

УДК 539.3

Ю.С. ВОРОБЬЕВ<sup>1</sup>, М.А. ЧУГАЙ<sup>1</sup>, К.Ю. ДЬЯКОНЕНКО<sup>1</sup>, С.Б. КУЛИШОВ<sup>2</sup>,  
А.Н. СКРИЦКИЙ<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков<sup>2</sup>ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина

## АНАЛИЗ ЛОКАЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛОПАТОК

*В работе представлен анализ влияния свойств материала на спектр собственных частот, форм и распределение относительных напряжений при колебаниях рабочих монокристаллических охлаждаемых и неохлаждаемых лопаток. Показаны особенности возникновения зон локализации напряжений в монокристаллических лопатках сложной геометрической формы. Учитывается неоднородность материала, влияние температурных полей и центробежных сил. Моделирование объектов проводилось на основании трехмерного подхода метода конечных элементов. Численные результаты сравнивались с экспериментальными.*

**Ключевые слова:** рабочие лопатки, монокристаллический материал, повреждения, конечные элементы, колебания, локализация напряжений.

### Введение

В современных ГТД используются монокристаллические лопатки турбин, которые работают в условиях высоких температур и интенсивных вибрационных нагрузок. Эти лопатки отличаются сложностью конструкции и неоднородностью материала, вызванной как монокристаллической структурой материала, так и воздействием температурных полей.

Вопросам влияния монокристаллической структуры на прочность и колебания лопаток посвящен ряд работ [1 – 5].

Первые ступени газовой турбины имеют охлаждаемые лопатки с аксиальной ориентацией монокристаллического материала [001]. В таких лопатках локализация вибрационных напряжений часто возникает на внутренней поверхности охлаждаемых каналов и представляет большую опасность.

Для остальных ступеней газовых турбин используются, как правило, неохлаждаемые монокристаллические лопатки. Для них выбор аксиальной ориентации монокристаллического материала неопределен.

Без детального анализа вибрационных характеристик монокристаллических лопаток и особенностей распределения относительных напряжений с учетом геометрической формы, температурных полей и центробежных сил невозможно сделать обоснованные выводы о выборе рациональных конструктивных параметров и ориентации монокристаллического материала конкретных конструкций.

### 1. Результаты исследований колебаний охлаждаемой лопатки

Рассматриваются особенности колебаний монокристаллической лопатки первой ступени со сложной вихревой системой охлаждения и каналами для выхода охлаждаемого воздуха

Проведены исследования сходимости результатов для серии расчетных конечно-элементных моделей с различными уровнями дискретизации [4].

Весьма характерным для таких лопаток является локализация напряжений на поверхности внутренних каналов вихревой матрицы. Эта локализация усиливается при эксплуатации лопаток на рабочих режимах, когда внутренние поверхности имеют более низкую температуру и, соответственно, более высокие модули упругости. При этом для наружных поверхностей имеет место обратное явление – они имеют более высокую температуру и, следовательно, более низкие модули упругости. Поэтому при неравномерном нагреве лопатки происходит перераспределение напряжений за счет большей напряженности внутренних зон. Это может оказаться опасным, поскольку появление зон локализации напряжений внутри охлаждающих каналов может привести к образованию трещин и других повреждений. Сложность такой ситуации состоит в том, что эти повреждения невозможно обнаружить при визуальном контроле лопаток, чем и объясняется актуальность их расчетного определения.

Большой интерес представляют результаты анализа форм колебаний и распределение напряже-

ний. Сложность геометрической формы охлаждаемых и неохлаждаемых лопаток обуславливает и сложность форм их колебаний [4, 5]. Но наибольший интерес вызывает анализ распределения относительных интенсивностей напряжений. На рис. 1, 2 представлены результаты численного анализа распределения напряжений и их локализации при колебаниях охлаждаемых лопаток.

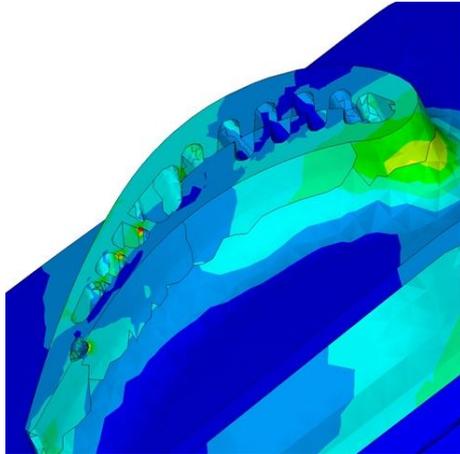


Рис. 1. Концентрация напряжений на четвертой форме колебаний лопатки в районе первого отверстия по высоте лопатки

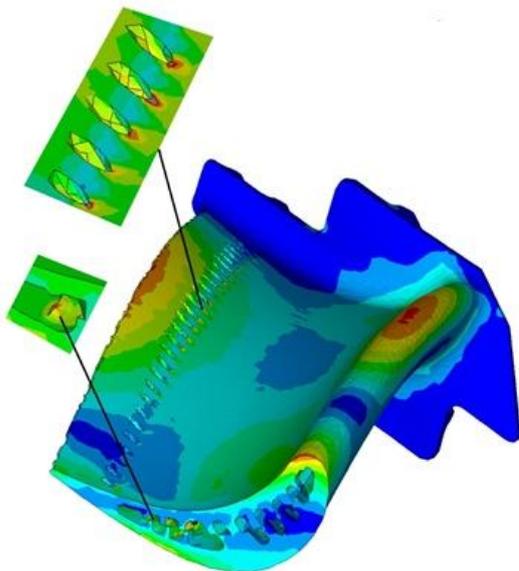


Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений при шестой форме колебаний

Результаты этих исследований показывают, что зоны локализации относительных напряжений расположены не только на поверхности лопаток, но и на внутренней поверхности охлаждающих каналов и отверстий для выхода охлаждающего воздуха. Это обстоятельство следует учитывать, т.к. возможно возникновение повреждений в зонах, недоступных

визуальному контролю и тензометрическим исследованиям.

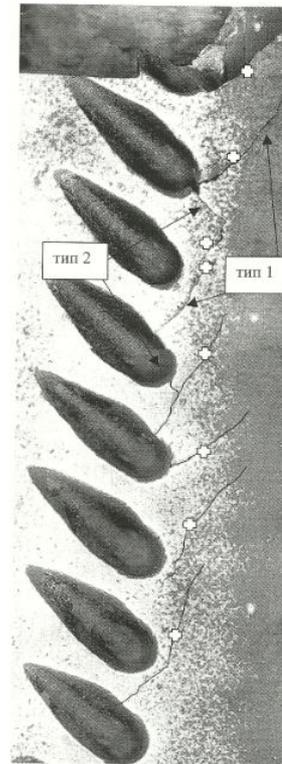


Рис. 3 Трещины в охлаждаемой лопатке в зоне отверстий для выхода охлаждающего воздуха при лабораторных испытаниях

Примеры расположения трещин и повреждений в охлаждаемых лопатках, полученные в результате лабораторных исследований на ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», представлены на рис. 3, 4.

Результаты численных исследований хорошо согласуются с экспериментальными и объясняют характер и места повреждений и разрушений лопаток, обнаруженные при лабораторных испытаниях лопаток на ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект».

В работах [2, 3, 6] отмечалось, что в монокристаллических лопатках распространение магистральной трещины соответствует расположению КГО. Но также известно, что при соблюдении основных тенденций конкретное распространение ряда трещин носит более сложный характер. Это видно на рис. 3.

## 2. Анализ колебаний неохлаждаемых лопатки

Неохлаждаемые лопатки обычно изготавливаются из поликристаллических сплавов или монокристаллических с расположением материала с аксиальными ориентациями [001] и [111].

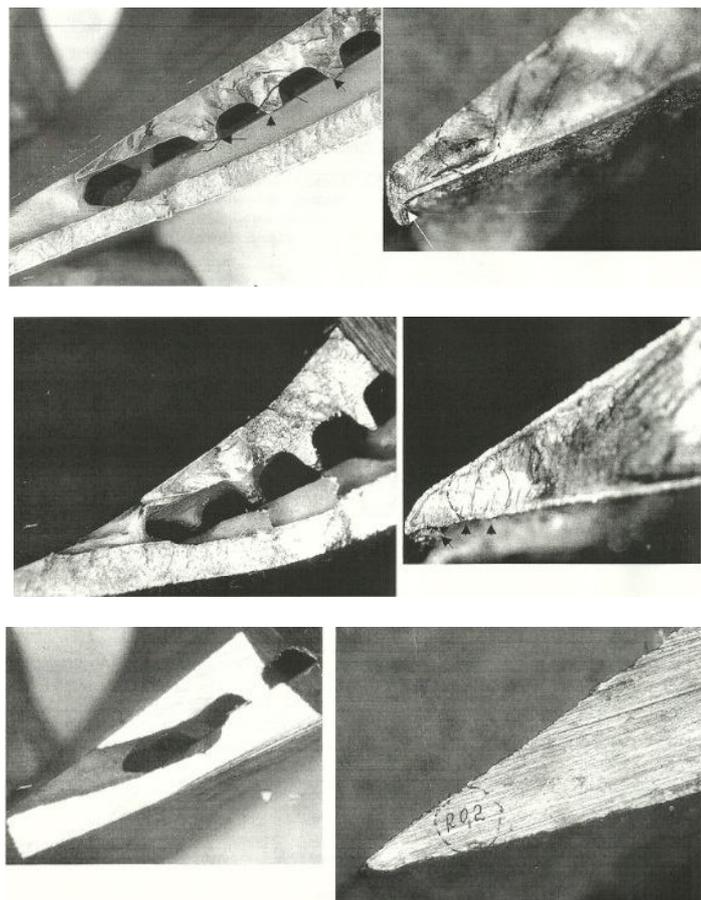


Рис. 4. Зоны зарождения трещин и характерные разрушения лопатки, которые наблюдались при лабораторных исследованиях

В качестве примера приводятся результаты анализа распределения напряжений при колебаниях на восьмой форме неохлаждаемой лопатки (рис. 5). Для лопатки из поликристаллического материала локализация напряжений возникает на периферии под полкой. При использовании монокристаллического материала с ориентацией [001] зона локализа-

ции несколько смещается от полки и возникает новая зона. Для монокристаллической лопатки с ориентацией материала [111] возникает зона локализации напряжений на входной кромке. Анализ спектров частот [7] и распределения напряжений позволяет сделать рациональный выбор материала лопатки.

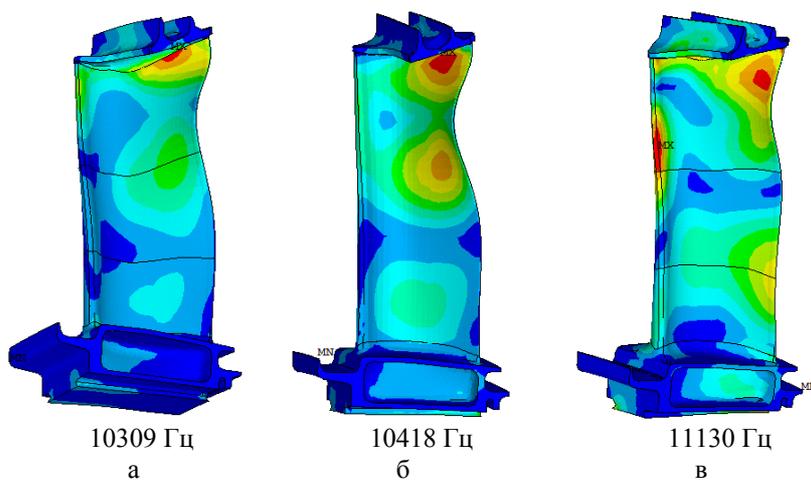


Рис. 5. Поля относительных интенсивностей напряжений на 8-й форме колебаний лопаток: поликристаллической (а), монокристаллической с КГО [001] (б) и монокристаллической с КГО [111] (в)

## Выводы

Следует отметить достоверность результатов численных исследований локализации относительных вибрационных напряжений, которые были получены до проведения лабораторных испытаний и достаточно хорошо с ними согласуются.

Результаты исследований свидетельствуют о возникновении зон локализации напряжений на внутренних поверхностях охлаждаемых каналов. Анализ колебаний охлаждаемых лопаток и распределение относительных напряжений дает возможность установить соотношение между напряжениями на охлаждающих каналах и на поверхности лопатки. Последние можно оценить с помощью тензометрирования и получить представление о величине напряжений на поверхности охлаждающих каналов. Это облегчает дальнейший анализ колебаний лопаток на рабочих режимах с учетом температурных полей.

Выявление мест локализации вибрационных напряжений играет роль как для охлаждаемых лопаток, так и для неохлаждаемых. Использование численных методов анализа на основе трехмерных моделей с учетом особенностей монокристаллического материала способствует обеспечению вибрационной прочности лопаток современных ГТД при существенном снижении объема экспериментальных исследований.

## Литература

1. Придорожный, Р.П. Влияние кристаллографической ориентации на спектр собственных частот и форм колебаний монокристаллических рабочих лопаток турбин [Текст] / Р.П. Придорожный, А.В. Шереметьев, А.П. Зиньковский // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 2. – С. 42–48.

2. Мельникова, Г.В. Влияние кристаллографической ориентации монокристалла и ее технологического разброса на частотный спектр турбинных лопаток [Текст] / Г.В. Мельникова, Б.Ф. Шорр // Авиационно-космическая техника и технология. – 2001. – № 26. – С. 140–144.

3. Ножницкий, Ю.А. О прочностной надежности монокристаллических рабочих лопаток высокотемпературных турбин перспективных ГТД [Текст] / Ю.А. Ножницкий, Е.Р. Голубовский // Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования. Труды ЦКТИ. – СПб, 2009. – Вып. 296. – С. 74–82.

4. Анализ локализации напряжений при колебаниях лопаточного аппарата турбомашин [Текст] / Ю.С. Воробьев, К.Ю. Дьяконенко, В.Н. Романенко, М.А. Чугай // Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования: труды ЦКТИ. – СПб, 2009. – Вып. 296. – С. 282–306.

5. Особенности колебаний лопаточного аппарата ГТД с учетом распределения и локализации напряжений [Текст] / Ю.С. Воробьев, М.А. Чугай, К.Ю. Дьяконенко, В.Н. Романенко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2009. – №4/5 (40) – С. 19–24.

6. Воробьев, Ю.С. Особенности распределения вибрационных напряжений в монокристаллических лопатках с повреждениями [Текст] / Ю.С. Воробьев, М.А. Чугай // Авиационно - космическая техника и технология. – 2011. – № 10 (87). – С. 123 – 126.

7. Анализ вибрационных характеристик монокристаллических лопаток современных ГТД [Текст] / Ю.С. Воробьев, М.А. Чугай, К.Ю. Дьяконенко, С.Б. Кулишов, А.Н. Скрицкий // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 3/10 (57). – С. 36 – 39.

Поступила в редакцию 30.05.2012 г.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. кафедры двигателестроения, Ю.С. Гусев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

## АНАЛІЗ ЛОКАЛІЗАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ ПРИ КОЛИВАННЯХ МОНОКРИСТАЛІЧНИХ ЛОПАТОК

*Ю.С. Воробйов, М.О. Чугай, К.Ю. Дьяконенко, С.Б. Кулішов, О.М. Скрицький*

У роботі представлено аналіз впливу властивостей матеріалу на спектр власних частот, форм та розподілу відносних напружень при коливаннях робочих монокристалічних охолоджуємих та неохолоджуємих лопаток. Показано особливості виникнення зон локалізації напружень в монокристалічних лопатках складної геометричної форми. Враховується неоднорідність матеріалу, вплив температурних полів та відцентрових сил. Моделювання об'єктів проводилося на підставі тривимірного підходу методу скінченних елементів. Чисельні результати порівнюються з експериментальними.

**Ключові слова:** робочі лопатки, монокристалічний матеріал, пошкодження, скінченні елементи, коливання, локалізація напружень.

## STRESS LOCALIZATION ANALYSIS ON SINGLE-CRYSTAL BLADES VIBRATIONS

*Yu.S. Vorobiov, M.A. Chugay, K.Iu. Dyakonenko, S.B. Kulishov, A.N. Skritskij*

The work presents an analysis of influence of material properties peculiarities on natural frequencies spectrum, modes and relative stress distribution under vibrations of single-crystal cooling and uncooling blades. The features of origin of areas of stress localization are rotined in the single-crystal blades of difficult geometrical form. Heterogeneity of a material, influence of temperature fields and centrifugal forces is considered. The modeling of objects was spent on the basis of the three-dimensional approach of a finite elements method. Numeral results were compared to experimental.

**Key words:** blades, single crystal material, damages, finite elements, vibrations, stress localization.

**Воробьев Юрий Сергеевич** – доктор технических наук, профессор, зав. отделом нестационарных механических процессов Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: vorobiev@ipmach.kharkov.ua.

**Чугай Марина Александровна** – кандидат технических наук, научный сотрудник отдела нестационарных механических процессов Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: chugay@ipmach.kharkov.ua.

**Дьяконенко Константин Юрьевич** – инженер отдела нестационарных механических процессов Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: vorobiev@ipmach.kharkov.ua.

**Кулишов Сергей Борисович** – кандидат технических наук, зам. генерального конструктора по новой технике ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина, e-mail: spe@machproekt.nikolaev.ua.

**Скрицкий Александр Николаевич** – зав. отделом ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина, e-mail: spe@machproekt.nikolaev.ua.