.

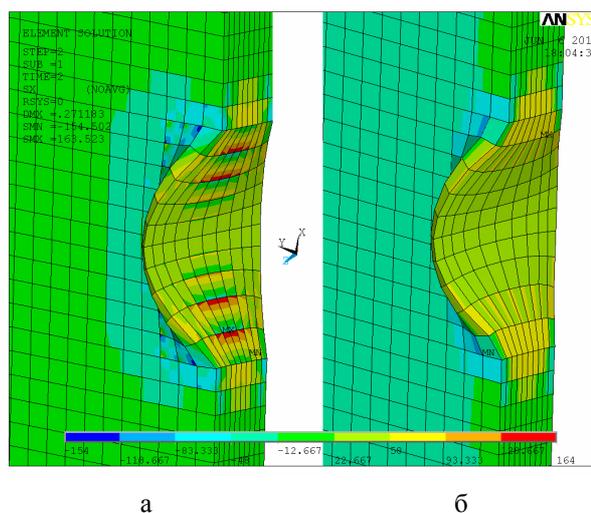


Рис. 3. Моделирование забоины в кромке лопатки:
а – с не упрочнённой ВШ кромкой;
б – с упрочнённой ВШ кромкой

По результатам расчёта максимальные растягивающие напряжения на дне забоины составляют 404 МПа.

Вторая расчётная модель по геометрическим параметрам идентична первой. Средствами ANSYS было смоделировано упрочнение методом сквозного проклёпа путём загрузки во весь объём материала кромки напряжений, средняя величина которых

500 МПа была взята из [1]. Также в модели заданы изменённые пластические свойства материала. В результате расчёта были получены максимальные растягивающие напряжения на дне забоины 333 МПа. Остаточное напряжённое состояние упрочнённой кромки с забоиной показано на рис. 3, б. Распределение ОН в области забоины по глубине кромки показано на рис. 4.

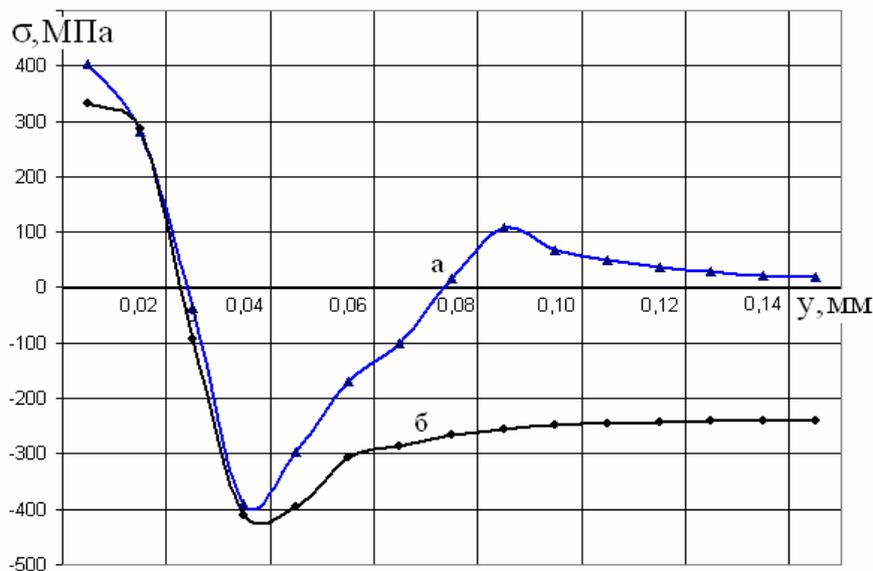


Рис. 4. Распределение ОН по глубине кромки после образования забоины: а – с не упрочнённой ВШ кромкой; б – с упрочнённой ВШ кромкой

Заключение

Таким образом, упрочнение методом ВШ по сравнению с традиционными методами упрочнения ППД обеспечивает повышение сопротивления усталости лопаток ГТД не только за счёт повышения релаксационной стойкости и глубины распределения сжимающих ОН, которые уменьшают концентрацию рабочих напряжений от забоин, но и за счёт уменьшения размеров повреждений при одинаковой кинетической энергии ударяющих посторонних тел.

Расчёты МКЭ показывают, что в упрочнённой ВШ кромке растягивающие ОН на поверхности забоины существенно меньше, чем в не упрочнённой кромке. При этом в упрочнённой кромке начиная с глубины 0,2 мм действуют сжимающие ОН большей величины и на большую глубину, чем в не упрочнённой кромке, что и объясняет повышенное сопротивление усталости упрочнённых ВШ лопаток.

Кроме того, необходимо отметить следующее важное обстоятельство. Отраслевым стандартом ОСТ 1 00304 - 79 [6] при проведении испытаний на выносливость допускается наведение повреждений как методом прорезания резцами или фрезами, так и пластическим деформированием ударным способом специальными бойками. При упрочнении кромок

методом ВШ результаты испытаний будут существенно зависеть от способа наведения забоин. В первом случае происходит разгрузка и обнуление ОН на торцах прорезей без изменения степени пластической деформации на дне надреза. При ударном образовании вокруг забоины происходит не разгрузка, а перераспределение ОН, зависящее от величины пластических деформаций (размеров забоины) и степени упрочнения материала.

Литература

1. Разработка и применение новых методов упрочнения деталей ГТД, основанных на пластическом деформировании поверхностных слоёв (Обзор) / Ю.А. Ножницкий, А.В. Фишгойт, Р.И. Ткаченко, С.В. Теплова // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 2. – С. 8-16.
2. Букатый А.С. Прогнозирование технологических остаточных деформаций лопаток компрессора ГТД после сквозного упрочнения кромок методом выглаживания шариком / А.С. Букатый, С.А. Букатый, А.А. Иванов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 9/76. – С. 128-130.
3. Букатый С.А. Определение рациональных режимов поверхностного упрочнения тонкостенных и маложёстких деталей ГТД на основе допус-

каемых деформаций / С.А. Букатый, А.С. Букатый // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королёва. – Самара, 2009. – № 3 (19), Часть 2. – С. 64-69.

4. Рыбаков Г.М. Методы поверхностного пластического деформирования / Г.М. Рыбаков, С.И. Пудков // Технология машиностроения. – 2010. – № 6. – С. 71-74.

5. Нихамкин М.Ш. Вероятностная оценка стойкости лопаток компрессора ГТД к повреждению посторонними предметами / М.Ш. Нихамкин, И.В. Семёнова // Вестник Самарского государ-

ственного аэрокосмического университета им. С.П. Королёва. – Самара, 2009. – № 3 (19), Ч. 2. – С. 93-96.

6. Отраслевой стандарт ОСТ 1 00304–79 «Лопатки газотурбинных двигателей. Нормирование повреждения лопаток компрессоров от попадания посторонних предметов».

7. Букатый А.С. Назначение оптимальных режимов упрочнения деталей ГТД с учетом геометрии упрочняемых деталей / А.С. Букатый // Авиация и космонавтика–2008: тезисы докл. 7-й междунар. конф. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008. – С. 68.

Поступила в редакцию 16.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., гл. специалист ОАО «НПО «Сатурн» Л.Б. Уваров, Рыбинск, Россия.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІЦНЕННЯ МЕТОДОМ ВИПРАСОВУВАННЯ КУЛЬКОЮ НА УТВОРЕННЯ ЗАБОЇН КРОМОК ЛОПАТОК ГТД

О.С. Букатый, С.О. Букатый, О.А. Иванов

У статті розглянутий вплив зміцнення кромки лопатки ГТД методом багатократного випрасовування поверхні кулькою (ВК) на утворення пошкоджень у вигляді забоїв кромки лопатки компресора ГТД. У роботі використані аналітичний і звичайно-елементний методи. На основі аналізу енергії пружних і пластичних деформацій, що виникають при пошкодженні кромки сторонніми предметами, показана ефективність зміцнення кромки методом ВК, який створює в кромках невелику попередню пластичну деформацію. Встановлено, що енергія пружних деформацій при утворенні пошкоджень мала в порівнянні з енергією пластичних деформацій.

Ключові слова: лопатки компресора, зміцнення кромки, випрасовування кулькою, кризний наклеп, пошкодження кромки, енергія пластичної деформації.

PROGNOSTICATION OF THE TECHNOLOGICAL RESIDUAL DEFORMATIONS OF COMPRESSOR BLADES AFTER THROUGH-EDGE OF BLADE BALL ROLLING STRENGTHENING

A.S. Bukaty, S.A. Bukaty, A.A. Ivanov

The method is designed for the technological residual deformations prognostication of gas turbine components after surface plastic deformation strengthening. This method is based on finite element analysis and applied for the residual deformations prognostication of the compressor blade after through-edge of blade ball rolling strengthening. The finite element model makes it possible to simulate the effect of strengthening due to shot-peening of blade and ball rolling of edges of blade. The method may be used for optimization of the ball rolling strengthening treatment technology.

Key words: compressor blades, strengthening, ball rolling, residual stress, residual deformation, finite element model analysis.

Букатый Алексей Станиславович – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения» Ярославского государственного технического университета, заместитель директора ООО Научно-коммерческой фирмы «СБК», Рыбинск, Россия, e-mail: bukaty@inbox.ru.

Букатый Станислав Алексеевич – д-р техн. наук, проф. кафедры теоретической механики и сопротивления материалов Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева, директор ООО Научно-коммерческой фирмы «СБК», Рыбинск, Россия, e-mail: bukaty_sa@mail.ru.

Иванов Александр Альбертович – руководитель проекта дирекции газотурбинных энергетических установок ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск, Россия, e-mail: aleksandr.ivanov@npo-saturn.ru.