

УДК 621.438:621.822

А.С. БУКАТЫЙ, С.А. БУКАТЫЙ, А.А. ИВАНОВ

ООО Научно-коммерческая фирма «СБК», Рыбинск, Россия

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД ПОСЛЕ СКВОЗНОГО УПРОЧНЕНИЯ КРОМОК МЕТОДОМ ВЫГЛАЖИВАНИЯ ШАРИКОМ

*На основе конечно-элементного моделирования разработана методика прогнозирования технологических остаточных деформаций (ТОД) деталей ГТД после упрочнения поверхностным пластическим деформированием. Показано применение методики для прогнозирования ТОД лопаток компрессора после сквозной пластической деформации кромок лопаток методом выглаживания шариком (ВШ). Создана конечно-элементная модель лопатки ГТД, позволяющая моделировать упрочнение поверхности и наклёп кромок на различную глубину. Разработанная методика может быть использована для оптимизации технологии упрочнения лопаток методом ВШ.*

**Ключевые слова:** лопатки компрессора, упрочнение, выглаживание шариком, остаточные напряжения, остаточные деформации, конечно-элементное моделирование.

### Введение

Повышение надёжности и долговечности и увеличение ресурса ответственных деталей ГТД является одной из основных проблем авиадвигательостроения, для решения которой широко используется упрочнение поверхностным пластическим деформированием (ППД). Особенно высокие требования предъявляются к вентиляторным и компрессорным лопаткам, подверженным эрозионному износу и повреждениям от попадания в тракт посторонних предметов. Часто глубина повреждений превышает глубину наклёпанного слоя 0,1–0,2 мм, создаваемого традиционными методами упрочнения галтовкой или микрошариками, что существенно снижает эффективность упрочнения. Поэтому в настоящее время ведётся разработка новых методов упрочнения, отличающихся большей глубиной, но значительно меньшей степенью пластической деформации поверхностного слоя. В обзоре [1] рассмотрены работы в этом направлении, среди которых заслуживает внимания новый метод упрочнения выглаживанием шариком (ВШ)

Метод ВШ создаёт наклёпанный слой глубиной до 1 мм и тонкие кромки лопаток компрессора подвергаются сквозному наклёпу при относительно небольшой степени пластической деформации ~5 %. В этом случае по данным зарубежных работ, приведенных в [1], забоины глубиной до 1 мм не снижают предел выносливости лопаток, что подтверждает эффективность метода ВШ. Однако, внедрение упрочняющих методов сопровождается рядом проблем, среди которых наиболее важной является обеспечение точности размеров и формы деталей

без снижения эффективности упрочнения [2]. Поэтому в данной работе ставится задача разработать методику прогнозирования и сделать оценку возможных технологических остаточных деформаций (ТОД), возникающих при сквозном наклёпе тонких кромок лопаток методом ВШ.

### 1. Методика прогнозирования ТОД

В силу сложности геометрии лопаток задача прогнозирования ТОД решается на основе КЭ-моделирования детали и её поверхностного пластически деформированного слоя  $a$  [3]. Сложность задачи обусловлена тем, что толщина слоя  $a$ , на которой нужно моделировать распределение остаточных напряжений (ОН), очень мала (0,05 – 1,00 мм). В настоящей работе для расчётов использовался программный пакет ANSYS 11. Модель компрессорной лопатки разрабатывалась в системе Unigraphics.

Моделирование ОН осуществлялось на основе использования начальных напряжений (НН), которые определяют расчётно-экспериментальным методом [2]. Сначала от основной модели отделялся наклёпанный поверхностный слой. Далее из геометрической модели была создана КЭ-модель и объёмам, на которые разбита модель, присвоены свойства материала. На следующем этапе были загружены НН в поверхностный слой конечно-элементной модели.

Команда **INISTATE** позволяет загружать НН как параметр загрузки структурного анализа как в элементы, основой которых являются точки интегрирования, так и в материал. Элементы, поддержи-

вающие послойную структуру, позволяют загружать напряжения по отдельности в каждом слое, что даёт возможность моделировать загрузку определённой эпюры напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$ . При загрузке НН в послойные элементы основой служат точки интегрирования элемента или точки интегрирования слоёв. Для всех прочих элементов основой для загрузки напряжений служат точки интегрирования элемента. В работе использовались элементы, поддерживающие загрузку НН: SOLID-SHELL 190, SOLID-SHELL 181. Перед загрузкой НН задаём систему координат, в которой напряжения будут загружены. Загрузку НН, переменных по толщине слоя  $a$  наиболее рационально задавать путём создания файла НН, содержащего параметры функций и значения напряжений. Чтение загруженных напряжений осуществляется командой **INISTATE, LIST**, которая позволяет осуществлять проверку загруженных напряжений.

Нужно отметить, что если поверхностный слой не является замкнутым и обрывается, например, для образца с прямоугольным сечением в направлении продольной оси  $X$ , соответствующие напряжения на торцевой поверхности отсутствуют. В этом случае необходимо учесть краевой эффект – зону включения ОН.

Указанная загрузка эпюры начальных напряжений в поверхностный слой конечно-элементной модели в системе ANSYS достаточно трудоёмка. Поэтому предлагается вместо полной эпюры НН загружать постоянные по величине эквивалентные НН [2], которые значительно упрощают создание и расчёт конечно-элементной модели. В этом случае используется один слой.

После окончания расчёта выходными данными являются перемещения узлов. Анализ искомым деформаций можно осуществлять путём выбора требуемых точек и вывода их смещений относительно исходных позиций. Также можно осуществить выборку элементов и вывести значения перемещений в файл для дальнейшего анализа перемещений узлов.

## 2. Результаты расчёта ТОД

На основе изложенной выше методики была разработана модель консольно закреплённой лопатки длиной 190 мм и шириной 56 × 69 мм из сплава ВТ3–1, в которой пластически деформированные поверхностный слой и кромки выделены в отдельные области (рис. 1).

В соответствии с [1] модель позволяет устанавливать ширину наклёпанной области до 10 мм при максимальной толщине кромок 1 – 2 мм. Для моделирования сквозного наклёпа кромок использованы эпюры ОН с глубиной залегания ~0,9 мм, приведенные в [1].

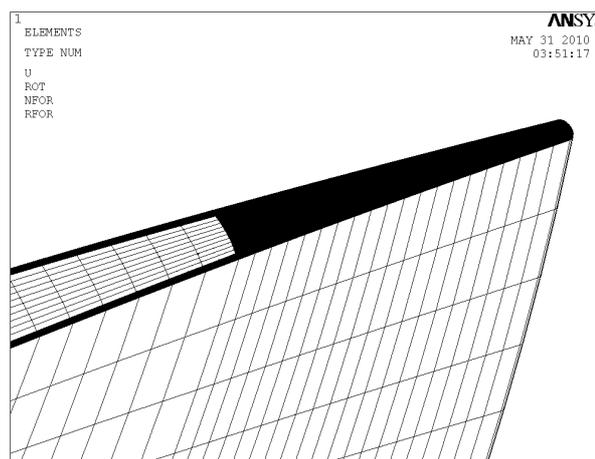


Рис. 1. КЭ-модель лопатки в области кромки

На их основе величина эквивалентных НН (ЭНН) была принята равной 400 МПа, при максимальной толщине проклёпа кромок 0,9 мм.

В табл. 1 показаны результаты расчётов – максимальные прогиб пера, разворот концевое поперечного сечения и удлинение лопатки, а также исходные данные, использованные в расчёте.

Таблица 1

Исходные данные расчёта ТОД лопатки

№ Вар-та	Велич. Экв.НН МПа	Ширина кромок мм	Деформации лопатки		
			Прогиб мм	Разворот град	Удлинение мм
1	400	6	2,205	0,576	0,339
2	400	Упр.мкш.	0,595	0,162	0,138
3	400	Полное упрочн-е	2,228	0,573	0,383
4	200	4	0,692	0,189	0,107
5	200	Упр.мкш.	0,297	0,081	0,069
6	200	Полное упрочн-е	0,788	0,211	0,142

В первом варианте учитывались только ЭНН в наклёпанных кромках от ВШ без упрочнения пера лопатки. Во втором варианте моделировалась упрочняющая обработка микрошариками всей поверхности пера на глубину 0,122 мм. В третьем показаны результаты расчётов при равномерном упрочнении всей поверхности пера лопатки микрошариками и сквозном наклёпе кромок.

В вариантах 4 – 6 обработка лопатки аналогичная, но при уровне ЭНН 200 МПа и ширине наклёпанных кромок 4 мм.

## Заключение

Результаты расчёта при двух уровнях ЭНН показывают, что при одинаковом упрочнении только

одних кромок методом ВШ уже возникают существенные деформации, превышающие технологические допуски.

При дополнительном упрочнении микрошариками всей поверхности пера деформации лопатки увеличиваются.

Следовательно, при назначении режимов упрочнения необходимо учитывать возможные деформации лопаток и регулировать уровень ОН.

Разработанная методика прогнозирования ТОД при использовании подходов [2] позволяет определять режимы упрочнения, обеспечивающие наряду с повышением сопротивления усталости геометрическую точность лопаток ГТД.

Методика может быть использована также для разработки способов устранения недопустимых ТОД, возникающих в процессе изготовления высокоточных лопаток.

## 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 С.А. Энергетический метод определения рациональных режимов упрочнения тонкостенных и маложёстких деталей ГТД поверхностным пластическим деформированием / С.А. Букатый, А.С. Букатый // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 10 (67). – С. 45-49.

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

Поступила в редакцию 24.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зам. главн. инженера Л.Б. Уваров, ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск, Россия.

### ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАЛИШКОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА ГТД ПІСЛЯ НАСКРІЗНОГО ЗМІЦНЕННЯ КРОМКИ МЕТОДОМ ВИГЛАДЖУВАННЯ КУЛЕЮ

*О.С. Букатий, С.О. Букатий, О.А. Иванов*

На основі кінцево-елементарного моделювання розроблена методика прогнозування технологічних залишкових деформацій (ТЗД) деталей ГТД після зміцнення поверхневим пластичним деформуванням. Показано застосування методики для прогнозування ТЗД лопаток компресора після наскрізної пластичної деформації кромок лопаток методом вигладжування кулею (ВК). Створена кінцево-елементарна модель лопатки ГТД, що дозволяє моделювати зміцнення поверхні і кромок на різну глибину. Розроблена методика може бути використана для оптимізації технології зміцнення лопаток методом ВК.

**Ключові слова:** лопатки компресора, зміцнення, вигладжування кулею, внутрішня напруга, кінцеві деформації, кінцево-елементарне моделювання.

### 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.