

# ПРИМЕНЕНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

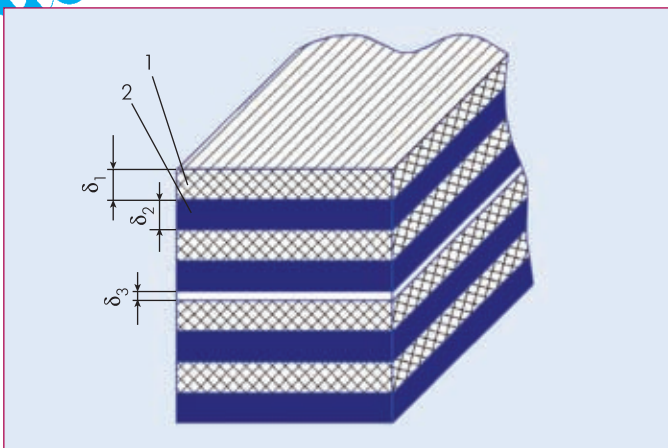
## ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВИБРОУДАРОИЗОЛЯТОРОВ

**В**ысокие темпы развития и все большие возможности электроники приводят к стремительной ее интеграции в различные области деятельности человека. Широкое применение РЭА в технике, в первую очередь при создании мобильных или развертываемых комплексов и различного рода бортовых систем управления, приводит к необходимости ее защиты от виброударных воздействий. Примером мобильных и развертываемых комплексов (как гражданского так и специального назначения) могут быть мобильные медицинские центры для оказания помощи в отдаленных и малонаселенных районах, машины реанимации, оснащенные современным медицинским оборудованием, военные оперативные штабы, штабы МЧС и др.

За последние 10 лет мы стали свидетелями значительной миниатюризации РЭА с одновременным уменьшением ее стоимости. Вместе с тем, за те же 10 лет в области создания виброудароизоляторов (ВУИ) не произошло существенных изменений, которые могли бы привести к уменьшению их массогабаритных характеристик, себестоимости изготовления и повышению надежности. Одними из первых ВУИ, применяемых для защиты РЭА были резиноталлические амортизаторы. Достоинством таких амортизаторов является простота их изготовления, невысокая стоимость и высокая надежность. К недостаткам относятся большие массогабаритные характеристики, невысокие коэффициенты динамичности и высокая собственная частота колебаний ~16 Гц. Наличие указанных недостатков привело к тому, что резиноталлические амортизаторы стали вытесняться тросовыми амортизатора-

ми различных конструкций. Тросовые амортизаторы по сравнению с резиноталлическими имеют значительно лучшие виброчастотные и массогабаритные характеристики, достаточно надежны, их собственная частота колебаний лежит в пределах ~10–15 Гц.

Однако изготовление таких амортизаторов более трудоемко. Относительно новым типом ВУИ являются сборно-композитные амортизаторы с более совершенными техническими характеристиками по сравнению с амортизаторами тросового типа, однако они так же достаточно велики по размерам и массе, трудоемки при изготовлении и обладают относительно высокой стоимостью. Очевидно, что для создания ВУИ нового класса, обладающих массогабаритными характеристиками, соответствующими современным РЭА, надежных и простых в изготовлении необходимы материалы нового типа.



**Рис.1** Структура КМ: 1 – упругий слой; 2 – пластичный слой;  $\delta_1, \delta_2$  – толщина упругого и пластического слоев (от 30 до 140 мкм соответственно);  $\delta_3$  – переходная область (10–15 мкм)

По мнению авторов, такие материалы (речь идет о композитных материалах (КМ), позволяющих сочетать противоположные механические свойства) должны обладать высокой упругостью и высоким коэффициентом поглощения механических колебаний. Наиболее перспективным классом КМ для ВУИ являются КМ на основе наполненных полимеров, как материалов, обладающих изначально высоким коэффициентом поглощения [1].

Однако на пути создания КМ такого рода необходимо преодолеть ряд технических противоречий. Так, например, для увеличения коэффициента поглощения в полимерную матрицу надо вводить достаточно большое количество наполнителя, а саму матрицу делать максимально пластически деформируемой, в то же время для обеспечения упругих свойств материал не должен быть подвержен пластической деформации. Кроме того, многие полимерные материалы резко изменяют свои прочностные и упругопластические свойства в зависимости от температуры окружающей среды.

Без решения проблемы зависимости прочностных и упругопластических свойств полимерных материалов от изменения температуры широкое применение КМ на их основе для создания ВУИ является затруднительным. Еще одной проблемой на пути создания КМ для ВУИ является тот факт, что на сегодня отсутствует математическая модель, достаточно полно и точно описывающая свойства и поведение КМ в процессе эксплуатации в зависимости от его состава и структуры.

Объектом проведенных нами исследований являлся КМ, структурная схема которого приведена на рис.1. По нашему мнению, такая структура позволит реализовать одновременно упругие и вязкие свойства материала.

В качестве слоев, ответственных за создание внутреннего трения, может быть использована стеклоткань или ткань из полиэфирного и полиамидного волокна, пропитанная составами на основе наномодифицированных полиуретанов и синтетических (хлоропреновых и силиконовых) каучуков, содержащих твердые частицы наполнителя для увеличения внут-

реннего трения. Слои, ответственные за упругие свойства материала, образуются при склейке тканей, пропитанных композитами на основе модифицированных эпоксидных смол.

Вначале, для определения характера механизма внутреннего трения в исследуемом КМ на установке для снятия кривых затухания были поставлены опыты с использованием различных типов пропиток для пластичного слоя с высоким внутренним трением.

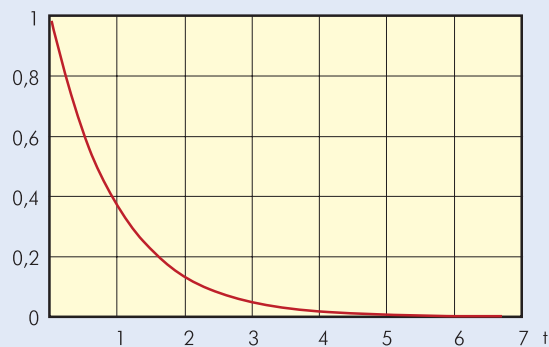
На рис. 2 показаны одна из типичных экспериментальных кривых затухания свободных колебаний, полученных в результате экспериментов, и описывающие ее математические выражения.

Характер кривой затухания свободных колебаний такой же, как в том случае, если бы в колебательной системе присутствовала сила трения, пропорциональная скорости движения. Примером колебательной системы, где возникает сила со-

$$a) \quad x = e^{-nt} [x_0 \cos p_1 t + (x'_0 + nx_0) \frac{1}{p_1} \sin p_1 t]$$

$$x'_0 = J/m$$

$$x = \frac{J}{mp_1} e^{-nt} \sin p_1 t$$

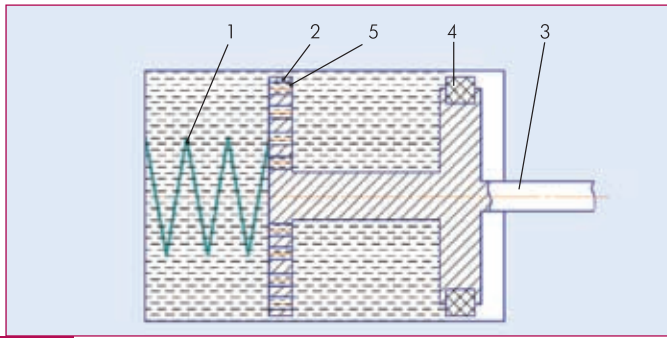


$$b) \quad x = Ae^{-nt}$$

$$n = \frac{\tau_1}{\ln(A_k/A_{k+1})}$$



**Рис.2** Кривая затухания механических колебаний системы с КМ (а) и соответствующий ей закон затухания (б) ( $x$  – перемещение системы в момент времени  $t$ ;  $x_0$  – начальное перемещение соответствует величине  $1/2 \cdot A_0$ ;  $x'_0$  – начальная скорость колебания системы;  $p_1$  – частота колебаний системы;  $J$  – импульс единичной силы,  $m$  – масса системы,  $\tau_1$  – период затухающих колебаний;  $A$  – амплитуда колебаний)



**Рис.3** Схема гидравлического амортизатора: 1 – пружина, 2 – поршень с перепускными отверстиями (система каналов), 3 – передающий элемент, 4 – сальниковое уплотнение, 5 – отверстия в поршне

противления, эквивалентная скорости движения, может служить гидравлический амортизатор (рис.3).

Для того чтобы провести аналогию между системой, где в качестве упругого элемента используется пружина из КМ изучаемого класса, и гидравлическим амортизатором, рассмотрим балку, выполненную из такого КМ и жестко закрепленную одним концом (рис.4).

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta_0, \quad (1)$$

$$\gamma = \delta \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

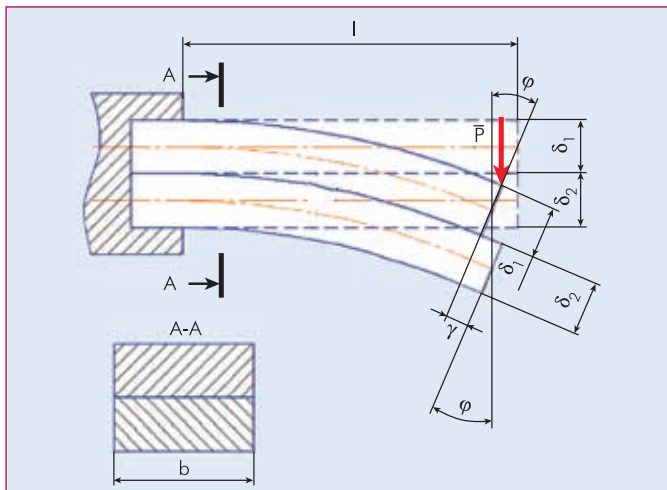
$$\varphi = (Pl^2)/(2EJn), \quad (3)$$

$$\gamma = \delta \operatorname{tg} [(Pl)/(2EJn)], \quad (4)$$

$$J = (b\delta^3)/12, \quad (4)$$

где  $\delta$  – толщина приведенного слоя;  $l$  – длина образца,  $E$  – модуль упругости для материала упругого слоя с учетом влияния пластичного слоя;  $J$  – момент инерции сечения 1-й пластины;  $\delta$  – толщина пластины;  $b$  – ширина пластины;  $n$  – количество пластин в образце;  $\gamma$  – линейное смещение;  $\varphi$  – угол смещения.

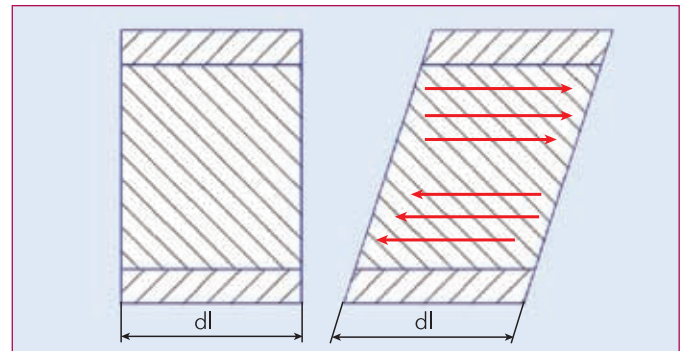
Если балку нагрузить, она прогнется на угол  $\varphi$ , смещение двух близлежащих упругих слоев относительно друг друга составит величину  $\gamma$ . Упругие слои КМ будут выполнять роль пружины в гидравлическом амортизаторе, при этом на участке длины балки смещение упругих слоев относительно друг друга будет линейным и в одной плоскости. При небольших



**Рис.4** Определение смещения упругих слоев друг относительно друга

смещениях упругих слоев относительно друг друга поведение пластичного слоя может быть описано, как поведение вязкой жидкости при течении ее в системе узких каналов. Рассмотрим единичный пластичный слой на участке между двумя упругими слоями (рис.5).

При смещении упругих слоев возникает ламинарное течение псевдожидкости, причем частицы наполнителя эквивалентны молекулам жидкости, а полимерная матрица обеспечивает "межмолекулярное взаимодействие". При таком смещении часть механической энергии будет рассеиваться в тепловую вследствие пластичной деформации полимерной матрицы.



**Рис.5** Единичный пластичный слой

В теории механических колебаний коэффициентом поглощения  $\psi$  принято называть величину, равную отношению энергии, рассеиваемой за один период гармонического колебания, к максимальной упругой энергии, которой обладает система. В рассматриваемом случае коэффициент поглощения будет численно равен величине, называемой в гидродинамике потерями на трение. Используем формулы гидродинамики [4] для жидкости, текущей в канале:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda \frac{L}{d_{\text{эКВ}}} \frac{w^2 \rho}{2}, \quad (5)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[ \left( \frac{\varepsilon}{3,7} + \frac{16,81}{\operatorname{Re}} \right)^{0,9} \right], \quad (6)$$

$$\varepsilon = e/d_{\text{эКВ}}, \quad (7)$$

$$\operatorname{Re} = w \rho d_{\text{эКВ}} / \mu, \quad (8)$$

где  $\Delta P_{\text{тр}}$  – потери на трение;  $\lambda$  – коэффициент трения;  $\rho$  – плотность жидкости;  $\mu$  – ее вязкость;  $\operatorname{Re}$  – критерий Рейнольдса;  $w$  – скорость жидкости в канале;  $d_{\text{эКВ}}$  – эквивалентный диаметр канала;  $L$  – длина канала;  $\varepsilon$  – безразмерный коэффициент;  $e$  – усредненная высота неровностей стенок канала. Модифицируем эти формулы для нашего случая:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda S \frac{w^2}{a}, \quad (9)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[ \left( b + \frac{19,44}{q} \right)^{0,93} \right], \quad (10)$$

$$\psi = \frac{\Delta P_{\text{тр}}}{2A_x C}, \quad (11)$$



где  $a$  – коэффициент, зависящий от рабочей частоты;  $b$  – коэффициент, зависящий от концентрации наполнителя, его вида, формы и размера частиц;  $q$  – коэффициент, зависящий от концентрации наполнителя, соотношения плотностей материала наполнителя и материала непрерывной фазы, толщины пластичного слоя;  $A_k$  – амплитуда  $k$ -го колебания;  $C$  – жесткость пружины.

Скорость псевдожидкости будет равна скорости смещение граничных упругих слоев относительно друг друга:

$$w = \gamma F, \quad (12)$$

где  $F$  – рабочая частота в герцах.

Для определения коэффициента поглощения в конструкции из КМ необходимо решить систему уравнений (3), (4), (9), (10), (11), (12) для  $N$  пар упругих слоев, составляющих образец КМ. Результаты расчетов (табл.1) с использованием математических уравнений (9), (10), (11), (12) достаточно точно подтверждаются экспериментально, что может свидетельствовать о корректности сделанных допущений.

Для расчета упругих свойств КМ надо учитывать, что жесткость балки является суммой жесткости элементарных упругих элементов и жесткости, возникающей за счет растяжения пластичного слоя (рис.6). Этот же вывод можно распространить и на другие упругие композиционные элементы конструкций.

Следует отметить, что механические свойства элементарного упругого слоя определяются суммой свойств основного материала упругого слоя и характером взаимодействия материалов упругого и пластичного слоев на границе раздела фаз [2]. Для увеличения силы сцепления слоев нами опробована микромодификация поверхности наноструктурами. При этом надо учитывать, что согласно "тезисам о нанотехнологии" Национального Научного Фонда США ([WWW.nsf.gov/nanoscale-science-and-engineering.htm](http://WWW.nsf.gov/nanoscale-science-and-engineering.htm)) "...В некоторых частных случаях критический масштаб размеров для новых свойств и явлений может быть ...больше, чем 100 нанометров. Например, частицы армированного полимера имеют уникальные особенности (т.е. свойства, не характерные для макрообъемов непрерывных фаз вещества – прим. авторов) при ~200–300 нм. Эти особенности возникают вследствие образования локальных мостов или границ между наночастицами и полимером". В нашем случае речь идет о наноструктурах размерами от 40 до 300 нм, что согласуется с вышеизложенным тезисом.

**Таблица 1**

№ опыта	Коэффициент поглощения (данные эксперимента)	Коэффициент поглощения (расчетное значение)
1	2,84	3,12
2	2,96	3,00
3	4,31	4,40
4	3,80	3,71

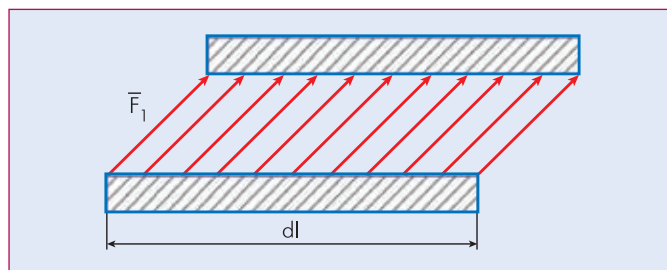
\*Коэффициенты поглощения определялись для одной и той же амплитуды колебания.

**Таблица 2**

№ опыта	Тип наполнителя	Содержание наполнителя, % масс.	Коэффициент затухания
1	Алюминиевая пудра	20	2,37
2		60	2,75
3		70	2,90
4		80	4,73
5		92	3,90
5	Слюда	30	2,41
6		62	2,97
7		80	3,83
8		87	3,68

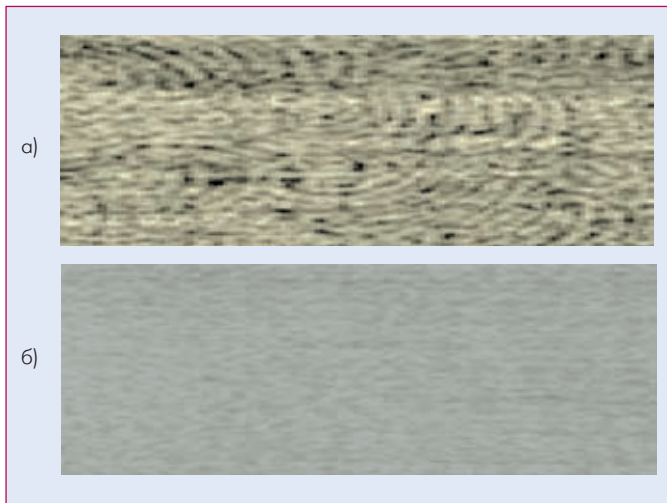
Сущность технологии предложенной нами микромодификации состоит в обработке поверхности пластичных слоев перед их склеиванием суспензией наночастиц в полярном растворителе, или, что по нашему мнению, более перспективно, ввод в полимерную матрицу композиции на основе кремни-органических и металлоорганических соединений.

Введенные в полимерную матрицу вещества способны разлагаться на поверхности пластического слоя под кратковременным действием УФ-излучения с образованием ориентированных нанокластеров. Варьируя концентрации вводимых элементарных добавок (от 0,1 до 0,9 %), время действия УФ-излучения (от 1,5 до 40 с) и длину его волны, можно добиваться различных параметров образуемых наноструктур. Методологию такой микромодификации мы рассмотрим в следующей статье. Здесь же заметим, что жесткость одного из образцов (полиуретановый вязкий и эпоксидно-полиэфирный упругий слой), выполненного без использования модификации, составляла 12 Н, а с использованием такой технологии его жесткость возросла до 16,6 Н.



**Рис. 6** Возникновение дополнительной жесткости в КМ

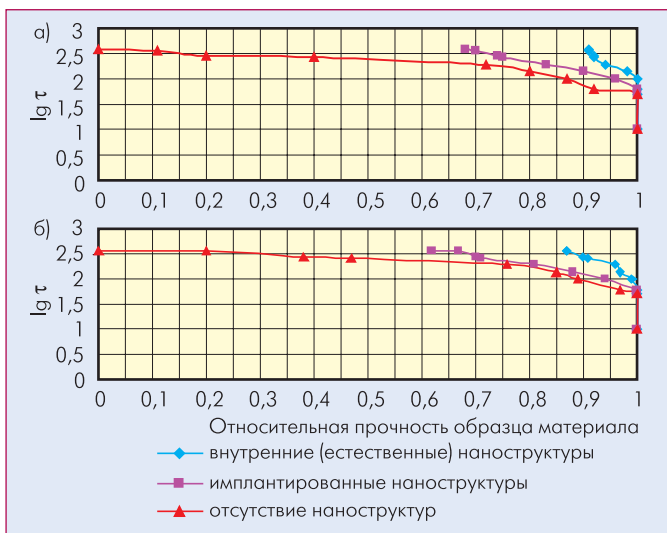
Для изучения влияния концентрации наполнителя в пластичном слое КМ на величину коэффициента поглощения была поставлена серия экспериментов, где использовались КМ, обладающие одинаковыми по свойству и составу упругими, но разными пластичными слоями (различие состояло в проценте содержания и типе наполнителя). В табл.2 представлены результаты опытов с использованием наиболее распространенных видов наполнителя (всего нами было опробовано 8 типов наполнителя). Установлено, что наиболее оптимальным является средний размер частиц наполнителя порядка 30–50 мкм, а количество наполнителя должно составлять 68–80%<sub>об</sub> от полимерной непрерывной фазы.



**Рис.7** Срез пластического слоя до (а) и после (б) усталостных испытаний

После того, как образец подвергался испытаниям на усталость (методом циклической нагрузки), наблюдалось снижение его коэффициента поглощения более чем на 40%. Значительное снижение величины затухания объясняется уменьшением сил взаимодействия между средой полимерной матрицы и зерном наполнителя, а также потерями свойств материала самой полимерной матрицы вследствие образования микротрещин. Образование микротрещин подтверждается результатами дефектоскопического анализа (рис.7).

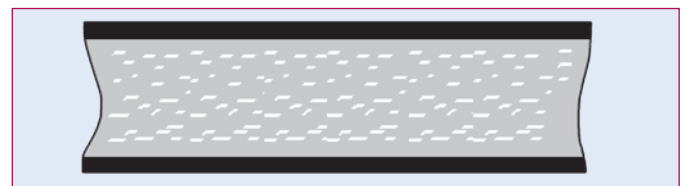
Сделанный нами вывод согласуется и с результатами исследований, согласно которым первичной формой повреждения КМ является развитие трещин в полимерной матрице [4,3]. Наиболее перспективным способом борьбы с образо-



**Рис.8** Временная зависимость прочности материалов на основе эпоксидного (а) и полиуретанового (б) полимеров. Относительная прочность равна отношению начальной прочности и прочности на момент времени  $t_i$  после начала воздействия комплекса агрессивных факторов. ("Имплантированные наноструктуры" – частицы вещества, отличные по химическому составу от основного материала и имеющие размеры 40–100 нм. "Естественные наноструктуры" – кластеры химического состава, эквивалентного основному материалу с размером до 300 нм)

ванием микротрещин является повышение уровня пластической деформации полимерной матрицы перед фронтом наступающей ударной или усталостной трещины путем повышения адгезионной прочности на границах раздела фаз и удельной энергии разрушения ПКМ [5,6]. Нами разработаны эффективные способы борьбы с указанными явлениями, которые заключаются в вводе в полимерную матрицу наночастиц (например кремния или углерода) или создании в ней надмолекулярных полимерных образований, являющихся естественными наноструктурированными объектами.

На рис.8 приведены кривые, характеризующие прочностные свойства образцов неармированных материалов на основе эпоксидного и полиуретанового связующих, содержащих наноструктуры различных типов и размеров. Принципы ввода в полимерную матрицу заранее синтезированных (имплантированных) наночастиц не являются новыми и положены в основу технологий создания многих КМ, разработанных ВИАМ. Создание внутренних (естественных) наноструктур исследовано в значительно меньшей степени, хотя их применение при равном конечном результате значительно более экономически оправдано.



**Рис.9** Схема оптимальной ориентации частиц наполнителя в пластичном слое

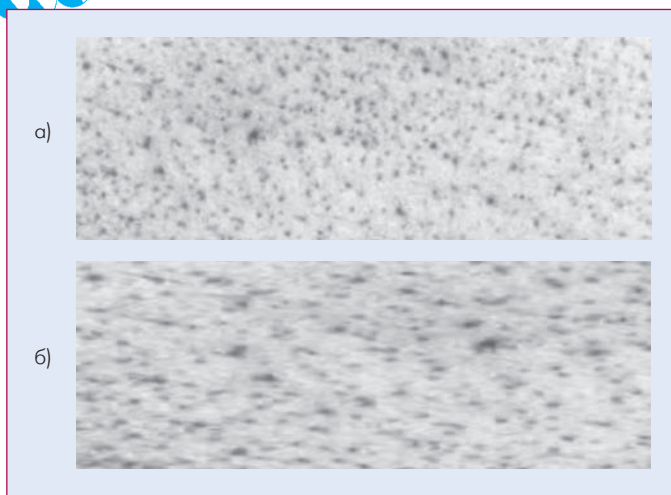
Образование естественных надмолекулярных наноструктур достигается за счет ввода в полимерную матрицу на стадии полимеризации тетраэтилсиликата с последующей его гидролитической поликонденсацией и образованием гелевой фазы. В результате такой поликонденсации образуются поликремниевые кислоты линейной, разветвленной и смешанной структур с взаимным проникновением в межмолекулярную структуру полимера.

Авторам статьи в результате исследований удалось определить, что максимальный упрочняющий эффект достигается при значении величины  $r$  порядка 16–18. Величина  $r$  определяется по предложенной нами полуэмпирической формуле:

$$r = a \frac{C_{Si(ET)_4} C_{H_2O}}{1 - 0,12 C_{H_2O}}, \quad (13)$$

где  $a$  – коэффициент, учитывающий особенности предполимерной среды (для большинства полиуретанов его величина равна 0,87, для эпоксидов – 0,98)  $C_{Si(ET)_4}$ ,  $C_{H_2O}$  – концентрации (в расчете моль/л) тетраэтилсиликата и воды.

Учитывая вышеописанное поведение пластичного слоя, нами было установлено, что частицы наполнителя должны иметь пластинчатый или чешуйчатый вид и ориентироваться в матрице, как это показано на рис.9.



**Рис. 10** Ориентация пластин наполнителя в полимерной матрице без (а) и с наномодификацией (б)

Для достижения максимально возможной доли ориентированных частиц в непрерывной фазе полимера (рис.10) и повышения силы сцепления "полимерная матрица"—"частица наполнителя" мы разработали технологии создания на поверхности зерна наполнителя нанослоя из поликремниевой кислоты, углерода либо фтораминопроизводных ПАВ.

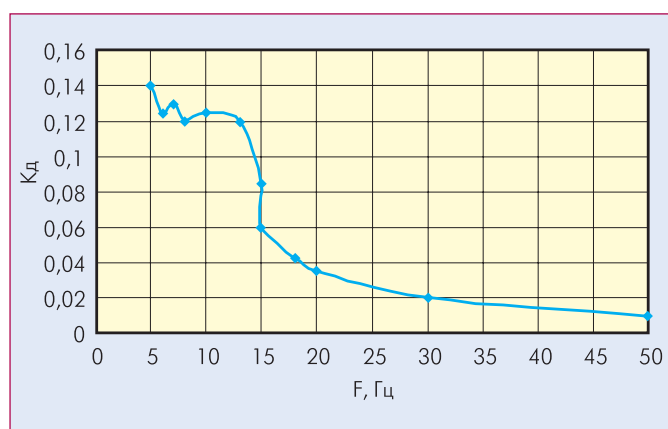
В основе разработанных нами технологий лежит принцип, согласно которому на частицы наполнителя из раствора наносят вещества, являющиеся инициаторами роста на его по-



**Рис. 11** Опытный образец ВУИ на вибростенде

верхности нанокластеров. При этом образование наноструктур происходит непосредственно на стадии отверждения полимерной матрицы. Предложенный нами принцип позволяет упростить технологический процесс и избежать ряд трудностей, связанных со стабилизацией вводимых наноструктур. В следующей статье, посвященной теме практического изготовления и конструирования ВУИ, нами будут рассмотрены технологические аспекты такого модифицирования частиц наполнителя.

Механизм ориентации частиц наполнителя и повышения их взаимодействия с непрерывной полимерной фазой заключается в образовании высокоориентированного слоя полимера вокруг зерна наполнителя, отвечающего минимуму свободной энергии системы в данной точке.



**Рис. 12** АЧХ испытываемого ВУИ (Kд – коэффициент динамичности. На частотах ниже 50 Гц – Kд менее 0,01. Значение Kд, равное 0,1, означает, что ударное или вибрационное воздействие на амортизируемый объект снижено по сравнению с исходным в 10 раз)

В начале статьи была отмечена важность решения проблемы зависимости механических свойств полимерных материалов от температуры. Разработанные нами методы наномодифицирования одновременно с упрочнением полимерного материала позволили существенно расширить его рабочий температурный диапазон. Кроме того, сама предложенная тонкослойная структура КМ способствует эффективному решению указанной задачи.

На вышеизложенных принципах была сконструирована и изготовлена опытная партия образцов ВУИ (рис.11) со следующими характеристиками: габаритные размеры – 35×24×6,3 см; масса амортизирующего элемента – 24,2 г; его высота – 5,1 см; полезная нагрузка – 18 кг.

Проведенные испытания на вибростенде показали высокую амортизирующую способность упругих элементов из КМ, что подтверждается полученной АЧХ, приведенной на рис.12.

В заключение следует отметить, что по своим характеристикам испытанные амортизаторы превосходят существующие. Кроме того, после окончательной отработки технологии их изготовления себестоимость разработанных амортизаторов

будет приблизительно в четыре раза ниже традиционных тросовых амортизаторов. В ближайшее время планируется завершение организации опытного производства ВУИ на основе разработанных КМ и проведение их испытаний при эксплуатации радиоэлектронных устройств.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Крагельский И. В.** Трение и износ, 2 изд. – М.: 1968.
2. **Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А.** Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1987г., с.11
3. **Андреевский Р.А.** Наноматериалы: концепция и современные проблемы // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И.Менделеева), 2002, т. XLVI, №5, с.50-56.
4. **Attia O., Kinloch A.J., Matthews F.L.** Modelling the fatigue life of polymer-matrix fibre-composite components // Composites Science and Technology, 2001, v.61, p. 2273-2283.
5. **Деев И.С., Кобец Л.П.** Структурообразование в на-полненных терморезактивных полимерах // Коллоидный журнал, 1999, т. 61, № 5, с. 650–660.
6. **Ильченко С.И., Гуняев Г.М., Румянцев А.Ф., Деев И.С., Алексахин В.М.** Изостатическое формование полимерных композиционных материалов // В сб.: Авиационные материалы и технологии. – М.: ВИАМ, 2002, с. 40–44.

## НОВЫЕ КНИГИ

**Нано- и микросистемная техника.  
От исследований к разработкам.**

**Сборник статей под редакцией д.т.н., профессора П.П. Мальцева**

Москва: Техносфера, 2005. ISBN 5-94836-063-6

Ежемесячному междисциплинарному теоретическому и прикладному научно-техническому журналу "Нано- и микросистемная техника" исполнилось пять лет.

Наиболее цитируемые статьи, опубликованные в журнале с ноября 1999 г. по март 2005 г., сгруппированы в соответствии с названием рубрик и позволяют проследить развитие от микро- к наносистемной технике в России. В книге рассмотрены общие вопросы, технологии формирования наноструктур, методы исследования наноструктур, метрологическое обеспечение, основы технологии, моделирование и конструирование компонентов нано- и микросистемной техники, перспективы их применения.

Монография представляет интерес для ученых, инженеров и преподавателей высшей школы, аспирантов и студентов, специализирующихся в области микро- и наноэлектроники, микро- и нанотехнологии, микро- и наносистемной техники.

#### Как заказать наши книги?

По почте: 125319 Москва, а/я 594

По тел./факсу: (495) 956-3346, 234-0110

E-mail: knigi@technosphaera.ru; sales@technosphaera.ru