



# О ВОЗМОЖНОСТЯХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН

А. И. Устинов, А. П. Зиньковский,  
И. Г. Токарь, В. С. Скородзиевский

Изложены результаты экспериментальных исследований по определению влияния характеристик структуры на физико-механические свойства материалов покрытий и демпфирующую способность конструктивных элементов с покрытиями при учете таких факторов, как температура, частота и амплитуда напряжения.

Results of experimental investigations for determination of effect of characteristics of structure on physical-mechanical properties of materials of coatings and damping capability of design elements with coatings with account for such factors as temperature, frequency and amplitude of stress are described.

**Ключевые слова:** покрытие, наноструктура материала; температура; конструктивный элемент; частота колебаний; логарифмический декремент колебаний; динамическая напряженность

**Введение и постановка задачи.** Развитие современного машиностроения предъявляет высокие требования к надежности и долговечности как отдельных конструктивных элементов, так и машин в целом. Поскольку большинство из них эксплуатируются в условиях широкого спектра динамических нагрузок, которые могут вызвать выход из строя и разрушение конструктивных элементов, а также привести к катастрофическим последствиям, то одной из ключевых задач достижения надежного функционирования в течение требуемого ресурса является обеспечение их динамической прочности.

Особенно актуальной эта задача является для авиационных газотурбинных двигателей (АГТД), большинство (более 60 %) дефектов которых, выявляемых при проектировании, доводке и эксплуатации, обусловлены недостаточной прочностью узлов и конструктивных элементов, в первую очередь рабочих лопаток. При этом около 70 % дефектов имеют вибрационное происхождение.

Одним из наиболее важных технико-экономических показателей качества изделий машиностроения является обеспечение их вибрационной надежности. Однако в большинстве случаев вследствие значительной плотности частот собственных и вынужденных колебаний при эксплуатации рассматриваемых объектов невозможно исключение опасных резонансных режимов. Поэтому используют различные конструктивно-технологические способы, снижающие опасность их последствий, среди которых определяющим является повышение

демпфирующей способности как средства ограничения максимальных резонансных напряжений наиболее напряженных конструктивных элементов.

Применительно к рабочим лопаткам компрессоров АГТД, изготавливаемым из высокопрочных с низкими значениями диссипативных свойств титановых сплавов, одним из эффективных способов повышения вибрационной надежности является нанесение на перо высокодемпфирующих покрытий [1]. Поскольку эти сплавы чувствительны к поверхностным повреждениям, покрытия должны также отличаться необходимым комплексом физико-механических характеристик — высокими показателями твердости, предела выносливости, коррозионной стойкости и прочее, т. е. они должны одновременно обеспечивать надежное сопротивление воздействию условий, в которых эксплуатируются конструктивные элементы.

В настоящее время накоплен значительный опыт в создании таких покрытий, которые в той или иной мере удовлетворяют условиям производства и эксплуатации АГТД [2]. Вместе с тем следует отметить, что параметры указанных характеристик материалов, которые можно было бы использовать в качестве высокодемпфирующих покрытий, недостаточны, а их повышение путем легирования или термомеханической обработки, как правило, приводит к ухудшению диссипативных свойств.

С учетом тенденций развития современного авиадвигателестроения, проявляющихся в повышении температуры газа и амплитуд динамических напряжений, расширении спектра частот внешних нагрузок, возникает потребность в создании новых материалов для покрытий. К последним можно отнести разрабатываемые в Институте электрос-

\* Статья подготовлена по результатам выполнения комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» (2007–2009 гг.).



варки им. Е.О. Патона НАН Украины наноструктурированные вакуумные конденсаты (в дальнейшем конденсаты) [3], осаждаемые на конструктивные элементы из паровой фазы по технологии, приведенной в работе [4].

Актуальной задачей с точки зрения возможности применения материалов таких покрытий в производстве рабочих лопаток компрессоров современных АГТД является определение оптимальных параметров структуры их материала и условий осаждения для обеспечения повышения демпфирующей способности лопаток при эксплуатации, что и является целью настоящей работы.

#### Материалы покрытий и способ их получения.

В данной работе в качестве основного материала покрытия выбрали квазикристаллический сплав Al-Cu-Fe, характеризующийся повышенными значениями твердости (10...11 ГПа) и коррозионной стойкости [5, 6], а также медь чистую и с добавками железа (до 4 %). Последние два материала можно использовать как связующий подслои, отличающийся высоким уровнем адгезии с материалом конструктивного элемента и покрытия. Кроме того, наличие меди в составе покрытия обуславливает возрастание рассеяния энергии в колебательной системе, поскольку в наноструктурированном состоянии она отнесется к высокодемпфирующим материалам [7].

Покрытия толщиной 50...150 мкм из выбранных материалов получали по технологии электронно-лучевого испарения и осаждения в вакууме [4]. Осаждение осуществляли на стержневые образцы из титанового сплава ВТ1-0, характеризующегося низкими диссипативными свойствами при значениях температуры до 450 °С [8]. Заготовками для покрытий служили слитки меди и железа, а также таблетки спрессованной смеси порошков алюминия, меди, железа. При осаждении покрытий Cu-Fe испарение металлов осуществлялось из двух мишеней одновременно. Предварительно поверхность образца очищали в вакуумной печи ионным пучком аргона. Скорость осаждения покрытий составляла 2...3 мкм/мин, а их структурное состояние изменялось путем варьирования температуры образца в пределах 160...600 °С.

Осаждение покрытий на компрессорные лопатки АГТД с целью обеспечения их однородности по всей поверхности выполняли в режиме их вращения. Для этого лопатки крепили к горизонтальному валу, вращающемуся в процессе формирования покрытий.

Структуру покрытий исследовали методами сканирующей и электронной микроскопии (прибор CamScan4), а их микротвердость измеряли на поперечных шлифах образцов методом Виккерса с использованием оптического микроскопа Polyvar-Met при нагрузке 0,05 Н длительностью 10 с.

**Основные положения методик исследования диссипативных свойств материалов покрытий и демпфирующей способности конструктивных элементов.** Характеристики рассеяния энергии материала покрытий определяли расчетно-экспериментальным методом. Первоначально по результатам испытаний консолюно закрепленных образцов

с покрытием на установке, приведенной в работе [9], в режиме затухающих колебаний получали амплитудные зависимости логарифмического декремента колебаний. Затем на их основе по расчетной методике работы [10] определяли амплитудные зависимости истинного логарифмического декремента для материала покрытия, т.е. его характеристики рассеяния энергии при однородном напряженном состоянии.

Для определения демпфирующей способности конструктивных элементов использовали созданные в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины экспериментальные средства по изучению диссипативных свойств материалов и конструктивных элементов как при комнатной, так и повышенных значениях температуры [11], обеспечивающих минимизацию потерь энергии в сочленениях, не связанных с гистерезисными потерями в материалах объекта испытаний и покрытиях. Логарифмический декремент колебаний определяли методом резонансной кривой [1].

В качестве объекта испытаний выбрали консолюный образец прямоугольного поперечного сечения ( $h \times b \times l = 4 \times 12 \times 150$  мм). Покрытие наносили только на одну поверхность рабочей части образца по всей ее ширине  $b$  начиная от корневого сечения. Оно имело неизменную длину 50 мм. Испытывали образец при постоянной толщине  $h = 4$  мм и уменьшении длины  $l$  его рабочей части от 150 до 50 мм для достижения необходимой частоты колебаний.

В соответствии с постановкой задачи установлен следующий диапазон изменения параметров испытаний: частота колебаний 150...1000 Гц, температура 20...400 °С (в целом соответствует основным режимам эксплуатации рабочих лопаток компрессора АГТД).

#### Структура и свойства материалов покрытий.

Структуру покрытий из меди изменяли путем варьирования температуры осаждения  $T_c$  в диапазоне 160...600 °С, вследствие чего размер  $D$  зерна (кристаллита) столбчатой формы уменьшался от 4...5 мкм ( $T_c = 600$  °С) до 0,3...0,4 мкм ( $T_c = 160$  °С). При этом обнаружено качественное изменение субструктуры кристаллитов.

Из рис. 1 видно, что с уменьшением температуры осаждения изменяется внутреннее строение кристаллитов, что проявляется в образовании прослойки из двойниковых доменов, расположенных преимущественно параллельно фронту роста кристаллитов (таблица). Количество таких двойников резко возрастает с понижением температуры осаждения начиная с  $T_c \approx 350$  °С [7]. При дальнейшем снижении температуры их количество увеличивается, что приводит к формированию в кристаллитах полидоменной нанодвойниковой субструктуры (рис. 1, а).

Переход к нанодвойниковому структурному состоянию покрытий из меди обуславливает резкое увеличение их микротвердости от 0,8 до 1,5 ГПа [7], а также качественное изменение характеристик рассеяния энергии, что проявляется в существенном ослаблении амплитудной зависимости логарифмического декремента, присущей крупнозернистой меди, с сохранением высоких значений при нагреве (рис. 2).

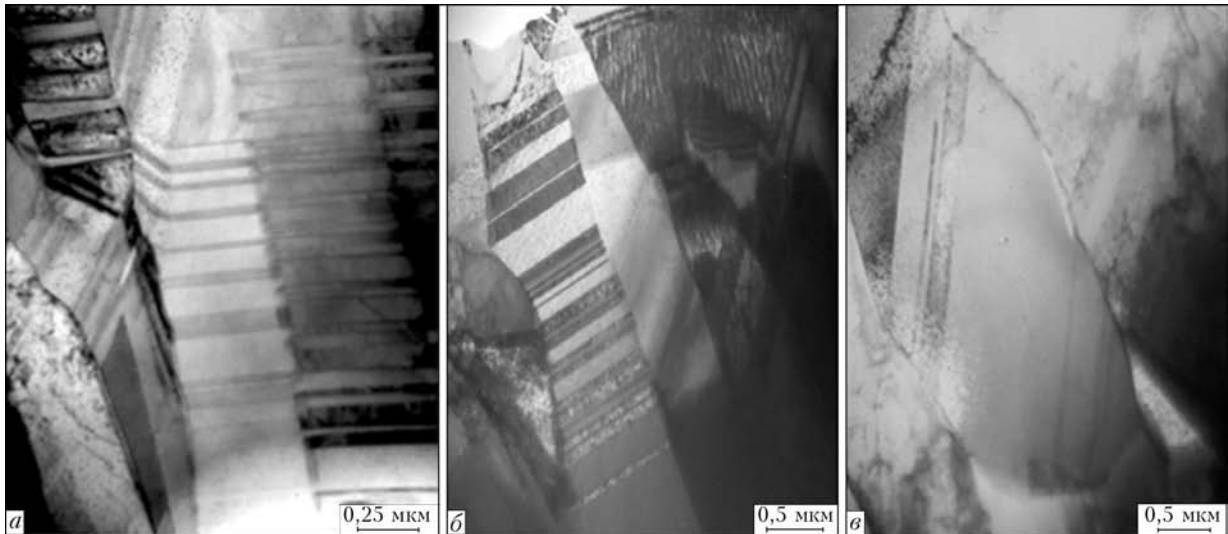


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения поперечного сечения конденсатов меди, осажденных на образец при значениях температуры 170 (а), 230 (б) и 350 (в) °С; а –  $\times 4000$ ; б, в –  $\times 2000$

Кроме того, в отличие от крупнозернистой меди, характеристики рассеяния энергии этих покрытий сохраняются после многократного циклического деформирования.

Дополнительного увеличения микротвердости покрытий (до 2 ГПа) достигают в результате добавления в медь 2...4 % железа. Характеристики рассеяния энергии такого покрытия Cu–Fe в этом случае снижаются при больших амплитудах деформации. Вместе с тем они остаются достаточно высокими и циклически стабильными при температуре испытаний 20...350 °С. При этом зафиксировано почти полное совпадение кривых, полученных в ходе циклического деформирования образцов при температуре 250 °С, с исходной кривой.

Изменение механических и диссипативных свойств покрытий из конденсатов меди и Cu–Fe при формировании в них нанодвойниковой субструктуры обусловлено существенным ослаблением роли внутризеренных дислокаций как в процессе пластической деформации, так и при рассеянии механической энергии.

При размерах структурных элементов примерно 100 нм генерация «свежих» дислокаций в металлах становится невозможной [12]. С другой стороны, с уменьшением размера зерен увеличивается роль зернограничной поверхности, в результате чего в наност-

руктурированных материалах доминирующими становятся механизмы рассеяния энергии, связанные с термически активированной перестройкой атомных конфигураций на границах зерен.

На рис. 3 приведены результаты исследования влияния размера зерна на характеристики рассеяния энергии для покрытий из композитного сплава Al–Cu–Fe. В покрытиях, осаждаемых при  $T_c = 650$  °С, средний размер зерен  $D$  составлял 580 нм. При снижении температуры осаждения до 350 и 270 °С он уменьшался соответственно до 270 и 30 нм. Для покрытий с размерами зерна 580 и 270 нм параметры характеристик рассеяния энергии в интервале значений температуры 20...400 °С оказались невысокими, однако с его уменьшением до 30 нм зафиксировано резкое возрастание декремента колебаний при температуре 250...400 °С (рис. 3).

Особенностью рассматриваемых наноструктурированных покрытий является амплитудно независимый характер вплоть до амплитуд относительной деформации  $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-3}$ , что важно с практической точки зрения. Следует также отметить высокую твердость таких покрытий (15 ГПа) и меньшее значение модуля упругости (177 МПа), по сравнению с покрытием такого же состава с размерами зерна, равными 270 и 580 нм, и модулем упругости соответственно 207 и 210 МПа.

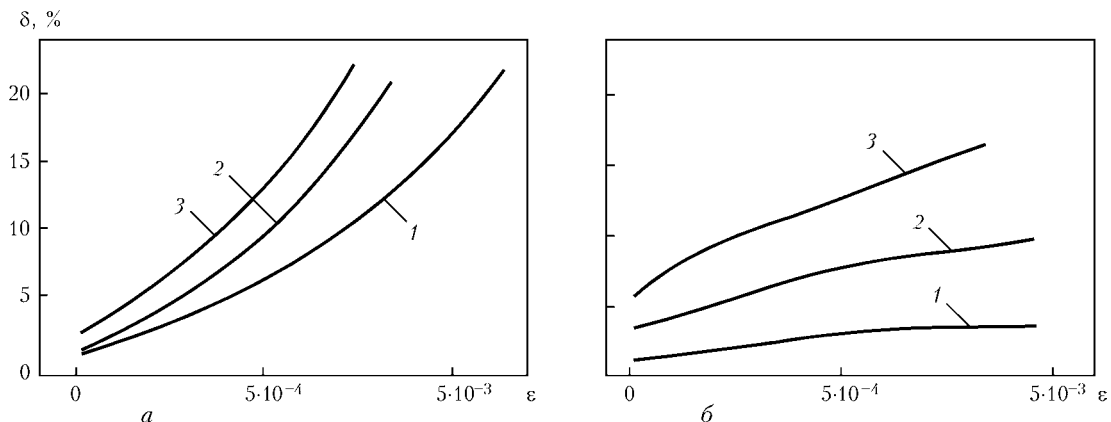


Рис. 2. Амплитудные зависимости логарифмического декремента колебаний для конденсата меди с размером зерна 2,5 мкм (а) и с полидоменной нанодвойниковой субструктурой (б) при значениях температуры 20 (1), 250 (2) и 350 (3) °С

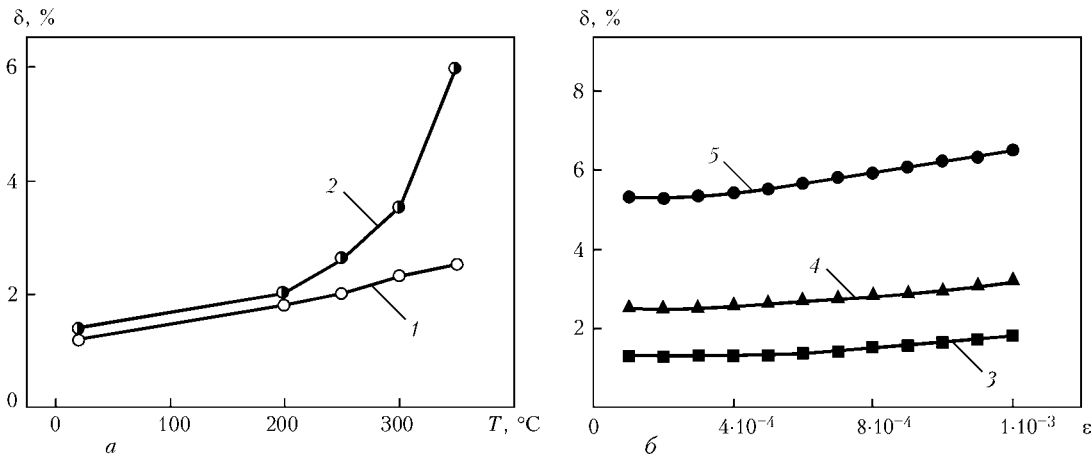


Рис. 3. Зависимости логарифмического декремента колебаний образца с покрытием из сплава Al-Cu-Fe от температуры (а) при амплитуде относительной деформации  $\epsilon = 5 \cdot 10^{-4}$  для размера зерна 580 (1) и 30 (2) нм и от амплитуды относительной деформации (б) при размере зерна 30 нм и варьировании температуры, °С: 3 – 20; 4 – 300; 5 – 350

Таким образом, из результатов проведенных исследований следует, что путем выбора соответствующих режимов электронно-лучевого осаждения на поверхности конструктивных элементов можно формировать наноструктурированные покрытия с повышенным уровнем диссипативных и механических свойств.

**Результаты определения демпфирующей способности конструктивных элементов с покрытиями и их анализ.** Для анализа выбрали три вида покрытий из указанных материалов, характеристики которых приведены в таблице.

По полученным амплитудно-частотным характеристикам образцов определяли значения их логарифмического декремента колебаний и соответствующие его зависимости от амплитуды максимальных напряжений  $\sigma_{max}$  при варьировании частоты колебаний и температуры испытаний для различных значений параметров покрытий. Следует отметить, что при резонансных испытаниях невозможно обеспечить одинаковую частоту колебаний образцов. Но поскольку это расхождение незначительно, то оно несущественно повлияло на анализ результатов испытаний.

Для выполнения сравнительного анализа влияния тех или иных факторов на демпфирующую способность образцов с выбранными покрытиями предварительно определили амплитудные зависимости декремента колебаний для образца без покрытия в заданном диапазоне частот колебаний при комнатной температуре (20 °С), приведенные на рис. 4, а. Из представленных результатов видно, что указанные зависимости носят линейный характер, а влияние частоты колебаний на значение декремента колебаний несущественно при малых амплитудах напряжений и несколько возрастает при их увеличении.

Рассмотрим результаты выполненных испытаний с точки зрения влияния частоты колебаний на демпфирующую способность образцов с выбранными покрытиями.

Анализ амплитудных зависимостей декремента колебаний образцов с однокомпонентными покрытиями (образцы 1–9, полученные при комнатной температуре), соответствующих их определенному

структурному состоянию (рис. 4, б, в), показал, что в данном случае влияние частоты колебаний на значение декремента зависит от типа покрытия. Так, наиболее существенная частотная зависимость декремента колебаний характерна для медного покрытия, особенно при повышенных амплитудах максимальных напряжений. Менее выражена она для образцов с покрытием из железа.

Наглядно влияние частоты на декремент колебаний образцов иллюстрируется частотными его зависимостями, которые для амплитуды максимальных напряжений ( $\sigma_{max} = 50$  МПа) приведены на рис. 5. Здесь по оси абсцисс отложена средняя частота колебаний с учетом невозможности обеспечения при испытаниях ее одинакового значения.

Из представленных результатов испытаний следует, что демпфирующая способность образцов существенно зависит от характеристик микроструктуры.

**Состав покрытий, характеристики их структуры и нанесения на образцы**

№ образца	Состав покрытия	Температура осаждения $T_c$ , °С	Размер зерна $D$ /толщина двойников $d$ , нм	Толщина покрытия $h_{пл}$ , мкм
1	Медь	605	3000	97
2	»	345–350	1400/160	150
3	»	240–245	780/65	170
4	»	600	2800	33
5	»	600	2800	100
6	»	300	1100/105	87
7	»	300	105	72
8	Железо	700	2500	110
9	»	340	70	102
10	Al-Cu-Fe	500	430	53
11	»	500	430	62
12	»	300	110	55
13	»	300	110	58

Примечание. Толщина двойников в конденсатах меди указана в знаменателе.

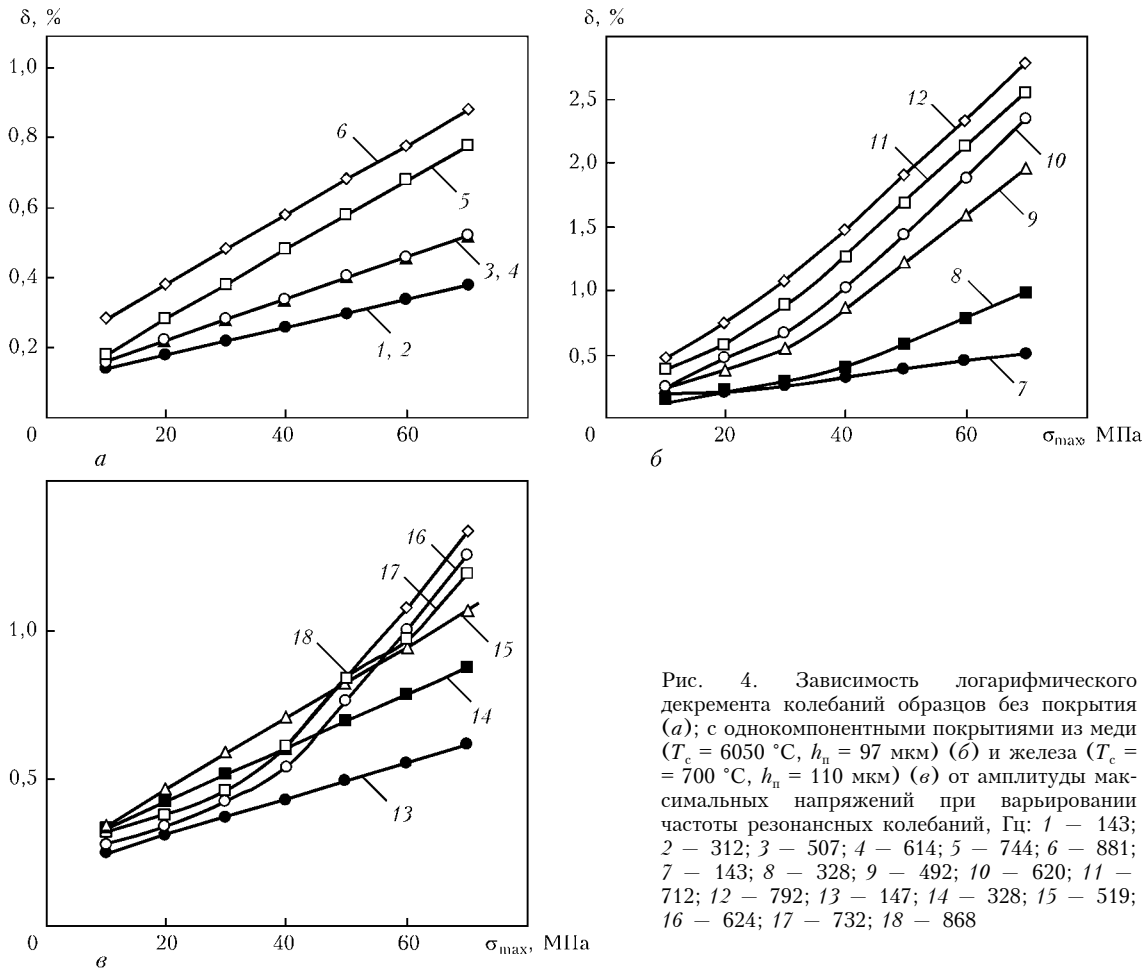


Рис. 4. Зависимость логарифмического декремента колебаний образцов без покрытия (а); с однокомпонентными покрытиями из меди ( $T_c = 6050 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $h_n = 97 \text{ мкм}$ ) (б) и железа ( $T_c = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $h_n = 110 \text{ мкм}$ ) (в) от амплитуды максимальных напряжений при варьировании частоты резонансных колебаний, Гц: 1 – 143; 2 – 312; 3 – 507; 4 – 614; 5 – 744; 6 – 881; 7 – 143; 8 – 328; 9 – 492; 10 – 620; 11 – 712; 12 – 792; 13 – 147; 14 – 328; 15 – 519; 16 – 624; 17 – 732; 18 – 868

В целом на основании полученных данных можно сделать вывод, что частотная зависимость логарифмического декремента колебаний образца больше характерна при осаждении медного покрытия. При этом степень его роста больше выражена для покрытий с крупными зёрнами и более высокими значениями амплитуды максимального напряжения. Для образцов с покрытием из железа указанная зависимость логарифмического декремента от частоты колебаний практически не зафиксирована, особенно при снижении амплитуды максимального напряжения.

В соответствии с постановкой работы, проанализируем результаты исследований по определению совместного влияния частоты колебаний и температуры эксплуатации на демпфирующую способность образцов с покрытиями. Решение задачи рассмотрим на примере покрытия из квазикристаллического сплава Al–Cu–Fe (более вероятного), в сравнении с однокомпонентными, для практической реализации, особенно для рабочих лопаток компрессоров АГТД.

Испытывали образцы при варьировании тех же технологических и эксплуатационных факторов, рассмотренных для однокомпонентных покрытий, а также температуры эксплуатации. Как и для однородных покрытий, получены амплитудные зависимости логарифмического декремента колебаний от амплитуды максимального напряжения, на основании анализа которых установлено, что демпфирующая способность образцов с рассматри-

ваемым покрытием при повышенной температуре может возрасти в три и более раз.

На основе полученных амплитудных зависимостей логарифмического декремента построили диаграмму его изменения в зависимости от частоты резонансных колебаний образца (рис. 6). Как следует из представленных данных, частота колебаний практически не оказывает влияния на демпфирующую способность образца с многокомпонентным покрытием из квазикристаллического сплава Al–Cu–Fe.

**Оценка циклической прочности титановых лопаток с покрытиями из наноструктурированной меди.** Высокий уровень и циклическая стабильность характеристик рассеяния энергии наноструктурированными конденсатами на основе меди, а также хорошая их адгезия по отношению к титановым сплавам позволяют рассматривать данные конденсаты в качестве возможной составляющей промежуточного слоя композитных защитных покрытий для лопаток АГТД.

На основе проведенных испытаний определены технологические режимы осаждения покрытий из меди на титановые лопатки, при которых обеспечивалось их наноструктурированное состояние. Исследовано влияние таких покрытий толщиной 5...10 мкм на устойчивость против разрушения титановых лопаток из сплава ВТЗ-1. Для сравнения, на другую часть лопаток осаждали покрытия из меди с микронным размером зёрен. Испытания проводили при температуре 20 °С и частоте колебаний

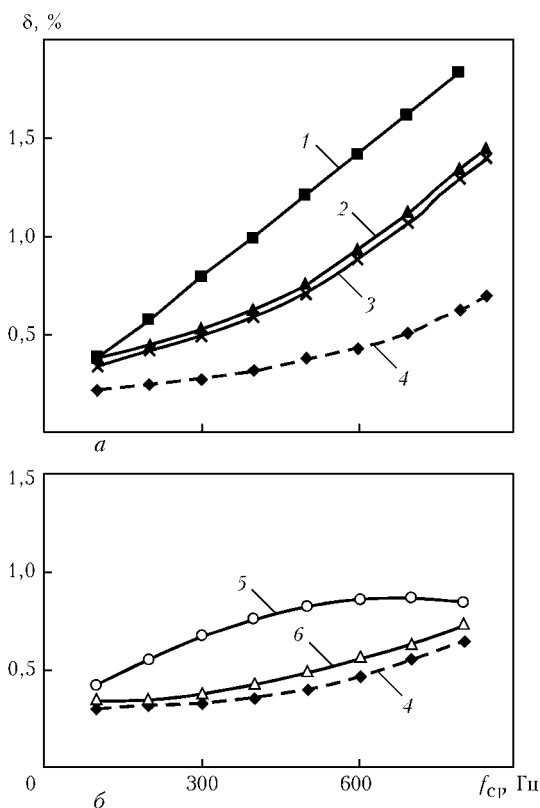


Рис. 5. Зависимость логарифмического декремента колебаний при амплитуде максимальных напряжений 50 МПа образцов с однокомпонентными покрытиями из меди (а) и железа (б) от средней частоты  $f_{cp}$  резонансных колебаний для различных параметров покрытия: 1 –  $T_c = 605$  °С,  $h_n = 97$  мкм; 2 – 350 °С,  $h_n = 150$  мкм; 3 – 245 °С,  $h_n = 170$  мкм; 4 – образец без покрытия; 5 – 700 °С,  $h_n = 110$  мкм; 6 – 340 °С,  $h_n = 102$  мкм

530 Гц. Циклическую усталость лопаток оценивали по ускоренной методике в условиях дискретного повышения амплитуды напряжений после каждых из  $5 \cdot 10^6$  циклов колебаний [13].

Положительное влияние на вибрационную устойчивость лопаток, имеющих покрытия с микронным размером зерен, отмечено для 50 % образцов. В случае же наноструктурированных покрытий положительный результат получен для всех образцов, причем 50 % из них не разрушались вплоть до окончания испытаний.

Приведенные результаты подтверждают предположение о том, что конденсаты на основе наноструктурированной меди могут быть использованы в качестве составляющих композитных покрытий, например связующих слоев между конструктивным элементом и основной частью покрытия.

**Выводы**

1. Показано, что демпфирующая способность образцов с покрытиями существенно зависит от их структуры и параметров получения, в первую очередь от температуры осаждения покрытия, а также частоты колебаний.

2. Установлено, что логарифмический декремент изгибных колебаний образца с наноструктурированным покрытием при повышенной температуре может возрасти в три и более раз, по сравнению с таковым при комнатной температуре.

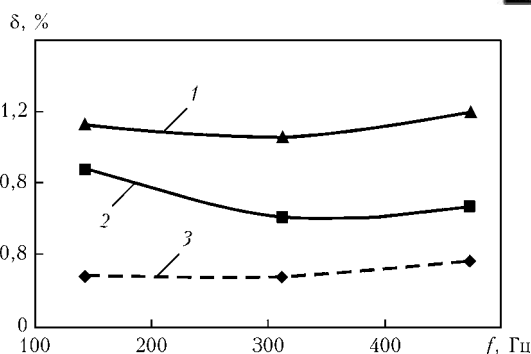


Рис. 6. Диаграмма изменения значения логарифмического декремента колебаний образца с покрытием из сплава Al–Cu–Fe ( $T_c = 500$  °С,  $h_n = 62$  мкм) от частоты  $f$  резонансных колебаний при амплитуде максимальных напряжений 45 МПа и температуре испытаний 350 (1) и 20 (2) °С; 3 – образец без покрытия

3. Необходим дальнейший поиск оптимальных наноструктуры покрытия и параметров ее получения для обеспечения максимальной демпфирующей способности конструктивных элементов машин типа рабочих лопаток компрессоров АГТД в условиях их эксплуатации.

1. Матвеев В.В. Демпфирование колебаний деформируемых тел. – Киев: Наук. думка, 1985. – 263 с.
2. Яковлев А.П. Диссипативные свойства неоднородных материалов и систем. – Киев: Наук. думка, 1985. – 248 с.
3. Устинов А.И., Скородзиевский В.С., Косенко Н.С. Изучение диссипативных свойств однородных материалов, осажденных в виде покрытий. Сообщение 2. Конденсаты меди с различными характеристиками микроструктуры // Пробл. прочности. – 2008. – № 2. – С. 149–159.
4. Paton B.E., Movtchan B.A. Composite materials deposited from the vapour phase in vacuum soviet technologies review // Weld and Surfacing. – 1991. – N 2. – P. 43–64.
5. Effect of the addition of crystalline  $\beta$ -phase in Al–Cu–Fe quasicrystalline coating on their tribological properties / M. Sales, A. Merstallinger, A.I. Ustinov et al. // Surf. and Coat. Tech. – 2007. – N 201. – P. 6206–6211.
6. Mechanical properties of quasicrystalline Al–Cu–Fe coatings with submicron-sized grains / Yu.V. Milman, D.V. Lotsko, S.N. Dub et al. // Ibid. – P. 5937–5943.
7. Ustinov A.I., Skorodzievski V.S., Fesiun E.V. Damping capacity of nanotwinned copper // Acta Materialia. – 2008. – N 56. – P. 3770–3776.
8. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопровитвлению материалов. – Киев: Наук. думка, 1988. – 734 с.
9. Устинов А.И., Мовчан Б.А., Скородзиевский В.С. Исследование демпфирующей способности плоских образцов из титанового сплава Ti–6%Al–4%V с покрытиями из олова и иттрия // Пробл. прочности. – 2001. – № 4. – С. 55–61.
10. Устинов А.И., Скородзиевский В.С., Косенко Н.С. Изучение диссипативных свойств однородных материалов, осажденных в виде покрытий. Сообщение 1. Метод определения амплитудной зависимости истинного декремента колебания материала покрытия // Там же. – 2007. – № 6. – С. 134–143.
11. Прочность материалов и конструкций / А.А. Лебедев, В.Т. Троицкий, В.В. Матвеев и др. – Киев: Академ-періодика, 2005. – 1008 с.
12. Kaschner G.C., Gibeling J.C. Evolution of dislocation glide kinetics during cycling deformation of copper // Acta Materialia. – 2002. – N 50. – P. 653–662.
13. Матохнюк Л.Е. Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением. – Киев: Наук. думка, 1988. – 200 с.

Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев

Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко

НАН Украины, Киев

Ин-т металлофизики им. Г.В. Курдюмова

НАН Украины, Киев

Поступила 14.01.2010