

## Проектирование состава наполненного вибропоглощающего материала

В. Д. Черкасов, Ю.В. Юркин, В. В. Авдонин

---

Предложена модель наполненного вибропоглощающего материала, установлена зависимость диссипативных свойств композита от степени его наполнения. Теоретические результаты исследований подтверждены экспериментально на образцах, в которых в качестве полимерного вяжущего применяли эпоксидную смолу ЭД-20, отвердителя — полиэтиленполиамин (ПЭПА) и наполнителей — слюду молотую разных марок, мел, опилки древесные. По экспериментальным зависимостям установлено, что при содержании наполнителя 30 об. % композит обладает наименьшими диссипативными свойствами. Однако при увеличении количества наполнителя более 40 об. % диссипативные свойства материала начинают резко улучшаться за счет появления дополнительных механизмов рассеивания энергии (в частности, за счет трения между частицами наполнителя). Установлены частотные диапазоны эффективного вибропоглощения каждого из указанных наполнителей.

**Ключевые слова:** проектирование состава, вибропоглощающий материал, композит, наполнитель, коэффициент потерь, эпоксидная смола.

---

### Введение

В настоящее время вибропоглощающие материалы листового типа наиболее широко применяют для гашения вибрации и шума на тонкостенных металлических конструкциях, таких как внешние и внутренние элементы автомобилей, судов, самолетов [1, 2], бытовых приборов [3]. В таких материалах эффективность диссипации энергии зависит в основном от двух факторов [4, 5]: диссипативных свойств полимерного композиционного материала (ПКМ) и конструктивного вибропоглощения.

В состав ПКМ такого типа, как правило, входят: полимерная матрица, наполнители, пластификатор и добавки.

В качестве полимерной матрицы вибродемпфирующих покрытий применяют разные полимерные материалы: битум, полиуретан, поливинилацетат, мочевиноформальдегидная смола, бутиловый каучук, полиэфирная смола, производные и смеси перечисленных полимеров [6].

Введение наполнителей изменяет и усложняет структуру полимера, вызывая изменение всех его свойств, улучшая или ухудшая их показатели по

сравнению с исходными материалами [7]. В [8] показано, что применение футеровок для гашения вибрации из эластомеров без наполнителей малоэффективно из-за низкого модуля упругости.

В работах [9, 10] показано, что увеличение диссипативных свойств композита с увеличением степени наполнения обусловлено тем, что при введении в полимер наполнителей вокруг частиц последнего происходит ограничение подвижности макромолекул и образование граничного или межфазного слоя.

Влияние твердой поверхности наполнителя обусловлено уменьшением числа возможных конформаций макромолекул в межфазном слое, изменением времени релаксации, повышением или понижением температуры стеклования  $T_c$ , увеличением плотности упаковки молекул [9].

В качестве таких наполнителей для вибропоглощающих ПКМ могут быть использованы самые разнообразные вещества и материалы, содержание которых в композите так же может меняться в широком диапазоне.

Немаловажное влияние на диссипативные свойства композитов оказывает форма частиц

наполнителя. В [11] представлена классификация наполнителей для полимерных материалов по форме дисперсных частиц:

- сферические (аэросил, стеклосферы, оксиды металлов, мел);
- кубические (полевой шпат);
- призматические (кальцит, кварц, оксид бария);
- пластинчатые или чешуйчатые (слоды, графит, тальк);
- волокнистые или игольчатые (стеклянное волокно, базальт, асбест).

В [12] изучено влияние наполнителя и его формы на диссипативные свойства мастик. Было установлено, что наибольшими вибропоглощающими свойствами обладают материалы с чешуйчатыми и волокнистыми наполнителями. К чешуйчатым наполнителям относятся слюда, каолин, графит, стеклянные чешуйки, алюминиевая пудра и прочие. Эластомеры и другие полимеры, наполненные чешуйками, обычно обладают повышенными диссипативными свойствами. В [13] сделано предположение, что, это обусловлено трением одного слоя чешуек относительно другого в процессе циклического деформирования полимерного композиционного материала.

Немаловажное значение на вибропоглощающие характеристики оказывает количество наполнителя, по этому признаку полимерные композиционные материалы подразделяют на малонаполненные и высоконаполненные [14]. В первых частицы наполнителя отстают друг от друга на некотором расстоянии и не оказывают никакого взаимного влияния. Наполнители в них слабо воздействуют на свойства материала (содержание наполнителя 0 – 35 об. %). С увеличением содержания отдельные частицы наполнителя сближаются и их граничные слои начинают взаимодействовать между собой, образуя в зазорах пленочную структуру матрицы, которая отличается усиленной прочностью по сравнению со структурой объемной матрицы. Это происходит в результате уменьшения сегментальной подвижности полимера вокруг частицы наполнителя.

В [13] описано три основных механизма, по которым наполнители могут оказывать благоприятное воздействие на диссипативные свойства композита:

- трение между контактирующими частицами наполнителя, например в агрегатах частиц;
- трение между полимером и наполнителем при отсутствии адгезии между ними;
- повышение механических потерь в полимере вблизи границы раздела вследствие возникновения остаточных температурных напряжений в нем или

изменения его структуры в поле действия поверхностных сил наполнителя.

Цель данной работы — проектирование состава ПКМ, и в частности, определение теоретической зависимости диссипативных свойств материала от степени его наполнения, практическое определение наиболее эффективных наполнителей.

### Теоретическая часть

Наполненные полимерные композиционные материалы представляют собой гетерогенные, гетерофазные системы, свойства которых зависят от свойств исходных материалов и параметров образующейся структуры [9]. В качестве параметров структуры наполненного композита обычно используют размер частиц, дисперсность, соотношение долей компонентов и максимальную объемную долю наполнителя. По общепринятым представлениям [15, 16] структура наполненного полимерного материала состоит из полимерного связующего и расположенных в нем частиц наполнителя, причем при высоком содержании наполнителя матрица переходит в пленочное состояние [15], и частицы наполнителя контактируют между собой (рис. 1).

При уменьшении содержания наполнителя соответственно увеличивается объемная доля полимера, что приводит к удалению друг от друга частиц наполнителя. Среднестатистическое расстояние между частицами равно [16]

$$a = d \left( \sqrt[3]{\frac{\varphi_m}{\varphi_n}} - 1 \right), \quad (1)$$

где  $d = \frac{6}{\rho_n S}$  — усредненный диаметр частиц наполнителя, выраженный через дисперсность  $S$ ;  $\rho_n$  — плотность наполнителя,  $\varphi_m$  и  $\varphi_n$  — количество полимерного связующего и наполнителя, соответственно.

Таким образом, в зависимости от степени наполнения расстояние между регулярно расположенными частицами наполнителя изменятся от

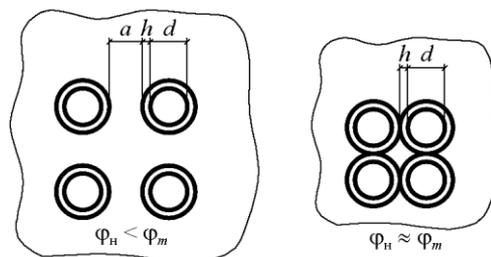


Рис. 1. Элемент дисперсной структуры композиционного материала с кубической упаковкой частиц.

$a + 2h$  до  $2h$ . Для удобства анализа диссипативных свойств такой системы связь между частицами моделируется квадратными брусками площадью  $S$  и длиной  $L$ , а частицы наполнителя — в виде куба [17]. Площадь бруска принимается равной

$$S = \bar{S} + (S_1^M - \bar{S}), \quad (2)$$

$$\bar{S} = \left( \frac{\varphi_m - \varphi_0}{1 - \varphi_C} \right)^t, \quad (3)$$

где  $\varphi_0, \varphi_C$  — предельная концентрация наполнителя (максимальная, минимальная),  $t = 1, 6$ ;

$$S_1^M = 0 \text{ при } \varphi_m \leq \varphi_C = 0,15,$$

$$S_1^M = \frac{1}{3} \cdot \frac{\varphi_m - \varphi_C}{1 - \varphi_C^{1/3}} \text{ при } 0,15 = \varphi_C \leq \varphi_m \leq 0,5.$$

Длина бруска равна

$$L = \sqrt{\bar{S}}. \quad (4)$$

Исходя из рассмотренных представлений структуры наполненного полимерного композита, расчетная схема взаимодействия двух соседних частиц может быть представлена в виде подвески из полимерного материала с опирающейся на нее частицей наполнителя массой  $m$  (рис. 2).

При жестком наполнителе диссипация энергии при колебаниях будет происходить в основном в подвеске. Уравнение равновесия частицы при гистерезисном трении в материале подвески можно записать [18]:

$$m\dot{w} + k^* w = \text{Re}(F \exp i\omega t) \quad (5)$$

или

$$m\dot{w} + k(1 + i\eta_m)w = F \exp i\omega t, \quad (6)$$

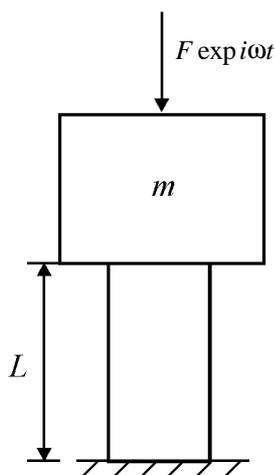


Рис. 2. Модель взаимодействия частицы наполнителя с полимерным связующим.

где  $w, \dot{w}$  — перемещение, ускорение перемещения,  $F$  — амплитуда силы,  $\eta_m$  — коэффициент потерь,

$k$  — дискретная жесткость,  $k^* = \frac{E_m^* S}{L}$ .  $E_m^*$  — модуль

потерь материала.

Решение уравнения имеет вид

$$w = B_1 \cos(\omega t - \varepsilon), \quad (7)$$

$$B_1 = \frac{F}{(k - m\omega^2)^2 + k^2 \eta_m^2},$$

$$\varepsilon = \arctg \frac{k \eta_m}{k - m\omega^2}. \quad (8)$$

Энергия, поглощаемая за цикл вследствие гистерезисного демпфирования, равна [5]:

$$D_S = \pi k \eta_m B_1^2. \quad (9)$$

Энергия деформации системы  $U$  определяется простым способом, как половина произведения максимального перемещения на соответствующее мгновенное значение силы:

$$U = \frac{1}{2} F w = \frac{1}{2} F B_1. \quad (10)$$

Коэффициент потерь наполненного полимерного материала рассчитывается по формуле

$$\eta_{н.с} = \frac{D_S}{2\pi U} = \eta_m \frac{k}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + k^2 \eta_m^2}}. \quad (11)$$

Анализ выражения (11) показывает, что введение наполнителя снижает диссипативные свойства полимера, тем больше, чем больше масса наполнителя.

Пренебрегая массой частиц наполнителя и имея ввиду малость  $\eta_m^2$ , коэффициент потерь наполненного композиционного материала будет равен коэффициенту потерь полимерного связующего:

$$\eta_{н.с} \approx \eta_m. \quad (12)$$

Эта зависимость справедлива при количестве наполнителя  $\varphi_n \leq \varphi_m$ .

При  $\varphi_n > \varphi_m$  наполненная система характеризуется недостатком полимерного связующего, необходимого для формирования двухфазной структуры. В такой системе образуются дефекты в виде воздушных пузырьков, нарушения связей на границе контакта частиц, а сами частицы наполнителя контактируют друг с другом. Если в точках контакта имеются относительные касательные смещения, значит, касательные напряжения достигают величины произведения давления на коэффициент трения. Такие точки образуют области проскальзывания. В резуль-

тате этого в материале возникает дополнительная диссипация энергии, вызванная проскальзыванием частиц наполнителя на поверхности контакта с несовершенными связями. Величина энергии диссипации  $\Delta\mathcal{E}$  на поверхностях с несовершенной связью определяется выражением

$$\Delta\mathcal{E} = \int_0^t d\tau \int_S T_n^k [\dot{u}] dA, \quad (13)$$

где  $T_n^k$  — поверхностные силы, то есть касательные напряжения  $\tau = \mu\sigma$ ,  $\mu$  — коэффициент трения,  $S$  — поверхность проскальзывания, то есть область с несовершенной связью.

При циклическом деформировании с частотой

$\omega$  время будет равно  $t = \frac{2\pi}{\omega}$ . Тогда

$$\Delta\mathcal{E} = \frac{2\pi}{\omega} \mu\sigma[\dot{u}]A. \quad (14)$$

Исходя из этого коэффициент потерь наполненной системы, вызванный диссипацией энергии на поверхностях контакта с несовершенными связями, может быть представлен в виде:

$$\eta'_{н.с} = \frac{\mu}{\omega} n. \quad (15)$$

где  $n$  — коэффициент, учитывающий суммарную площадь несовершенства, величину деформации на поверхности проскальзывания. Этот вид потерь аналогичен вязкому трению, поэтому для удобства коэффициент трения можно заменить коэффициентом вязкого трения полимерного связующего  $\eta_m^{В.Т}$ , так как проскальзывание происходит по границе нарушения связей между частицей наполнителя и полимерного связующего. Таким образом, коэффициент потерь наполненного полимерного композита при  $\varphi_n > \varphi_m$  складывается из двух видов потерь — диссипации энергии в полимерном связующем и диссипации энергии на поверхностях контакта с несовершенными связями:

$$\eta_{н.с} = \eta_m + \frac{\eta_m^{В.Т}}{\omega} n. \quad (16)$$

Суммарная площадь контактов с несовершенными связями пропорциональна  $\varphi_n - \varphi_m$ , где  $\varphi_m = 0,5$ . Вследствие этого коэффициент  $n$  можно принять равным:

$$n = \frac{\varphi_n - 0,5}{\varphi_n}, \quad (17)$$

При деформировании наполненного полимерного композита на определенной частоте коэф-

фициент потерь энергии на несовершенных связях будет равен коэффициенту потерь полимерного

связующего  $\frac{\eta_m^{В.Т}}{\omega} \approx \eta_m$ , так как в зоне проскальзывания частиц имеется полимерное связующее и проскальзывание наполнителя происходит по полимеру. Тогда выражение для определения коэффициента потерь наполненного композита примет вид:

$$\eta_{н.с} = \eta_m (1 + n). \quad (18)$$

Из анализа выражения (16) видно, что при  $\varphi_n < 0,5$  демпфирующие свойства наполненной системы зависят от демпфирующих свойств полимерного связующего, а при  $\varphi_n > 0,5$  из-за несовершенства структуры материала появляется дополнительный механизм рассеивания энергии. Дополнительная энергия диссипации возрастает с повышением вязкости материала, попавшего в зону контакта. Таким образом, для получения высокодемпфирующих материалов необходимо применять полимерное связующее (матрицу), обладающее хорошими диссипативными свойствами, а наполнитель должен иметь развитую поверхность и количество его должно быть максимально возможным. Однако, в некоторых случаях возможно получение дополнительных механизмов диссипации энергии при  $\varphi_n < 0,5$ .

## Экспериментальная часть

### Материалы

Для подтверждения теоретических результатов были проведены экспериментальные исследования вибропоглощающего композиционного материала. В качестве полимерного вяжущего применяли эпоксидную смолу ЭД-20 (ГОСТ 10587-84 с изм. № 1) производства ЗАО “ХИМЭКС Лимитед”, г. Санкт-Петербург, Россия; отвердитель — ПЭПА (ТУ 2413-646-1 1 131395-2007) производства ЗАО “ХИМЭКС Лимитед”, г. Санкт-Петербург, Россия; наполнители представлены в табл. 1.

Композиционный материал изготавливали в лабораторной мешалке с Z-образными лопастями путем механического перемешивания смеси компонентов. После чего смесь заливали в формы (балочки 320 × 10 × 5 мм), время полного отверждения эпоксидной смолы при комнатной температуре (20 – 25 °С) — 24 ч. Степень наполнения изменялась от 0 до 50 об. %. Получение композитов на основе эпоксидной смолы с большим содержанием наполнителя энергозатратно, а полученный материал не технологичен.

Таблица 1

Наполнители, использованные для создания вибропоглощающего композиционного материала

Наименование материала	Массовая доля остатка на сетке № — не более %	Производитель	ГОСТ (ТУ)
Слюда молотая мусковит СММ-125	№ 0160 — 0,2; № 0125 — 0,2	ОАО “Слюда”	ГОСТ 855-74 с изм. № 3
Слюда молотая мусковит СММ-160	№ 0160 — 0,2; № 0125 — отсутств.	— « —	ГОСТ 855-74 с изм. № 3
Слюда молотая флогопит СМФ-125	№ 0160 — 0,2; № 0125 — 0,2	— « —	ГОСТ 855-74 с изм. № 3
Слюда молотая флогопит СМФ-160	№ 0160 — 0,2; № 0125 — отсутств.	— « —	ГОСТ 855-74 с изм. № 3
Слюда молотая СФЭ-315	№ 2 — отсутств.; № 0315 — 6; № 0125 — 50	— « —	ТУ-2512-01-01055859-96
Слюда молотая флогопит СФММ 063	№ 063 — 6	— « —	ТУ 21-25-241- 80 с изм. № 3
Слюда молотая СМЭ-315	№ 2 — отсутств.; № 0315 — 3; № 0125 — 55	— « —	ГОСТ 14327-82 с изм. № 1
Мел природный технический дисперсный МТД-2	№ 014 — 0,8	ОАО “Мелстром”	ТУ 5743-008-05120542-96
Опилки древесные	№ 2 — отсутств.; № 0125 — 10	Отходы местного производства	—

### Методы исследования

В проведенных исследованиях применяли резонансный метод определения коэффициента потерь — показателя рассеяния энергии. Сущность метода заключается в возбуждении в образце поперечных (изгибных) колебаний основной гармоники. Для проведения испытаний использовали резонансную установку с погрешностью измерений частоты колебаний не более 0,1 Гц, обеспечивающую закрепление образца, возбуждение и измерение колебаний с использованием электромагнитных преобразователей.

### Результаты и их обсуждение

В результате проведенных исследований получены зависимости диссипативных свойств композита

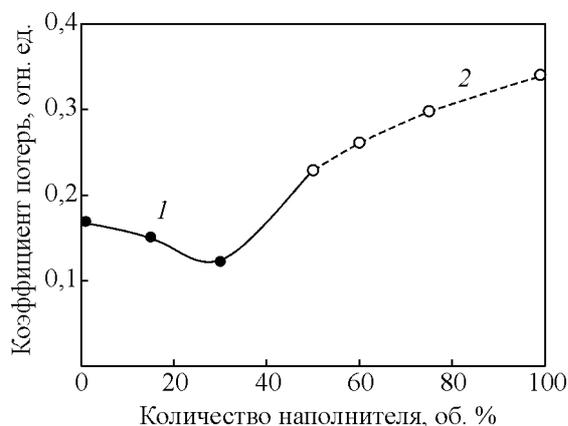


Рис. 3. Влияние количества наполнителя на вибропоглощающие свойства композита (смола ЭД-20 с наполнителем слюда СММ-125). 1 — экспериментальные данные, 2 — теоретические данные.

от степени наполнения (рис. 3) и частоты колебаний (рис. 4).

В представленных теоретических исследованиях эффективность диссипации энергии наблюдается у композитов, степень наполнения которых выше 0,5, то есть минимальный экстремум функции приходится на композит, со степенью наполнения 50 об. %. Применение наполнителя с развитой поверхностью позволяет сместить экстремум эффективности наполнения в меньшую сторону. Исследования представленные в [14] показали преимущество волокнистых и пластинчатых наполнителей над остальными, определили выбор слюды в качестве наполнителя исследуемого вибропоглощающего композита.

Из анализа результатов испытаний, приведенных на рис.4, следует:

1. При степени наполнения исследуемого композита до 30 об. % подтверждаются теоретические

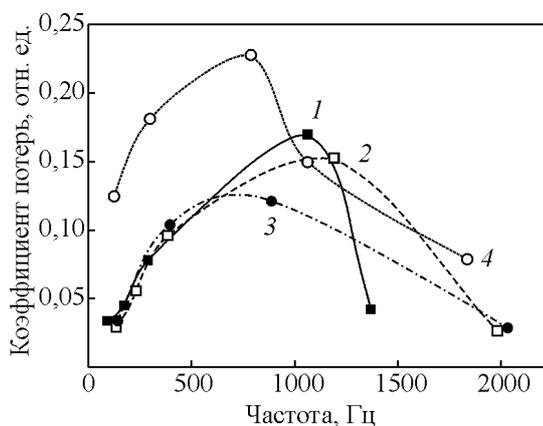


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента потерь композита при содержании наполнителя (слюды СММ-125), об. %: 1 — 0; 2 — 15; 3 — 30; 4 — 50.

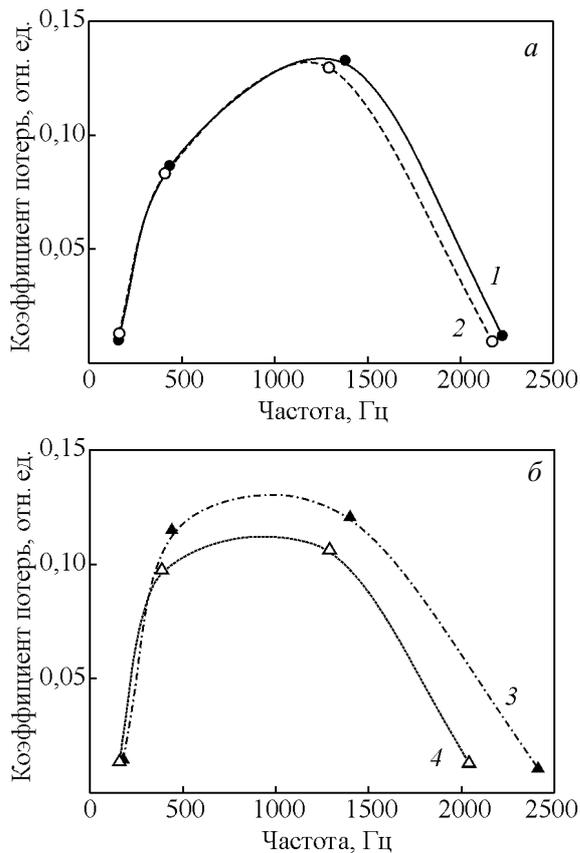


Рис. 5. Влияние крупности частиц наполнителя на коэффициент потерь для образцов слюды: *a* – СМФ (1 – СМФ-125, 2 – СМФ-160), *б* – СММ (3 – СММ-125, 4 – СММ-160). Содержание наполнителя 30 об. %.

заклучения для случая  $\varphi_n \leq \varphi_m$ . На данном участке кривой изменение диссипативных свойств незначительны и примерно равны диссипативным свой-

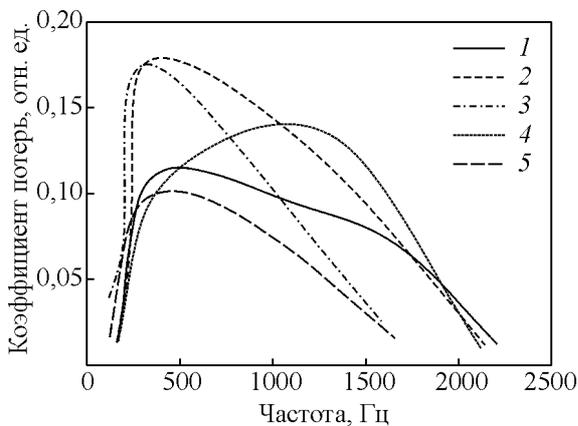


Рис. 6. Влияние вида наполнителя на вибродемпфирующие свойства материала (степень наполнения 30 об. %): 1 – СФЭ-315, 2 – СФММ-063, 3 – опилки древесные, 4 – СФЭ-315, 5 – мел.

ствам полимерного связующего. В области содержания наполнителя 30 об. % наблюдается минимальный экстремум функции диссипативных свойств от количества наполнителя композита.

2. В диапазоне наполнения 30 – 50 об. % происходит резкое увеличение вибропоглощающих свойств композита, связанное, прежде всего, с появлением дополнительных механизмов диссипации энергии, характерных для случая  $\varphi_n > \varphi_m$ .

3. Применение наполнителей с развитой поверхностью (слюда) позволило сместить минимальный экстремум функции “коэффициент потерь – степень наполнения” в сторону меньшего количества наполнителя, что на практике означает возможность подбора эффективного состава композита, отвечающего всем технологическим и физико-механическим свойствам.

Параллельно было изучено влияние количества наполнителя на вибропоглощающие свойства композита в диапазоне частот от 0 до 2500 Гц (рис. 4), по результатам которых была подтверждена справедливость выдвинутых теоретических и экспериментальных зависимостей во всем диапазоне частот.

Изучено влияние крупности частиц слюды и ее марки на способность композиционного материала рассеивать приложенную динамическую нагрузку (рис. 5, 6). Для сравнения представлены результаты исследований наиболее распространенного наполнителя — мела, и отхода местного производства — опилок древесных.

Как видно из рис. 5 изменение зернового состава наполнителя в сторону уменьшения крупности его частиц приводит к увеличению диссипативных свойств композиционного материала и расширяет частотный диапазон эффективного вибропоглощения. Это связано с тем, что при одном и том же объемном содержании наполнителя в матрице полимера материал с меньшей крупности будет обладать большей площадью контакта с соседними частицами.

Помимо количества и крупности наполнителя значительное влияние на вибропоглощающие свойства ПКМ оказывает вид наполнителя. Результаты проведенных исследований показывают, что в диапазоне средних частот (от 200 до 1000 Гц) в качестве наполнителя полимерной матрицы ПКМ рекомендовано применение слюды марки СФММ-063, в диапазоне частот 500 – 1500 Гц — слюды марок СМЭ-315, СМФ-125, СММ-125. Установлено (рис. 6), что применение мела и слюды СФЭ-315 в качестве наполнителя вибропоглощающего ПКМ малоэффективно. В диапазоне низких частот до 600 Гц эффективно применение древесных опилок.

## Выводы

1. В результате теоретических исследований установлены закономерности изменения диссипативных свойств композита от степени его наполнения.

2. Представлены две модели поведения наполненного композита при действии внешней силы:

— При содержании наполнителя  $\varphi_n \leq \varphi_m$  рассеивание внешней энергии происходит в основном только за счет диссипативных свойств полимера, а введение наполнителя ухудшают, ввиду образования переходных слоев вокруг частиц наполнителя.

— При содержании наполнителя  $\varphi_n > \varphi_m$  площадь поверхности наполнителя значительно увеличивается, что приводит к нехватке полимерного связующего и разрыву переходных слоев. В результате в массе композита возникают дополнительные механизмы диссипации энергии.

3. Теоретические результаты исследований подтверждены экспериментально.

4. Представлены экспериментальные зависимости вибропоглощающих свойств ПКМ от крупности и вида наполнителя. Установлено:

— Диссипативные свойства ПКМ тем выше, чем меньше крупность наполнителя.

— Различные виды слюды эффективны в качестве наполнителя ПКМ в разных диапазонах частот.

— Применение мела в качестве наполнителя ПКМ малоэффективно. Наиболее перспективно применение древесных опилок.

## Литература

1. Сытый Ю.В., Сагомонова В.А., Кислякова В.И. и др. Вибропоглощающие материалы на основе термоэластопластов. Электрон. науч. журнал "Труды ВИАМ", 2013, № 3, [http://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=19](http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=19).
2. Сагомонова В.А., Сытый Ю.В. Основные принципы создания вибропоглощающих материалов авиационного назначения. Электрон. науч. журнал "Труды ВИАМ", 2013, № 11. [http://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=452](http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=452).
3. Ричардсон М. Промышленные полимерные композиционные материалы. Под ред. П.Г. Бабаевского. М.: Химия. 1980, 472 с.
4. Згаевский В.Э. Теоретическое описание вязкоупругого поведения наполненной полимерной системы. Деп. ВИНТИ. 1970, № 1691-70, 53 с.
5. Нашиф А., Джоунс Д., Хендерсон Дж. Демпфирование колебаний. Ред. Э. И. Григолюк. М.: Мир, 1988, 448 с.
6. Черкасов В.Д., Юркин Ю.В., Авдонин В.В. Битумно-каучуковое вяжущее для эффективных вибропоглощающих покрытий. Инженерно-строительный журнал, 2013, № 8 (43). [http://www.engstroy.spb.ru/index\\_2013\\_08/02.pdf](http://www.engstroy.spb.ru/index_2013_08/02.pdf).

7. Сагалаев Г.В. Общие технические требования к наполнителям. Наполнители полимерных материалов. М.: МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1983, с. 57 – 64.
8. Michalczyk K. Analysis of the influence of elastomeric layer on helical spring stresses in longitudinal resonance vibration conditions. Archives of civil and mechanical engineering, 2013, v. 13, p. 21 – 26.
9. Липатов Ю.С. Физическая химия наполненных полимеров. М.: Химия, 1977, 304 с.
10. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров. М.: Химия. 1991, 260 с.
11. Наполнители для полимерных композиционных материалов. Под ред. Г. С. Каца, Д. В. Милевски. М.: Химия, 1981, 736 с.
12. Авиллов Г.М. Новые вибропоглощающие мастики для автомобильной промышленности. Колебания, излучение и демпфирование упругих структур. М.: Наука, 1973, с. 223 – 228.
13. Нильсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций. М.: Химия, 1978, 329 с.
14. Соломатов В.И., Бобрышев А.Н., Химмлер К.Г. Полимерные композиционные материалы в строительстве. Под ред. В.И. Соломатова. М.: Стройиздат, 1988, 312 с.
15. Соломатов В.И., Бобрышев А.Н. и др. Топологическая оценка эффективности наполнения полимерных композитов. Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура, 1987, № 4, с. 43 - 48.
16. Симонов-Емельянов И.Д., Кулезнев В.Н. Обобщенные параметры дисперсной структуры наполненных полимеров. Пластические массы, 1989, № 1, с. 19 – 22.
17. Новиков В.В. К определению упругих модулей перколяционных систем. Инженерно-физический журнал, 1989, № 3, с. 485 – 490.
18. Канович М.З., Колтунов М.А., Попов В.А., и др. Расчет механических характеристик композита на основе микросфер. Механика полимеров, 1977, № 2, с. 225 – 230.

## References

1. Syty Yu.V., Sagomonova V.A., Kislyakova V.I., Bolshakov V.A. *Vibropogloshchayushchiye materialy na osnove termoelastoplastov* [Novel vibroabsorbing materials]. Electronic scientific journal Proceedings of VIAM, 2013, no. 3, URL: [http://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=19](http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=19).
2. Sagomonova V.A., Syty Yu.V. *Osnovnye printsipy sozdaniya vibropogloshchayushchikh materialov aviatsionnogo naznacheniya* [Basic concepts of creation damping materials for aviation]. Electronic scientific journal Proceedings of VIAM, 2013, no. 11. URL: [http://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=452](http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=452).
3. Richardson M.O.W. Polymer engineering composites. Applied Science Publisher, London, 1977, 568 p.
4. Zgaevskiy V.E. *Teoreticheskoe opisanie vyazkouprugogo povedeniya napolnennoy polimernoy sistemy* [The theoretical description of viscoelastic behavior of filled polymeric system]. Dep.VINITI, 1970, no. 1691-70, 53 p.

5. Ahid D. Nashif, David I.G. Jones, John P. Henderson. Vibration damping. John Wiley & Sons, New York, ISBN 0-471-86772-1, 1985, 453 p.
6. Cherkasov V.D., Yurkin Yu.V., Avdonin V.V. Bitumno-kauchukovoe vyazhushchee dlya effektivnykh vibropogloshchayushchikh pokrytiy [Bitumen-rubber mixture for effective vibration damping sheet]. *Inzhenerno-stroitelny zhurnal — Magazine of civil engineering*, 2013, no. 8 (43), URL: [http://www.engstroy.spb.ru/index\\_2013\\_08/02.pdf](http://www.engstroy.spb.ru/index_2013_08/02.pdf).
7. Sagalaev G. V. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya k napolnitelyam [The general technical requirements to fillers]. Fillers of polymeric materials. Moscow, Dzerzhinskii MDNTP Publ., 1983, pp. 57 – 64.
8. Michalczyk K. Analysis of the influence of elastomeric layer on helical spring stresses in longitudinal resonance vibration conditions. *Archives of civil and mechanical engineering*, 2013, vol. 13, pp. 21 – 26.
9. Lipatov Yu. S. *Fizicheskaya khimiya napolnennykh polimerov* [Physical chemistry of filled polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1977, 304 p.
10. Lipatov Yu.S. *Fiziko-khimicheskiye osnovy napolneniya polimerov* [Physico-chemical basis of filled polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1991, 260 p.
11. Kats G. S., Milevski D. V. *Napolniteli dlya polimernykh kompozitsionnykh materialov: Spravochnoye posobiye* [Fillers for polymer composites: Reference book]. Moscow, Khimiya Publ., 1981, 736 p.
13. Avilov G.M. Novye vibropogloshchayushchiye mastiki dlya avtomobilnoy promyshlennosti [New vibration-absorbing mastics for automotive industry]. Fluctuations, radiation and damping of elastic structures. Moscow, Nauka Publ., 1973, pp. 223 – 228.
14. Nielsen L.E. Mechanical properties of polymers and composites. Marcel Dekker Inc., NY, 1994, 556 p.
15. Solomatov V.I., Bobryshev A.N., Khimmler K.G. *Polimernye kompozitsionnye materialy v stroitelstve* [Polymer composite materials in constructions]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 312 p.
16. Solomatov V. I., Bobryshev A.N. et al, Topologicheskaya otsenka effektivnosti napolneniya polimernykh kompozitov [Topological estimation of efficiency of filling polymer composites]. *Izv.VUZov. Ser. Stroitelstvo i arkhitektura — Bull. High Education. Ser. Construction and architecture*, 1987, no. 4, pp. 43 – 48.
17. Simonov-Yemelyanov I.D., etc. Obobshchennyye parametry dispersnoy struktury napolnennykh polimerov [The generalized parameters of disperse structure of the filled polymers]. *Plasticheskiye massy — Russian plastics technology journal*, 1989, no. 1, pp. 19 – 22.
18. Novikov V.V. K opredeleniyu uprugikh moduley perkolyatsionnykh sistem [Definition of elastic modules of percolation systems]. *Inzhenerno-fizichesky zhurnal — Journal of engineering physics and thermophysics*, 1989, no. 3, pp. 485 – 490.
19. Kanovich M. Z., etc. Raschet mekhanicheskikh kharakteristik kompozita na osnove mikrosfer [Calculation of mechanical characteristics of a composite on the basis of microspheres]. *Mekhanika polimerov — Polymer mechanics*, 1977, no. 2, pp. 225 – 230.

*Статья поступила в редакцию 31.03.2014 г.*

**Черкасов Василий Дмитриевич** — ФГБОУ ВПО “Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва” (430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), доктор технических наук, профессор, специалист в области разработки современных вибропоглощающих материалов. E-mail: [vd-cherkasov@yandex.ru](mailto:vd-cherkasov@yandex.ru).

**Юркин Юрий Викторович** — ФГБОУ ВПО “Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва” (г. Саранск), кандидат технических наук, доцент, специалист в области разработки современных вибропоглощающих материалов. E-mail: [yurkinuv@gmail.com](mailto:yurkinuv@gmail.com).

**Авдонин Валерий Викторович** — ФГБОУ ВПО “Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва” (г. Саранск), аспирант, специализируется в области разработки современных вибропоглощающих материалов. E-mail: [avdoninvalerii@bk.ru](mailto:avdoninvalerii@bk.ru).

## **Design of structure of the filled damping material**

**V. D. Cherkasov, Yu. V. Yurkin, V. V. Avdonin**

In the research work the problem of theoretical research of dependence of dissipative properties of a material from extent of its filling is solved by the authors. As a result of researches the model of the filled vibration-absorbing material is offered, dependence of dissipative properties of a composite on extent of its filling is established. Theoretical results of researches are confirmed experimentally. Pilot researches were conducted on samples, as polymeric knitting of which ED-20 epoxy was applied; hardener – PEPA; filler – mica ground various brands, chalk, wood sawdust. On experimental dependences it is established that at the maintenance of a filler of 30% (on volume) the composite possesses the smallest dissipative properties. However at increase in quantity of a filler more than 40% dissipative properties of a material start improving sharply due to emergence of additional mechanisms of dispersion of energy (in particular, due to friction between filler particles). Frequency ranges of effective vibration absorption of each of the specified fillers are established.

**Key words:** structure design, damping material, composite, loss factor, epoxy.

---

***Cherkasov Vasily** — Ogarev Mordovia State Universit (68 Bolshevistskaya Str., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russia), Dr Sci (Eng), professor, expert in the field of development of modern vibration damping materials. E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru.*

***Yurkin Yuriy** — Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia, PhD, associate professor of Applied mechanics department, expert in the field of development of modern vibration damping materials. E-mail: yurkinuv@gmail.com.*

***Avdonin Valeriy** — Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia, postgraduate student. E-mail: avdoninvalerii@bk.ru.*