

УДК 629.7.036:539.4

А.П. ЗИНЬКОВСКИЙ, И.Г. ТОКАРЬ, В.А. КРУЦ, Я.Д. КРУГЛИЙ

Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

ВЛИЯНИЕ РАССЕЯНИЯ ЭНЕРГИИ В МАТЕРИАЛЕ НА КОЛЕБАНИЯ ЛОПАТОК С НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

В работе представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований по изучению закономерностей влияния рассеяния энергии в материале на колебания моделей отдельной лопатки и пакета из двух лопаток при наличии неоднородностей, обусловленных нанесением покрытия на перо и повреждением типа забоины. Установлено, что нанесение нанокompозитного покрытия обуславливает существенное (до трех раз и более) повышение демпфирующей способности лопаток. Вибронапряженность пары лопаток при наличии повреждения типа забоины зависит от соотношения расстройки их частот и рассеяния энергии в материале.

Ключевые слова: лопатка, пара лопаток, колебания, рассеяние энергии, покрытие, повреждение.

Введение

Рабочие лопатки и их системы (пакеты и венцы) турбомашин в процессе их эксплуатации находятся под воздействием широкого спектра динамических нагрузок.

Одним из наиболее эффективных методов снижения их динамической напряженности является повышение демпфирующей способности за счет использования соответствующих материалов и других конструктивно-технологических способов.

При решении этой задачи необходимо учитывать конструктивные особенности объектов исследования и условия их эксплуатации. Применительно к рабочим лопаткам компрессоров авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) это заключается в следующем.

Во-первых, повышение их демпфирующей способности возможно за счёт использования материалов, обладающих соответствующими диссипативными свойствами, а также нанесения на их перо высокодемпфирующих металлических покрытий [1].

Во-вторых, при изучении колебаний лопаток необходимо учитывать наличие конструктивных связей [2], а также возможность эксплуатационных повреждений от попадания посторонних предметов (забоин), коррозии, трещин усталости и тому подобное [3].

Учитывая изложенное, был проведен комплекс экспериментально-расчетных исследований по изучению закономерностей влияния рассеяния энергии в материале на колебания моделей отдельной лопатки и пакета из двух лопаток при наличии неоднородностей, обусловленных нанесением покрытия на перо и повреждения типа забоины.

1. Объекты исследования и основные положения методики их испытаний

Для оценки влияния рассеяния энергии в материале на колебания конструктивных элементов с неоднородностью, обусловленной покрытием, был выбран консольный образец прямоугольного поперечного сечения, как модель отдельной рабочей лопатки. Образец изготовлен из титанового сплава BT1-0, толщина рабочей части которого составляет 4 мм, а длина – 150 мм. Нанокompозитное покрытие наносилось только на одну поверхность рабочей части образца по всей ее ширине, начиная от корневого сечения, и имело неизменную длину 50 мм. При этом отношение толщины покрытия к толщине образца составляло 0,0133-0,0155.

Выбор длины и расположения с одной стороны образца покрытия обусловлен следующими обстоятельствами. Во-первых, эта область его рабочей части наиболее напряженная. Во-вторых, дает возможность расположения с обратной стороны образца тензорезистора для регистрации его деформации и определения частотной зависимости характеристики демпфирования колебаний образца с покрытием при постоянстве его длины.

Нанокompозитные покрытия на основе систем $Al-Cu-Fe$ и $Al-Cr-Fe$ получали путем электронно-лучевого осаждения металлического пара при температуре $T_{oc} = 300...500^{\circ}C$ по технологии, изложенной в [4]. Процессу осаждения предшествовала очистка поверхностей образца ионным пучком аргона с целью обеспечения прочной адгезии покрытия.

Производили также оценку влияния диссипативных свойств нанокompозитных покрытий системы $Al-Cr-Fe$ на демпфирующую способность титановой

рабочей лопатки компрессоров АГТД, длина пера которой 55 мм, хорда - 24 мм, толщина вдоль линии максимальной толщины в корневом сечении 1,8 мм, а на периферийном – 1,2 мм. Покрытие наносили на перо лопатки с двух его сторон.

Испытания по определению логарифмического декремента колебаний объектов исследования методом резонансной кривой [5] проводились на установке [6], которая обеспечивает:

- минимизацию потерь энергии в сочленениях, не связанных с гистерезисными потерями в материале и покрытии;
- резонансный принцип возбуждения изгибных колебаний объекта с помощью электродинамического вибратора как при комнатной (20°С), так и повышенной (до 450°С) температурах.

Для возбуждения резонансных колебаний образец устанавливался в захвате, а лопатка – в элементе диска, которые крепились на подвижной платформе вибратора. С помощью тензорезистора, который препарировали в зоне максимальных деформаций, записывалась амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) при колебаниях выбранного объекта по первой изгибной форме, что является необходимым условием реализации метода резонансной кривой. При этом, для стабилизации состояний материала исследуемых объектов при повышенной температуре и узла их крепления перед записью АЧХ и измерением температуры выполняли наработку около 10^5 циклов при амплитуде напряжений, близкой к максимальной, которая задавалась при испытаниях.

При решении задачи был установлен такой диапазон изменения параметров испытаний: частота колебаний – 150...1000 Гц; температура – 20 ... 400°С, что соответствует основным режимам эксплуатации рабочих лопаток компрессора АГТД.

Для определения закономерностей влияния рассеяния энергии в материале на формирование колебаний стержневой модели пары лопаток как системы с нарушенной регулярностью, обусловленной наличием повреждения типа забоины, экспериментально-расчетные исследования проводились с использованием образцов камертонного типа, конструктивная схема которых представлена на рис. 1. Они были изготовлены из различных материалов (алюминиевый Д16 и титановый ВТ1-0 сплавы, а также сталь Ст.3), которые отличаются диссипативными свойствами, о чем свидетельствуют приведенные на рис. 1 амплитудные зависимости их декремента колебаний.

Обоснованность выбора именно таких материалов для решения задачи подтверждается результатами испытаний по определению собственных частот колебаний выбранных образцов с использованием методики, изложенной в [3], а также вычис-

лительных экспериментов с использованием 3D конечно-элементной модели образца.

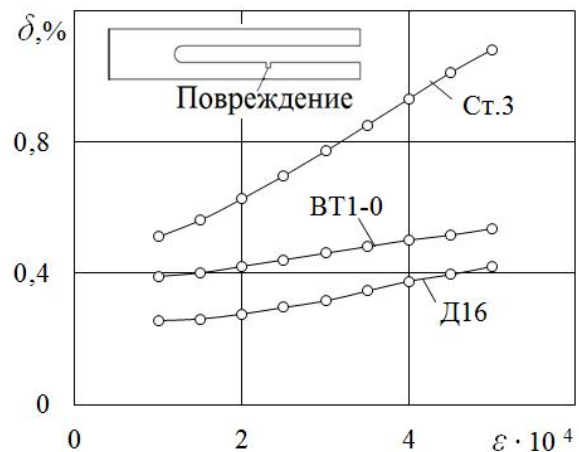


Рис. 1. Зависимость логарифмического декремента колебаний материала изолированного стержня образца камертонного типа из сплавов Д16 и ВТ1-0 и стали Ст.3 от максимальной амплитуды циклического деформирования

Учитывая простые геометрические формы объекта исследования, для ее создания были использованы линейные 8-узловые конечные элементы, которые в сравнении с квадратичными позволяют значительно упростить решение задачи и достичь требуемой точности при оптимальном выборе их количества.

Результаты экспериментального определения собственных частот колебаний образцов камертонного типа со строгой регулярностью представлены в таблице. Они свидетельствуют, что их упруго-инерционные свойства обеспечивают практическую одинаковость первых собственных частот при синфазном кинематическом возбуждении колебаний.

Нарушение регулярности образцов вызывалось нанесением на один из стержней поперек его рабочей части паза шириной 1 мм и глубиной, изменяющейся в процессе испытаний и однозначно характеризующей расстройку частот Δp стержней.

Таблица

Результаты эксперимента

Материал образца	Собственная частота колебаний, Гц		Отклонение собственной частоты от среднего значения	
	образца p_0	средняя p_{cp}	Гц	%
Д16	371,21	371,03	0,18	0,05
ВТ1-0	373,08		2,05	0,55
Ст. 3	368,81		2,22	0,60

2. Анализ результатов испытаний

Влияние нанокompозитных покрытий на демпфирующую способность титановых рабочих лопаток. На рис. 2 представлены зависимости декремента колебаний от максимальной амплитуды циклического деформирования консольного образца как с покрытием системы *Al-Cu-Fe* ($T_{oc} = 500^\circ\text{C}$, $h_n = 62$ мкм) при температуре испытаний 350°C (1) и 20°C (2), так и без него (3). Как следует из приведенных данных, нанесение указанного покрытия обуславливает существенное (примерно трехкратное) повышение его демпфирующей способности, зависящее от температуры испытаний. При этом, как видно из приведенных на рис. 3 результатов, частота колебаний образца с выбранным покрытием не оказывает существенного влияния на величину его декремента.

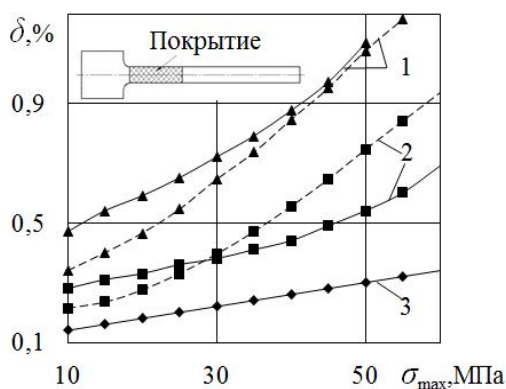


Рис. 2. Зависимость декремента колебаний консольного образца с покрытием системы *Al-Cu-Fe* от амплитуды максимальных напряжений при температуре испытаний 350°C (1) и 20°C (2) для частоты резонансных колебаний 145 Гц (сплошные линии) и 312 Гц (штриховые). 3 – образец без покрытия

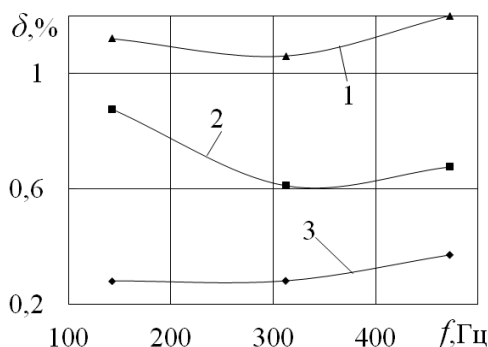


Рис. 3. Диаграмма изменения величины декремента колебаний образца с нанокompозитным покрытием системы *Al-Cu-Fe* от частоты резонансных колебаний для амплитуды максимальных напряжений 45 МПа при температуре испытаний 350°C (1) и 20°C (2). 3 – образец без покрытия

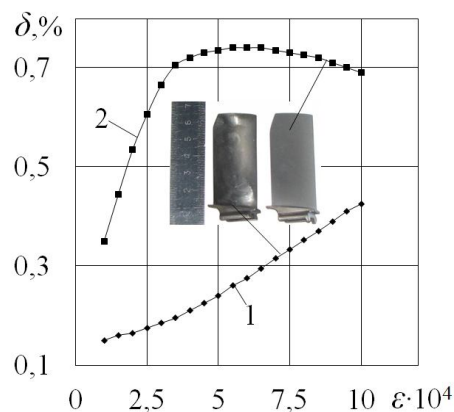


Рис. 4. Зависимости логарифмического декремента колебаний лопатки без покрытия – (1) и с покрытием нанокompозитом системы *Al-Cr-Fe* – (2) от максимальной амплитуды циклического деформирования пера по первой изгибной форме

Для подтверждения результатов экспериментальных исследований влияния покрытий на демпфирующую способность консольных образцов были проведены испытания титановой рабочей лопатки компрессора, на перо которой наносили нанокompозитное покрытие толщиной 39 мкм системы *Al-Cr-Fe* с содержанием *Al* 30 %. Из представленных на рис. 4 зависимостей следует, что при наличии покрытия ее демпфирующая способность в зависимости от амплитуды циклического деформирования, также может возрасти в 3,5 и более раза.

Таким образом, нанокompозитные покрытия систем *Al-Cu-Fe* и *Al-Cr-Fe*, которые характеризуются повышенными антикоррозионными и трибологическими свойствами [7], можно рассматривать в качестве перспективных материалов для создания демпфирующих покрытий тонкостенных конструктивных элементов, в частности, таких как титановые рабочие лопатки компрессоров АГТД. Однако необходим дальнейший поиск оптимальной их структуры и параметров ее получения для обеспечения максимальной демпфирующей способности лопаток в условиях их эксплуатации.

Определение влияния рассеяния энергии в материале на колебания стержневой модели пакета пары лопаток с повреждением типа забоины. В работе [8] показано, что для анализа колебаний регулярной системы типа пакета из двух лопаток может быть использован параметр связанности парных форм колебаний

$$S = r/\delta, \quad (1)$$

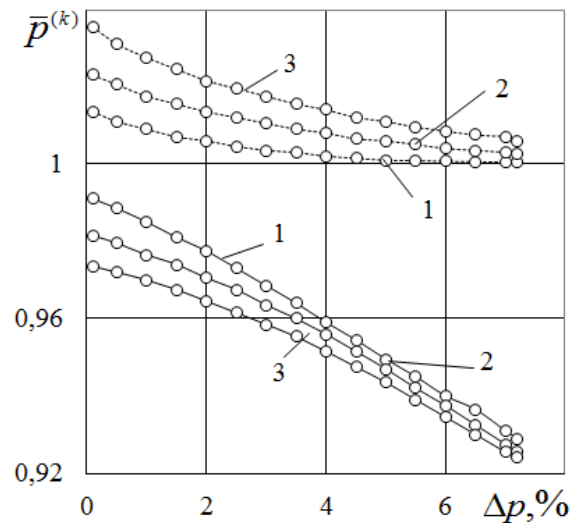
где $r = (p_m^{(I)} - p_m^{(II)})/p_m^{(0)}$ – коэффициент расщепления частот парных форм колебаний;

δ – соответствующая этим формам колебаний диссипативная характеристика системы.

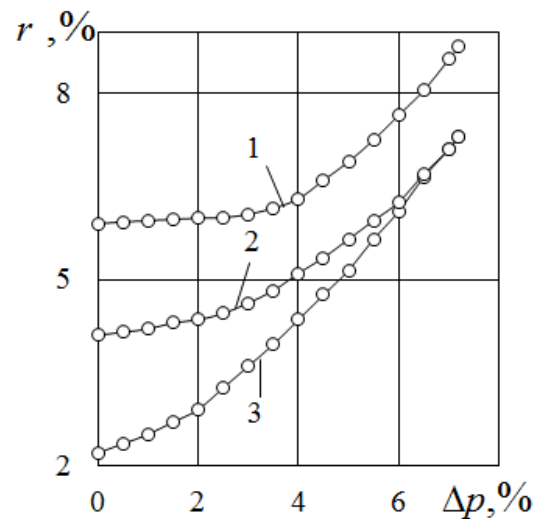
Для определения параметра S необходимым условием, как следует из (1), является знание собственных частот $p^{(k)}$ ($k = I, II$) их форм колебаний – синфазной (I) и антифазной (II). Поэтому были определены зависимости относительных значений $\bar{p}^{(k)} = p^{(k)} / p^{(0)}$ указанных частот колебаний и коэффициента r их расщепления от расстройки частот Δp стержней, которые приведены на рис. 5. Видно, что, в отличие от частотных характеристик изолированных стержней, спектр собственных частот форм колебаний образца, а следовательно и коэффициент упругой связи стержней, обеспечиваемой хвостовиком, зависит от его материала.

По результатам экспериментального определения АЧХ образцов камертонного типа из выбранных материалов, были определены зависимости относительных амплитуд резонансных напряжений стержней от расстройки их частот, которые показаны на рис. 6. Как следует из полученных результатов, характер указанных зависимостей сохраняется при изменении уровня рассеяния энергии в образце и соответствует таковому для случая технологического нарушения его регулярности [9]. Однако темп изменения резонансных напряжений и их уровень с возрастанием расстройки частот стержней определяется величиной декремента колебаний. Так, при синфазной форме колебаний образцов более напряженным является их поврежденный стержень, как обладающий меньшей собственной частотой. При этом более высокий уровень резонансных напряжений имеет стержень образца, характеризующийся большей величиной декремента колебаний, а экстремум указанной зависимости для такого стержня наблюдается при большей расстройке частот стержней. С возрастанием расстройки частот колебаний максимальные амплитуды напряжений при синфазной форме асимптотически стремятся к таковым для настроенного образца и тем быстрее, чем меньше декремент колебаний. В случае антифазной формы колебаний образцов имеет место обратное явление. Более напряженным является неповрежденный стержень, для которого характерна большая собственная частота колебаний. При этом более высокий уровень напряжений имеет стержень образца с меньшей величиной декремента колебаний, а экстремум указанной зависимости для такого стержня наблюдается при меньшей расстройке частот колебаний. С увеличением расстройки частот до $\Delta p \approx 2\%$ имеет место интенсивное возрастание резонансных амплитуд напряжений неповрежденного стержня, а в дальнейшем наблюдается их плавное изменение. Для поврежденного стержня при данной форме колебаний указанные зависимости имеют явно выра-

женный максимум, а при $\Delta p > 4\%$ их уровни практически совпадают.



а



б

Рис. 5. Зависимости относительных собственных частот синфазных (сплошные линии) и антифазных (штриховые) форм колебаний (а) и коэффициента их расщепления (б) от расстройки частот стержней образцов из сплавов Д16 (1) и ВТ1-0 (2) и стали Ст.3 (3)

Таким образом, уровень вибронапряженности исследуемого образца камертонного типа зависит как от величины расстройки частот стержней, так и от диссипативных свойств его материала. Так, при синфазной форме колебаний максимальный ее уровень характерен для образца с наибольшей величиной декремента колебаний, в данном случае из Ст.3 (см. рис. 6, а). При антифазной форме колебаний имеет место обратное явление (см. рис. 6, б).

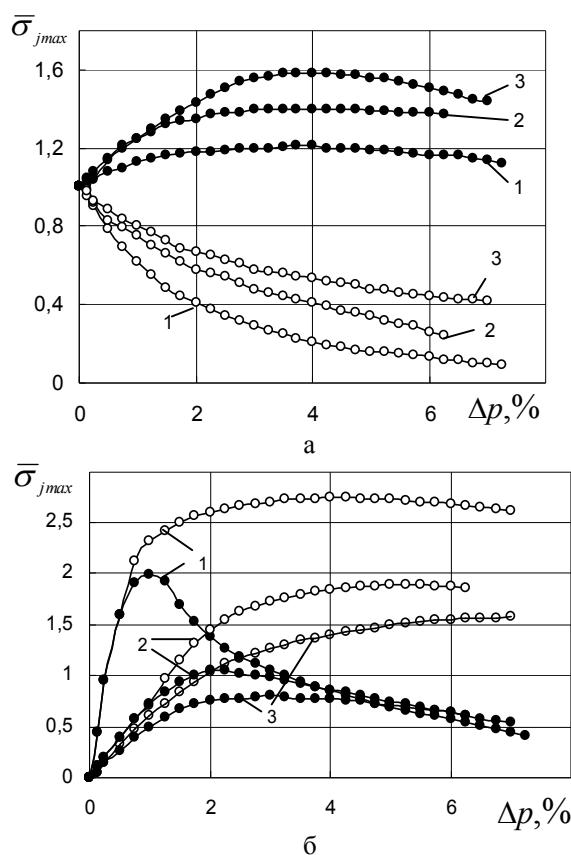


Рис. 6. Зависимости относительных амплитуд резонансных напряжений неповрежденного (○) и поврежденного (●) стержней от расстройки их частот при синфазных (а) и антифазных (б) колебаниях образцов из сплавов Д16 (1) и ВТ1-0 (2) и стали Ст. 3 (3)

Для объяснения установленных закономерностей формирования резонансных колебаний исследуемой системы при нарушении ее регулярности обратимся к параметру S связанности ее возбуждаемых форм.

На рис. 7 приведены зависимости его изменения для исследуемых образцов от расстройки частот колебаний стержней. Здесь в качестве диссипативной характеристики системы выбрано среднее значение декремента колебаний образцов, численные значения которых равны: 0,315 % (Д16), 0,46 % (ВТ1-0) и 0,77 % (Ст.3). Как следует из представленных данных, наименьшая величина параметра связанности S характерна для образца, изготовленного из стали Ст.3, обладающего, как видно из рис. 1, максимальной демпфирующей способностью. Поскольку, как известно из [10], чем меньше его величина при данной расстройке частоты, тем больше связанность форм колебаний системы, т. е., возрастает влияние одной формы колебаний на другую. Именно вследствие этого наблюдается возрастание максимальной вибронпряженности образца из стали Ст.3 при его синфазной форме колебаний.

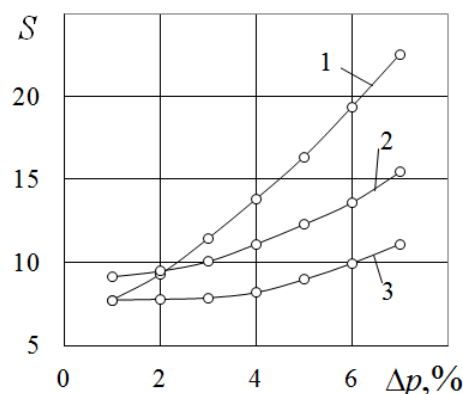


Рис. 7. Зависимость изменения параметра связанности возбуждаемых форм колебаний от расстройки частот стержней образцов из сплавов Д16 (1) и ВТ1-0 (2) и стали Ст. 3 (3)

Выводы

На основе результатов проведенного комплекса экспериментально-расчетных исследований по определению влияния рассеяния энергии в материале на колебания лопаток и их систем с неоднородностями, можно сделать такие выводы:

1. Демпфирующая способность титановых рабочих лопаток компрессоров АГТД с нанокompозитными покрытиями в зависимости от их структуры при повышенной температуре эксплуатации может возрасти в три и более раз.

2. Установлено, что уровень вибронпряженности при резонансе модели пары лопаток как системы с нарушенной регулярностью вследствие наличия повреждения типа забоины зависит от соотношения величины расстройки частот колебаний лопаток и уровня рассеяния энергии. При этом показано, что достаточной характеристикой закономерностей распределения резонансных напряжений является параметр связанности возбуждаемых форм колебаний исследуемой системы.

Литература

1. Устинов, А.И. Диссипативные свойства наноструктурированных материалов [Текст] / А.И. Устинов // Проблемы прочности. – 2008. – № 5. – С. 96-104.
2. К исследованию демпфирующей способности стержней в поле центробежных сил [Текст] / А.Я. Адаменко, И.Г. Токарь, А.П. Зиньковский, В.В. Матвеев // Проблемы прочности. – 1983. – № 8. – С. 89-92.
3. Токарь, И.Г. Влияние параметров локального повреждения регулярной системы на спектр собственных частот колебаний и вибронпряженность однотипных элементов [Текст] / И.Г. Токарь, А.П. Зиньковский // Проблемы прочности. – 2010. – № 2. – С. 55-64.

4. Paton, B.E. *Composite Materials Deposited from the Vapour Phase in Vacuum Soviet Technologies Review [Text]* / B.E. Paton, B.A. Movchan // *Weld and Surfacing*. – 1991. – № 2. – P. 43-64.

5. Матвеев, В.В. Демпфирование колебаний деформируемых тел [Текст] / В.В. Матвеев. – К.: Наук. думка, 1985. – 263 с.

6. Зиньковский, А.П. Демпфирующая способность конструктивных элементов с наноструктурированными покрытиями [Текст] / А.П. Зиньковский, И.Г. Токарь // *Вестник двигателестроения*. – 2009. – № 2. – С. 37-41.

7. Sordelet, D.J. *Dry sliding of polygrained quasi-crystalline and crystalline Al-Cu-Fe alloys [Text]* / D.J. Sordelet, J.S. Kim, M.F. Besser // *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* – 1999. – № 553. – P. 459-470.

8. Влияние рассеяния энергии на формирование колебаний модели системы лопаток с повреждением [Текст] / А.П. Зиньковский, И.Г. Токарь, В.А. Круц, Я.Д. Круглий // *Вибрации в технике и технологиях*. – 2011. – № 3(63). – С. 74-78.

9. Резонансные колебания стержневых моделей турбинных лопаток с составным елочным хвостовиком [Текст] / А.П. Зиньковский, М.В. Смертюк, В.В. Матвеев, И.Г. Токарь, А.Я. Адаменко // *Проблемы прочности*. – 1984. – № 9. – С. 85-89.

10. Матвеев, В.В. О границах применимости модели парных форм при исследовании колебаний поворотно-симметричных систем [Текст] / В.В. Матвеев, А.П. Зиньковский, М.В. Смертюк // *Проблемы прочности*. – 1990. – № 5. – С. 106-109.

Поступила в редакцию 23.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.С.Воробьев, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.

ВПЛИВ РОЗСИЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ В МАТЕРІАЛІ НА КОЛИВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ З НЕОДНОРІДНОСТЯМИ

А.П. Зіньковський, І.Г. Токар, В.О. Круц, Я.Д. Круглий

В роботі представлено результати розрахунково-експериментальних досліджень з вивчення закономірностей впливу розсіювання енергії в матеріалі на коливання моделі окремої лопатки та пакету з двох лопаток при наявності неоднорідностей, зумовлених нанесенням покриттів на перо та пошкодженням типу забої. Встановлено, що нанесення нанокompозитного покриття зумовлює значне (до трьох разів і більше) підвищення демпфуючої здатності лопаток. Вібронапруженість пари лопаток при наявності пошкодження типу забої залежить від співвідношення частотного розладу стрижнів та розсіювання енергії в матеріалі.

Ключові слова: лопатка, пара лопаток, коливання, розсіювання енергії, покриття, пошкодження.

INFLUENCE OF DISSIPATION OF ENERGY IN MATERIAL ON VIBRATIONS OF STRUCTURAL ELEMENTS WITH NONUNIFORMITIES

A.P. Zinkovskii, I.G. Tokar', V.A. Kruts, Ya.D. Kruglyy

The paper presents the results of experimental and calculated investigations into mechanisms governing the influence of dissipation of energy in material on the vibrations of models of individual (separate) blade or a set of two blades in the presence of nonuniformities caused by deposition of the coating on the blade airfoil portion and by nick-type damage. It is found that deposition of the nanocomposite coating causes a significant increase (by three times and more) in damping capacity of blades. The vibration stress level of a pair of blades in the presence of nick-type damage depends on the relation between frequency detuning of rods and dissipation of energy in material.

Key words: blade, a pair of blades, vibrations, dissipation of energy, coating, damage.

Зиньковский Анатолий Павлович – д-р техн. наук, профессор, зав. отделом Института проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев.

Токарь Иван Гордеевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев.

Круц Вадим Алексеевич – аспирант Института проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев.

Круглий Яна Дмитриевна – канд. техн. наук, научный сотрудник Института проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев.