

Степень уплотнения находили по отношению площади элемента образца до обработки к площади, получаемой после обработки.

Расчетные значения степени уплотнения (упрочнения) приведены в табл. 2.

Таблица 2 - Значения степени уплотнения (упрочнения)

| Материал           | Амплитуда А, мм | Степень уплотнения              |                            |
|--------------------|-----------------|---------------------------------|----------------------------|
|                    |                 | при вибрационном деформировании | при обычном деформировании |
| Сталь 65Г          | 0,5             | 0,059                           | 0,043                      |
| Сталь 65Г, сормайт |                 | 0,040                           | 0,028                      |
| Сталь 45, сормайт  |                 | 0,049                           | 0,036                      |

Как показали исследования, степень уплотнения образцов, восстановленных привариванием полос (шин) из стали 45 с последующей наплавкой сормайтом при вибрационном деформировании в 1,36 раза больше, чем при обычном деформировании.

### 5. Выводы.

1. Оценен характер пластического деформирования и сформулировано представление, объясняющее повышение пластичности при вибрационном деформировании по отношению к обычному.

2. Изучено влияние трения на прочностные характеристики обрабатываемого материала деталей, оказывающего влияние на его упрочнение.

**Список литературы:** 1. Постанова Кабінету Міністрів України від 30 травня 2007 р. №785 «Про затвердження Державної цільової програми реалізації технічної політики в агропромисловому комплексі на період до 2011 року». 2. Анілович В.Я. Надійність машин в завданнях та прикладах / В.Я. Анілович, О.С. Гринченко, В.Л. Литвиненко. – Харків: Око, 2001. – 320 с. 3. Рибак Т.І. Пошукове конструювання на базі оптимізації ресурсу мобільних сільськогосподарських машин / Т.І. Рибак . – Тернопіль: ВАТ «ТВПК», 2003. – 332 с. 4. Черновол М.И. Современные материалы для восстановления и упрочнения деталей машин / М.И. Черновол, Ф.И. Златопольский, Л.К. Лопата. – Кировоград: 1994. – 84 с. 5. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с. 6. Дудников И.А. К вопросу влияния вибрационной обработки на деформирование материала обрабатываемых деталей / И.А. Дудников, А.П. Кившик, А.А. Дудников. Зб. наук. праць. Випуск 39. – Кировоград: 2009. – С.167-169.

*Поступила в редколлегию 24.01.2011*

**УДК 621.625+621.438**

**Ю. А. БЫКОВ**, канд. техн. наук, докторант, Институт проблем машиностроения им А.Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков

### **ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА АЭРОУПРУГОСТЬ ЛОПАТОК ТУРБИНОЙ РЕШЕТКИ**

Проведен анализ факторов влияния распределения температуры на аэроупругие характеристики решеток колеблющихся турбинных лопаток. Выявлены основные пути взаимного влияния, определены задачи, необходимые для решения поставленной проблемы.

Ключевые слова: нестационарная аэродинамика в турбомашинах, аэроупругость в турбомашинах, аэротермоупругость.

Проведено аналіз факторів впливу розподілу температури на аеропружні характеристики решіток коливних турбінних лопаток. Виявлено основні шляхи взаємного впливу, визначено задачі, необхідні для вирішення поставленої проблеми.

Ключові слова: нестационарна аеродинаміка в турбомашинах, аеропружність в турбомашинах, аэротермопружність.

In the paper is presented analysis of influence factors of temperature distribution on aeroelastic characteristics of cascade of vibrating turbine blades. Main ways of mutual influence are discovered; necessary tasks for given problem solving are determined.

Key words: unsteady aerodynamics in turbomachines, aeroelasticity in turbomachines, aérothermoelasticity.

## 1. Введение

В последнее время широко используемым способом повышения эффективности турбомашин является увеличение температуры на входе в первые ступени турбины. Причина использования высоких температур кроется в повышении давления для процесса адиабатического расширения, следовательно, в возможности создания большей удельной работы при расширении газа в турбине. Термический КПД также будет увеличиваться с увеличением входной температуры в рабочем колесе. Эта взаимосвязь между входной температурой, удельной мощностью и КПД ведет к дальнейшим инженерно-конструкторским разработкам в попытке поднять входную температуру на более высокий уровень. Сегодня входные температуры рабочего колеса газовой турбины достигли уровня, намного превосходящего температуры плавления материала турбины. Как видно на рис. 1, температура обычного авиационного турбореактивного двигателя может достигать 1700 К, в то время как для двигателя современного военного самолета, где не требуется малого потребления топлива или длительного срока службы, температура может быть более 2000 К. На том же рисунке видно, что температура плавления монокристаллической отливки около 1300 К, т.е. разность температур может превышать 400 К.

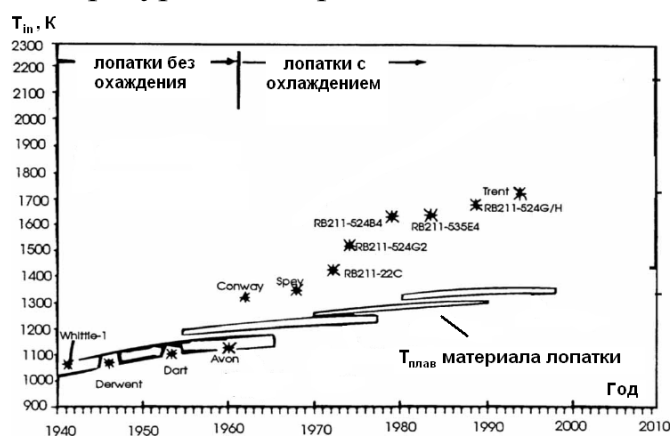


Рис. 1. Рост входных температур турбин компании Роллс-Ройс и температур плавления материалов лопаток по годам

Для снижения температуры лопатки применяются различные технологии охлаждения. Значительная разница в температурах воздуха из камеры сгорания и

охлаждающего воздуха из компрессора приводит к значительным температурным напряжениям в теле лопатки. Это обстоятельство бросает вызов существующим методикам оценки надежности работы лопаточных аппаратов, в частности, определения условий возбуждения автоколебаний лопаток в различных режимах работы турбины. Таким образом, возникает проблема надежности лопаточных аппаратов с учетом повышенных тепловых нагрузок на лопатки. В частности, до последнего времени не была исследована проблема понижения уровня вибраций, в том числе по выявлению возможных автоколебаний лопаток, в условиях значительного перепада температур. Проблема может решаться экспериментально, однако возможно существенно снизить затраты на экспериментальный поиск оптимальных материалов и режимов эффективной работы турбины, с помощью внедрения в практику проектирования современных методов и средств численного моделирования.

Таким образом, актуальной проблемой на данный момент является проблема численного моделирования взаимодействия натекающего потока и колебаний лопаток с учетом значительной температурной неравномерности в первых ступенях газовых и паровых турбин.

В последнее время проделана значительная работа по совершенствованию методов прогнозирования автоколебаний в различных видах лопаточных аппаратов, в том числе и ступенях турбомашин [1,2,3]. В то же время остается открытым вопрос о влиянии значительной температурной неравномерности в первых ступенях газовых турбин высокого давления на возможность возникновения самопроизвольных колебаний лопаток, могущих привести к ускоренному износу венцов. Картина распределения температуры осложняется применением в первых ступенях различных способов охлаждения лопаток.

## 2. Проблема аэротермоупругости

Решение проблемы аэроупругости лопаток в ступенях современных газовых турбин должно содержать следующие основные явления в турбомашине: нестационарная аэродинамика обтекания лопаток направляющего аппарата и рабочего колеса, нестационарное взаимодействие упругих и инерциальных свойств лопатки, нестационарные тепловые процессы в турбомашине.

На рисунке 2 схематично представлены физические явления и взаимосвязи между ними, моделирование которых необходимо для наиболее полного решения поставленной проблемы.



Рис. 2. Задача аэротермоупругости:

- 1) вибрации, 2) устойчивость, 3) аэротермодинамика, 4) статическая термоупругость, 5) статическая аэроупругость, 6) молекулярные тепловые процессы, 7) динамическая аэроупругость, 8) устойчивость при нагреве, 9) статическая аэротермоупругость, 10) динамическая термоупругость, 11) динамическая аэротермоупругость

Следующим необходимым шагом постановки проблемы является выяснение наиболее значимых связей между моделируемыми физическими явлениями. Поскольку речь идет о вибрациях и автоколебаниях, то, несомненно, постановка должна быть нестационарной. Задачи динамической аэроупругости в турбомашинах (рис. 2(7)) достаточно изучены, имеется множество методов численного моделирования [1,2,3,4].

Влияние распределения температуры на нестационарные аэродинамические характеристики (аэротермодинамика, рис. 2(3)) для турбинной решетки колеблющихся профилей было изучено ранее в работах [5,6,7]. Исследованию подвергались лопатки с двумя конфигурациями охлаждающих каналов (вариант 1 и 2), лопатки с пленочным охлаждением (вариант 3) и лопатки с постоянной температурой поверхности (вариант 4). Различие в температурах на поверхности лопатки было довольно существенным, что видно на рис. 3. Несмотря на значительное различие в распределении температуры, распределение осредненного по времени коэффициента давления, изображенного на рис. 4, практически не отличается для всех вариантов моделирования.

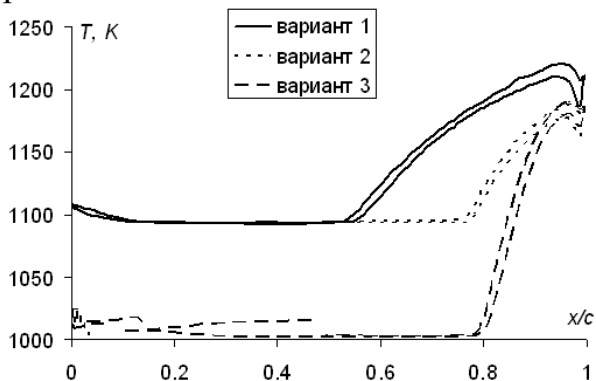


Рис. 3. Распределение температуры по хорде лопатки



Рис. 4. Распределение усредненного по времени давления по хорде лопатки

Важной нестационарной характеристикой решетки колеблющихся профилей является коэффициент аэродемпфирования, который является безразмерной работой аэродинамических сил по перемещению лопатки со знаком «минус». Возможность возникновения автоколебаний лопаток определяет знак работы аэродинамических сил. На рис. 5 представлены значения коэффициента аэродемпфирования для различных вариантов распределения температуры по лопатке.

Положительные значения коэффициента свидетельствуют о демпфировании колебаний, отрицательные – о возможности возбуждения колебаний.

Значения коэффициента аэродемпфирования для разных вариантов имеют схожий характер зависимости от фазового угла, значения отличаются незначительно и максимальное расхождение находится в пределах 10%.

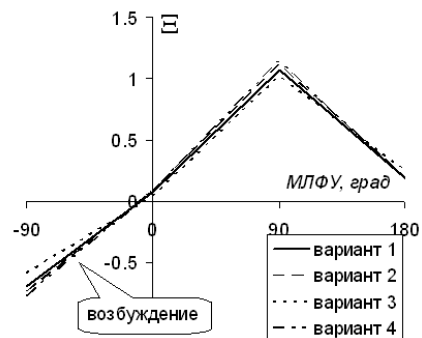


Рис. 5. Зависимость коэффициента аэродемпфирования от фазового угла

Из вышеизложенных результатов можно сделать вывод о незначительности аэротермодинамических эффектов, в большей степени стационарных, нежели нестационарных, при моделировании динамической аэротермоупругости в решетках турбомашин.

Из динамических взаимодействий в задаче аэротермоупругости требует рассмотрения задача динамической термоупругости. Эта задача связывает упругие динамические характеристики лопатки, такие как собственные формы и частоты колебаний, с распределением температуры по лопатке, а также явления температурного расширения и нагрева вследствие движения лопатки. Существенность этого взаимодействия подтверждена исследованиями, в частности, для лопатки направляющего аппарата выявлено отличие собственных частот колебаний в холодном состоянии и рабочем режиме до 11% [8]. Также было выявлена неоднородность напряжений в зависимости от конструкции охлаждающих каналов. Тем самым подтверждается необходимость моделирования упругости лопатки в объеме, учитывая внутреннюю структуру и неоднородность материалов. В моделировании нестационарной термоупругости можно выделить два основных подхода – модальный, при котором выполняется определение собственных форм и частот колебаний в зависимости от температурного поля, и прямой – т.е. численное интегрирование системы уравнений термоупругости для лопатки. Каждый подход имеет свои достоинства и недостатки, что требует дальнейших исследований.

### **3. Заключение**

Численное моделирование аэротермоупругости в лопаточных решетках является сложной задачей как с математической, так и алгоритмической точек зрения. Каждый элемент этой задачи требует тщательно взвешенного выбора средств моделирования, поскольку малые изменения характеристик лопатки или обтекания могут привести к появлению автоколебаний лопаток. Приведенный анализ факторов влияния распределения температуры на аэроупругость турбинной решетки поможет выбрать наиболее эффективные методы моделирования аэротермоупругости в турбомашинах.

**Список литературы:** 1. Verhoosel C.V. uncertainty and reliability analysis of fluid–structure stability boundaries / C.V. Verhoosel, t.p. scholcz, s.j. hulshoff, m.a. gutierrez // aiaa journal. – 2009. – 47, № 1. – p. 91-104. 2. Mani K. Adjoint-based sensitivity formulation for fully coupled unsteady aeroelasticity problems / k. mani, d.j. mavriplis // aiaa journal. – 2009. – 47, № 8. – p. 1902-1915. 3. Гнесин В.И. Численный анализ влияния соотношения чисел лопаток статора и ротора на нестационарные нагрузки и режимы колебаний лопаток / В.И. Гнесин, Л.В. Колодяжная // Вестник НТУ «ХПИ»: Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – 2009. – № 3. – с. 23-32. 4. Гнесин В.И. Численное исследование аэроупругих характеристик лопаточного венца турбомашин, работающей на нерасчетном режиме. / Гнесин В.И., Быков Ю.А. // пробл. машиностроения. – 2004. – т.7, №1 – с. 31-40. 5. Быков Ю.А. Численное моделирование течения в решетке колеблющихся профилей с учетом теплообмена. / Пробл. машиностроения. – 2009. – т.12, №5 – с. 36-41. 6. Быков Ю.А. Численное исследование влияния охлаждения лопаток на аэроупругость турбинной решетки / Вост.-европ. журн. передовых технологий. – 2010. – №4/7. – с.30-33. 7. Быков Ю.А. Численное моделирование аэроупругости в решетке охлаждаемых лопаток / авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – №5. – с.59-63. 8. Воробьев Ю.С. влияние температурной неоднородности на колебания охлаждаемых

## УДК 621.793.7

**И.В. СМИРНОВ**, канд. техн. наук, доцент, НТТУ Украины «КПИ», г. Киев

**И.А. СЕЛИВЕРСТОВ**, канд. техн. наук, доцент, ХНТУ, г. Херсон

**О.А. ВОЙТОВИЧ**, канд. техн. наук, доцент, ХНТУ, г. Херсон

**А.В. ЧОРНИЙ**, ассист., НТТУ Украины «КПИ», г. Киев

**В.И. КОПЫЛОВ**, докт. техн. наук, профессор, НТТУ Украины «КПИ», г. Киев

### **ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОРОШКА С НАНОЧАСТИЦАМИ SiO<sub>2</sub>**

Проведены исследования микроструктуры и износостойкости плазменных покрытий на основе порошка ПГ19М с наночастицами SiO<sub>2</sub>. Показано, повышение износостойкости и микротвердости данных покрытий при незначительном, массовом содержании наночастиц SiO<sub>2</sub>.  
Ключевые слова: узел трения, газотермическое напыление, износостойкость, микротвердость.

Проведені дослідження мікроструктури та зносостійкості плазмових покриттів на основі порошка ПГ19М с наночастиками SiO<sub>2</sub>. Показано, підвищення зносостійкості і микротвердості цих покриттів при незначному, масовому вмісті наночастинок SiO<sub>2</sub>.

Ключові слова: вузол тертя, газотермічне напылення, зносостійкість, микротвердість.

Researches of a microstructure and wear resistance of plasma spray coatings on the basis of powder ПГ19М with nanoparticles SiO<sub>2</sub> are conducted. It is shown, increase of wear resistance and microhardness of the given coatings at the insignificant, mass maintenance nanoparticles SiO<sub>2</sub>.

Keywords: node of friction, plasma spray coating, wear resistance, microhardness

С повышением долговечности и надежности деталей и механизмов, работающих в условиях трения, резко возрастают требования к свойствам антифрикционных материалов. Во многих случаях применение известных материалов и технологии их получения исчерпали возможность улучшения механических свойств. Для получения антифрикционных материалов с часто противоречивыми свойствами поверхности (высокая твердость и износостойкость, высокие антифрикционные характеристики) необходимы приемы и методы, позволяющие создать совершенно новый композиционный материал.

Одним из методов может быть создание на поверхностях деталей газотермических покрытий различного функционального назначения. В последнее время активно развиваются исследования в области создания газотермических покрытий, в состав которых входят неравновесные, дисперсные и наноразмерные компоненты, которые значительно повышают защитные и механические свойства [1,2,3].