

## **Изучение диссипативных свойств однородных материалов, осажденных в виде покрытий. Сообщение 1. Метод определения амплитудной зависимости истинного декремента колебаний материала покрытия**

**А. И. Устинов<sup>а</sup>, В. С. Скородзиевский<sup>б</sup>, Н. С. Косенко<sup>б</sup>**

<sup>а</sup> Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

<sup>б</sup> Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Киев, Украина

*Предложен метод определения амплитудной зависимости истинного декремента колебаний однородных материалов, осажденных в виде покрытия на подложку прямоугольного сечения. Метод базируется на самосогласованном расчете коэффициентов энергетических потерь для материалов подложки и покрытия с использованием экспериментальных амплитудных зависимостей декремента колебаний для подложки с покрытием, полученных в условиях изгибных колебаний консольных образцов прямоугольного сечения. Применимость метода проиллюстрирована на примере определения значений истинного декремента колебаний сплава Co–20 вес.% Fe, осажденного в виде покрытия на титановый сплав BT1-0.*

**Ключевые слова:** покрытие, подложка, демпфирование, декремент колебаний, самосогласованный расчет.

### **Обозначения**

- $\delta_e$  – декремент колебаний системы подложка–покрытие  
 $\delta_1, \delta_2$  – истинные декременты колебаний материалов подложки и покрытия  
 $A_j$  – амплитуда колебаний свободного конца консольного образца  
 $\varepsilon_{ij}$  – средняя деформация на поверхности  $i$ -го участка при амплитуде колебаний свободного конца образца  $A_j$   
 $\varepsilon_j$  – амплитуда деформации на поверхности образца при колебаниях чистого изгиба  
 $\varepsilon$  – амплитуда относительной деформации при колебаниях чистого изгиба  
 $E_1, E_2$  – модули упругости материалов подложки и покрытия  
 $V_1, V_2$  – объемы материалов подложки и покрытия  
 $V_1^i, V_2^i$  – объемы фрагментов  $i$ -го участка подложки и покрытия  
 $h_1, h_2$  – толщины подложки и покрытия  
 $S_i$  – площадь  $i$ -го участка подложки  
 $K$  – коэффициент, зависящий от формы подложки  
 $I_{(L-i\Delta x)}$  – средний момент инерции сечения  $i$ -го участка образца  
 $L$  – длина образца  
 $N$  – число точек на экспериментально измеряемой амплитудной зависимости декремента колебаний

Применение демпфирующих покрытий для различных деталей машин и механизмов, которые подвергаются интенсивным динамическим нагрузкам, позволяет в значительной мере уменьшить в них уровень вибраций и шумов [1, 2]. При разработке материала для демпфирующих покрытий возникает необходимость в оценке эффективности рассеяния ими энергии колебаний в реальных изделиях. Обычно ее проводят на основе экспериментальных данных путем сравнения характеристик демпфирующей способности композитных образцов, представляющих собой покрытия, осажденные на подложки одинаковой формы и состава [1].

Если характеристики демпфирования материалов композита известны, то эффективность применения покрытий можно оценить теоретически по методу расчета декремента колебаний для системы подложка–покрытие [1, 2]. Вместе с тем такие характеристики получают, как правило, на массивных образцах [3, 4], причем их значения зависят от структурного состояния материала [5]. Поскольку структурное состояние покрытий существенно зависит от технологии и условий их осаждения, прогнозирование диссипативных свойств композитной системы по данным, полученным на массивных образцах со структурой, не свойственной покрытию, может приводить к значительной погрешности. Учитывая вышеизложенное, представляется целесообразным решение “обратной” задачи, т.е. определение истинных значений характеристик демпфирования материала покрытия с использованием экспериментально измеренных данных для композита подложка–покрытие. Применительно к однородным материалам задаче определения истинных значений характеристик демпфирования по экспериментально измеренным амплитудным зависимостям логарифмического декремента колебаний образцов, испытывающих неоднородную деформацию (по толщине и/или по длине), посвящены работы [6–9]. Задача определения диссипативных характеристик материала покрытий по экспериментально измеренным значениям декремента колебаний для образцов подложка–покрытие, испытывающих деформацию чистого изгиба (деформация неоднородна по их толщине), рассматривалась в работах [8, 10, 11] в приближении малого вклада покрытия (тонкие покрытия) в общую упругую энергию системы.

В настоящем сообщении предложен метод расчета амплитудной зависимости истинного декремента колебаний материала покрытия по экспериментальным данным для плоских образцов с покрытиями из этого же материала, включая толстые покрытия, полученным при чистом изгибе, а также в условиях неоднородной (по толщине и длине) деформации покрытия.

**Метод расчета.** Согласно работам [1, 2], величина декремента колебаний для композитной балки подложка–покрытие определяется по выражению\*

\* При такой форме представления  $\delta_c$  не учитывается изменение величины  $E$  в области амплитуд деформаций, соответствующих проявлению дефекта модулей упругости. Если  $\Delta E_1(\varepsilon) > \Delta E_2(\varepsilon)$ , то рассчитываемые по (1) значения  $\delta_2$  будут несколько заниженными, если, наоборот, то завышенными по сравнению с действительными значениями истинного декремента колебаний материала покрытия.

$$\delta_c = \frac{\int_{V_1} \delta_1 \varepsilon^2 dV_1 + E \int_{V_2} \delta_2 \varepsilon^2 dV_2}{\int_{V_1} \varepsilon^2 dV_1 + E \int_{V_2} \varepsilon^2 dV_2}, \quad (1)$$

где  $E = E_2/E_1$ ; знаменатель представляет собой амплитудное значение потенциальной энергии подложки и покрытия; числитель – часть этой энергии, рассеянной в них за один цикл колебаний.

Выражение (1) получено с учетом следующих допущений: подложка и покрытие деформируются в макромасштабе упруго; проскальзывание между ними отсутствует; поперечная деформация слоев пренебрежимо мала.

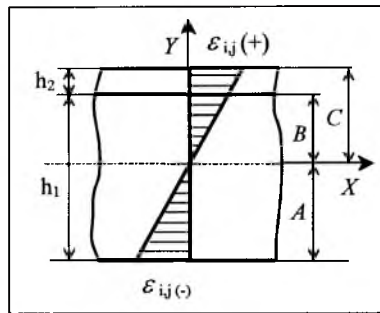


Рис. 1. Схема деформированного состояния двухслойного стержня при чистом изгибе [2].

Используем данное выражение при расчете декремента колебаний для подложки с покрытием в условиях колебаний при чистом изгибе. Представим амплитудные зависимости истинных декрементов колебаний материалов подложки и покрытия в виде полиномов  $\delta_1(\varepsilon) = \sum_n a_n \varepsilon^{n-1}$  и

$$\delta_2(\varepsilon) = \sum_n b_n \varepsilon^{n-1}, \quad \text{где } n = 1, 2, 3, \dots, \text{ и проведем интегрирование по схеме}$$

деформированного состояния образца [2]. Согласно последней положение нейтральной плоскости (на рис. 1 ось  $X$ ) относительно плоскости контакта подложки и покрытия определяется параметрами  $A$ ,  $B$  и  $C$ :

$$A = \frac{h_1(1 + 2EH + EH^2)}{2(1 + EH)}; \quad B = \frac{h_1(1 - EH^2)}{2(1 + EH)}; \quad C = \frac{h_1(1 + 2H + EH^2)}{2(1 + EH)},$$

где  $H = h_2/h_1$ .

После интегрирования выражение (1) преобразуется следующим образом:

$$\delta_c(\varepsilon_j) = \frac{3}{D} \left[ \sum_n \frac{a_n(A^{n+2} + B^{n+2}) + Eb_n(C^{n+2} - B^{n+2})}{(n+2)A^{n-1}} \varepsilon_j^{n-1} \right], \quad (2)$$

где  $D = [A^3 + EC^3 + B^3(1 - E)]$ .

Если согласно сделанным ранее для выражения (1) допущениям погрешность при расчете значений декремента колебаний  $\delta_c(\varepsilon_j)$  не превышает погрешность экспериментально измеренных значений  $\delta_{exp}(\varepsilon_j)$ , то должно выполняться равенство

$$\delta_{exp}(\varepsilon_j) = \delta_c(\varepsilon_j). \quad (3)$$

Поскольку правая часть уравнения (3) функционально связана с параметрами, определяющими значения истинного декремента колебаний материалов подложки и покрытия, возможно решение обратной задачи.

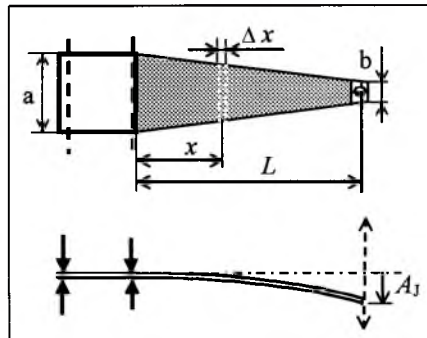


Рис. 2. Форма образца и схема его деформации.

Если амплитудная зависимость истинного декремента колебаний материала подложки известна, то можно аналитически решить систему уравнений типа (2) относительно коэффициентов  $b_n$ . Для этого экспериментально измеренную амплитудную зависимость декремента колебаний подложки с покрытием представим в виде степенного ряда:

$$\delta_{exp}(\varepsilon_j) = \sum_n c_n \varepsilon_j^{n-1}. \quad (4)$$

Подставив (4) в уравнение (2) и приравняв коэффициенты при слагаемых степенного ряда с равными степенями по  $\varepsilon_j$  в его правой и левой частях, получим

$$b_n = \frac{D(n+2)A^{n-1}c_n - 3a_n(A^{n+2} + B^{n+2})}{3E(C^{n+2} - B^{n+2})}. \quad (5)$$

Исследуем случай неоднородной деформации плоского консольного образца переменного сечения\* при изгибных колебаниях (рис. 2). Для этого разобьем его на  $M$  участков малой длины  $\Delta x$ , полагая, что каждый из них деформируется в условиях чистого изгиба. Тогда величину декремента колебаний подложки с покрытием при амплитуде колебаний свободного конца образца  $A_j$  можно записать следующим образом:

\* Форма плоского образца может быть другой.

$$\delta_c(A_j) = \frac{\sum_{i=1}^M \left( \int_{V_1^i} \delta_1(\varepsilon) \varepsilon^2 dV_1^i + E \int_{V_2^i} \delta_2(\varepsilon) \varepsilon^2 dV_2^i \right)}{\sum_{i=1}^M \left( \int_{V_1^i} \varepsilon^2 dV_1^i + E \int_{V_2^i} \varepsilon^2 dV_2^i \right)}. \quad (6)$$

Как и выше, представим амплитудные зависимости истинных декрементов колебаний материалов подложки и покрытия в уравнении (6) в виде полиномов и проведем интегрирование по всему объему образца:

$$\delta_c(A_j) = \frac{3}{D \sum_{i=1}^M S_i \varepsilon_{ij}^2} \sum_{i=1}^M S_i \left[ \sum_n \frac{a_n (A^{n+2} + B^{n+2})}{(n+2)A^{n-1}} \varepsilon_{ij}^{n+1} + E \sum_m \frac{b_m (C^{m+2} - B^{m+2})}{(m+2)A^{m-1}} \varepsilon_{ij}^{m+1} \right]. \quad (7)$$

Величину средней деформации на поверхности образца для каждого  $i$ -го участка при амплитуде колебаний его свободного конца  $A_i$  можно определить с помощью выражения\*

$$\varepsilon_{ij} = \frac{KCA_j(L - i\Delta x)}{I_{(L-i\Delta x)}}. \quad (8)$$

Затем, задавая геометрические размеры подложки с покрытием, собственные значения модулей упругости и истинного декремента колебаний материала подложки и покрытия, можно с помощью выражения (7) рассчитать декремент колебаний  $\delta_c(A_j)$  при заданной амплитуде  $A_j$ . При этом полагаем, как и в случае чистого изгиба образца,

$$\delta_{exp}(A_j) = \delta_c(A_j), \quad (9)$$

где  $j = 1, 2, \dots, N$ ;  $N$  – число точек на экспериментальной кривой  $\delta_{exp}(A_j)$ .

Для решения обратной задачи необходимо, чтобы число  $N$  уравнений типа (9) было не меньше числа искомых неизвестных. В общем случае это условие выполняется, если число точек на экспериментально измеренной кривой не меньше  $n + m$ , что позволяет составить систему  $N = n + m$  уравнений типа (3).

Однако из-за приближений, сделанных при выводе формулы (7), и погрешности экспериментально измеряемых значений декремента колеба-

\* Уравнение (8) получено в рамках теории упругости твердого тела [12] для консольного образца при его статическом нагружении.

ний образца между правой и левой частями уравнения (9) в общем случае имеет место невязка  $\mu_j$ . Поэтому от системы уравнений типа (3) необходимо перейти к системе уравнений

$$\delta_{exp}(A_j) - \delta_c(A_j) = \mu_j, \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (10)$$

Ввиду неопределенности правых частей в системе уравнений (10) ее решение сводится к поиску коэффициентов полиномов, при которых невязка достигает минимального значения для всех точек кривой амплитудной зависимости декремента колебаний, т.е. самосогласуется.

Если исходить из того, что точность определения декремента колебаний не зависит от его величины, то поиск решения необходимо проводить при условии, что все точки на кривой его амплитудной зависимости являются равновзвешенными. Разделив каждое из уравнений (10) на величину декремента колебаний при данной амплитуде  $A_j$ , получим систему уравнений:

$$\frac{\delta_{exp}(A_j) - \delta_c(A_j)}{\delta_{exp}(A_j)} = \frac{\mu_j}{\delta_{exp}(A_j)} = R_j, \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (11)$$

С целью повышения достоверности получаемых решений количество уравнений увеличим до числа экспериментально определяемых точек на кривой амплитудной зависимости декремента колебаний подложки с покрытием. Для всех  $j$  просуммируем правые и левые части уравнений (11), взяв их по абсолютной величине, и разделим на  $N$ :

$$\frac{1}{N} \sum_j \frac{|\delta_c(A_j) - \delta_{exp}(A_j)|}{\delta_{exp}(A_j)} = \frac{1}{N} \sum_j |R_j| = R. \quad (12)$$

По сути, характеристика  $R$  (далее – фактор расходимости) является мерой соответствия между экспериментальными и рассчитанными кривыми, поскольку она представляет собой относительное отклонение экспериментальных значений декремента колебаний от теоретически рассчитанных, усредненное по всему рассматриваемому интервалу амплитуд деформации.

Таким образом, решение уравнения (12) сводится к нахождению функций, описывающих амплитудные зависимости декрементов колебаний материалов подложки и покрытия, при которых фактор расходимости минимальный. Поскольку такую задачу решить аналитически не представляется возможным, использовали численную процедуру поиска глобального минимума функционала, задаваемого правой частью уравнения (12) на неограниченном множестве значений коэффициентов полиномов. Это достигали путем вариации значений искомых коэффициентов полинома и расчета для любого их набора величины  $R$  в уравнении (12), что позволяло определять направление и величину шага для последующих вариаций коэффициентов  $a_n$  и  $b_m$  при фиксированных  $n$  и  $m$ , обеспечивающих минимизацию  $R$ .

**Апробация метода.** Возможность практической реализации предложенного метода проиллюстрируем на примере определения амплитудной зависимости истинного декремента колебаний покрытий из сплава Co–20 вес.% Fe с магнитомеханическим затуханием. Оценка демпфирующей способности этих покрытий проводилась в [13] посредством сопоставления значений декремента колебаний, полученных для образцов без покрытий и с покрытиями. Установлено, что для покрытий из сплава Co–20 вес.% Fe характерна немонотонная амплитудная зависимость декремента колебаний. Поэтому при поиске собственных значений декремента колебаний необходимо использовать полиномы более высокой степени и, следовательно, проводить решение обратной задачи в более “жестких” условиях, чем в случае его монотонной зависимости, т.е. с большим числом искомых параметров.

Приведенные на рис. 3 экспериментальные данные получены для образцов (рис. 1) методом свободно затухающих колебаний при частоте 140...145 Гц на установке, описанной в [14]. Толщина подложки, изготовленной из листового сплава ВТ6, составляла 1,5 мм, толщина покрытий, осажденных из паровой фазы по технологии [15], – 19, 55 и 95 мкм. Покрытия разной толщины осаждались в идентичных условиях и имели примерно одинаковую микроструктуру: столбчатые кристаллиты с поперечным размером зерен 3-4 мкм [13].

Определение коэффициентов  $a_n$  и  $b_m$  в результате решения уравнения (12) возможно при различных фиксированных значениях как  $n$ , так и  $m$ . Для выбора оптимальной степени полинома исследовали изменение фактора расходимости в зависимости от  $m$ . Из рис. 4 видно, что в области  $3 < m < 5$  увеличение степени полинома приводит к резкому уменьшению значений  $R$ . Затем уменьшение  $R$  замедляется, и при  $m \geq 7$  они становятся практически постоянными. Располагая такой зависимостью, можно ограничиться степенью полинома, начиная с которой уменьшение невязки (вследствие увеличения  $m$ ) по сравнению с ее собственным значением становится несущественным. В данном случае это условие выполняется для полинома степени  $m = 6$ .

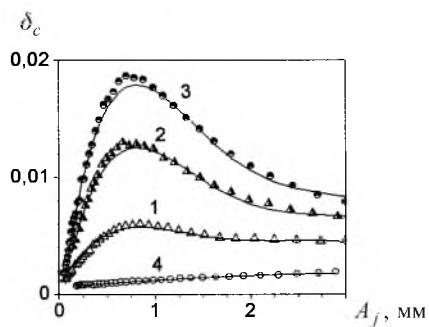


Рис. 3

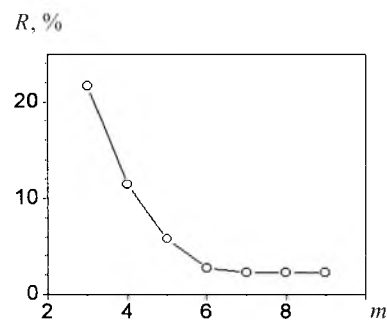


Рис. 4

Рис. 3. Экспериментальные (точки) и рассчитанные по формуле (7) (линии) амплитудные зависимости декремента колебаний образцов с покрытием Co–20 вес.% Fe толщиной 19 (кривая 1), 55 (кривая 2), 95 мкм (кривая 3) и без покрытия (кривая 4).

Рис. 4. Зависимость фактора расходимости от степени полинома, описывающего амплитудную зависимость истинного декремента колебаний покрытия из сплава Co–20 вес.% Fe толщиной 55 мкм.

Для подложки значения коэффициентов  $a_n$  при  $n > 3$  становятся пренебрежимо малыми, и зависимость истинного декремента колебаний материала подложки от амплитуды его деформации можно представить в виде полинома  $\delta_1(\varepsilon) = 0,00058 + 0,96\varepsilon - 205,63\varepsilon^2$ . На рис. 3 представлены экспериментально измеренные и рассчитанные по формуле (7) амплитудные зависимости декремента колебаний для образцов без покрытия\* и с покрытиями разной толщины. В первом случае фактор расходимости составил  $R = 1,6\%$ , во втором –  $R = 2,5...3\%$ . Такое совпадение рассчитанных значений декремента колебаний с экспериментальными свидетельствует о корректности определения указанным выше способом полиномиального представления амплитудных зависимостей истинного декремента колебаний для обоих компонент.

Рассчитанные амплитудные зависимости истинного декремента колебаний для материала покрытия с использованием экспериментальных данных, полученных для подложек с покрытиями из этого же материала, но при различной толщине, представлены на рис. 5. При расчете использовали следующие значения модулей упругости: для сплава ВТ6 –  $E_1 = 110$  МПа [17] и модуль упругости чистого кобальта  $E_2 = 205$  МПа [18] из-за отсутствия данных для сплава Co–20 вес.% Fe. Видно, что кривые удовлетворительно совпадают во всем интервале амплитуд деформации, за исключением относительно больших амплитуд деформации, при факторе расходимости не более 3%. Это позволяет заключить, что для исследуемого интервала толщин покрытий описание деформационного поведения материала покрытия и подложки не выходит за рамки допущений, которые были сделаны при получении выражения (3).

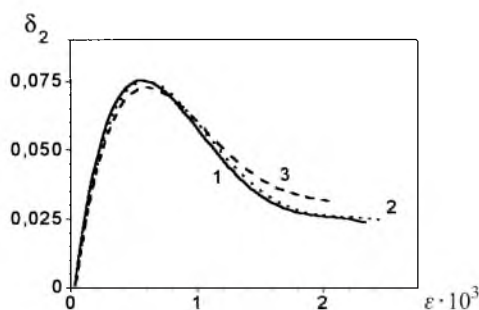


Рис. 5. Амплитудные зависимости истинного декремента колебаний для покрытий Co–20 вес.% Fe, рассчитанные по уравнению (2) с использованием экспериментальных данных (рис. 3) для подложек с покрытиями толщиной 19 (кривая 1), 55 (кривая 2) и 95 мкм (кривая 3).

Непосредственное сравнение рассчитанной амплитудной зависимости истинного декремента колебаний сплава Co–20 вес.% Fe с соответствующими данными, приведенными в литературных источниках для массивных образцов, затруднено из-за различного химического состава исследованных кобальтовых сплавов и использования методик с разным способом нагру-

\* Приведенные на рис. 3 значения декремента колебаний для сплава ВТ6 примерно в два раза выше полученных в работе [16] для сплавов ВТ3-1 и ВТ8, что может быть обусловлено разными структурными состояниями сплавов и используемыми методиками измерения.



жения образцов. Однако значение истинного декремента колебаний исследуемого сплава в области максимума ( $\delta_{\max} = 0,075$ ) сравнимо с полученными значениями  $\delta_{\max}$  для массивных образцов некоторых кобальтовых сплавов. Так, измеренные методом крутильного маятника значения декремента колебаний сплава Co–10 вес.% Mo изменялись в пределах  $\delta_{\max} = 0,035 \dots 0,06$  в зависимости от его структурного состояния [19]. Согласно [20] для отожженного сплава Co–2 вес.% Ni величина декремента колебаний в области максимума затухания составляет  $\delta_{\max} = 0,1$ .

Заметим, что при расчете истинного декремента колебаний сплава Co–20 вес.% Fe дефект модуля упругости, обусловленный переориентацией в силовом поле магнитных доменов [21], не учитывался. Поэтому приведенные на рис. 5 значения истинного декремента колебаний являются несколько заниженными.

Работа выполнена при финансовой поддержке по программе НАН Украины “Наносистемы. Нанотехнологии. Наноматериалы” (проект 16/06-Н).

## Резюме

Запропоновано метод визначення амплітудної залежності істинного декремента коливань однорідних матеріалів, осаджених як покриття на підкладку прямокутного перерізу. Метод базується на самоузгодженому розрахунку коефіцієнтів енергетичних втрат для матеріалів підкладки і покриття з використанням експериментальних амплітудних залежностей декремента коливань для підкладки з покриттям, отриманих в умовах згинальних коливань консольних зразків прямокутного перерізу. Застосування методу проілюстровано на прикладі визначення значень істинного декремента коливань сплаву Co–20 ваг.% Fe, що осаджений як покриття на титановий сплав VT1-0.

1. Яковлев А. П. Диссипативные свойства неоднородных материалов и систем. – Киев: Наук. думка, 1985. – 247 с.
2. Яковлев А. П. Рассеяние энергии в упругих слоистых стержнях при крутильных и изгибных колебаниях // Пробл. прочности. – 1977. – № 11. – С. 92 – 98.
3. Головин С. А., Пушкарь А., Левин Д. М. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. – М.: Металлургия, 1987. – 191 с.
4. Фавстов Ю. К., Шульга Ю. Н., Рахитадт А. Г. Металловедение высокодемпфирующих сплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 271 с.
5. Валиев Р. З., Корзников А. В., Мулюков Р. Р. Структура и свойства металлических материалов с субмикроскопической структурой // Физика металлов и металловедение. – 1992. – № 4. – С. 70 – 86.
6. Povolo F. and Gibala R. Internal friction and modulus defect of materials subjected to inhomogeneous stresses // Phil. Mag. – 1973. – 27. – P. 1281 – 1288.

7. *Asano S.* Analytical expressions of intrinsic internal friction based on damping data under inhomogeneous strains // *Ibid.* – 1974. – **30**. – P. 1155 – 1159.
8. *Матвеев В. В.* Демпфирование колебаний деформируемых тел. – Киев: Наук. думка, 1985. – 263 с.
9. *Asano S.* Strain-amplitude-dependent internal friction and microplasticity in alumina with microcracks // *Phil. Mag.* – 1991. – **65A**. – P. 1187 – 1197.
10. *Berry B. S. and Pritchett W. C.* Internal stress and internal friction in thin-layer microelectronic materials // *J. Appl. Phys.* – 1990. – **67**. – P. 3661 – 3668.
11. *Nishino Y. and Asano S.* The constitutive equations for internal friction in thin-layer materials // *Phys. Stat. Sol. (a)*. – 1993. – **139**. – P. K97 – K100.
12. *Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В.* Справочник по сопротивлению материалов. – Киев.: Наук. думка, 1988. – 734 с.
13. *Устинов А. И., Мовчан Б. А., Лемке Ф., Скородзиевский В. С.* Демпфирующая способность покрытий Co–Ni и Co–Fe, полученных методом электроннолучевого осаждения // *Вибрации в технике и технологиях*. – 2001. – № 4. – С. 123 – 126.
14. *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.
15. *Paton B. E. and Movtchan B. A.* Composite materials deposited from the vapour phase in vacuum // *Sov. Technol. Rev., Section C // Weld. Surf. Rev.* – 1991. – **2**. – P. 43 – 64.
16. *Яковлев А. П., Ройтман А. Б.* Экспериментальное исследование демпфирующих свойств сплавов ВТЗ-1 и ВТ8 со слоистыми металлическими покрытиями // *Пробл. прочности*. – 1981. – № 12. – С. 63 – 66.
17. *Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В.* Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1971. – 375 с.
18. *Григорьев И. С., Мейлихова Е. З.* Физические величины. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
19. *Шаршаков И. М., Никифорова Л. В., Солдатенко Д. Е., Белко В. Н.* Амплитудная зависимость внутреннего трения в двойных сплавах на основе кобальта // *Механизмы внутреннего трения в полупроводниковых и металлических материалах*. – М.: Наука, 1972. – С. 144 – 149.
20. *Постников В. С., Белко В. Н., Шаршаков И. М.* О магнитомеханическом затухании в кобальт-никелевых сплавах // *Внутреннее трение в металлических материалах*. – М.: Наука, 1970. – С. 191 – 197.
21. *Бозорт Р.* Ферромагнетизм. – М.: Изд-во иностр. лит., 1956. – 784 с.

Поступила 04. 07. 2006