

Как видно из рисунков, выполнение каркаса из силицированного графита приводит к снижению деформаций поверхностей дисков каркаса (с которыми контактируют уплотнения) в направлении оси вращения (на рисунках ось  $x$ ) теплообменника до значения 0.14 мм (деформация дисков каркаса выполненного из стали 20 – 0.64 мм). Причем связано это не только с меньшим коэффициентом теплового расширения, но и с существенно большей теплопроводностью карбидокремниевой керамики по сравнению с металлом (сталь 20).

Действительно, максимальная температура керамического каркаса почти на 60 градусов меньше температуры стального каркаса (рисунки 2 и 4).

Таким образом, применение графитокремниевой керамики позволит почти в четыре раза снизить деформации каркаса и, как следствие, значительно повысить эффективность работы уплотнений теплообменника, что обеспечит возможность повышения эффективности теплообменника до 95% без увеличения утечек воздуха высокого давления.

#### Литература

1. Костюков А.В., Кустарев Ю.С., Елисеев С.Ю. Транспортные газотурбинные двигатели. Общероссийский н/т журнал «Полёт». № 5, 2003 г. с. 32-35.
2. Костюков А.В., Кустарев Ю.С. и др. Исследование роторного теплообменника малоразмерного регенеративного газотурбинного двигателя. Общероссийский н/т журнал «Полёт», № 1, 2005г., с. 38-42.
3. Распределение температур и деформаций в каркасе дискового теплообменника при нестационарных условиях. Инженерно-физический журнал ANSYS SOLUTION. Русская версия. № 1(1), 2005.
4. Костюков А.В., Елисеев С.Ю. и др. Способ охлаждения каркаса вращающегося дискового теплообменника и устройство для его осуществления. Патент на изобретение №2296930, 2007 г.
5. Костюков А.В., Кустарев Ю.С. и др. Исследование системы охлаждения каркаса роторного теплообменника. Известия МГТУ «МАМИ», № 2(4), 2007 г.

#### **Сравнительная оценка вибродемпфирующих характеристик материалов для модификации масляного поддона и клапанных крышек двигателя**

Круглов К.М., к.т.н. проф. Щербаков В.И.  
Университет машиностроения  
+7-495-223-05-23 доб. 1357, [shar2k@list.ru](mailto:shar2k@list.ru)

*Аннотация.* В статье приведены результаты экспериментов по виброотклику пластин из пяти различных материалов с варьированием геометрических размеров и видов закрепления. Наряду с традиционными материалами рассмотрены перспективные композиционные материалы. Основное внимание авторы уделили изменению частотного спектра колебаний пластин и коэффициенту затухания колебаний. Приведены сравнительные диаграммы коэффициентов затухания колебаний. Сделаны выводы и рекомендации.

*Ключевые слова:* *вибрационные свойства, вибропоглощающие материалы, виброзащита, коэффициент затухания колебаний, базальтопластик, снижение вибраций и шума двигателя.*

В последнее время в области машиностроения все больше возрастают экологические и санитарные требования. В частности, это касается требований по уровню шума автомобиля, прописанных в нормах ЕЭК ООН №51-02.

В автомобиле множество источников шума, но основным является его двигатель. Излучение звука вследствие вибрации наружных поверхностей корпусных деталей является одним из основных источников шума двигателя. Корпусные детали двигателя, а именно, масляный поддон, клапанные крышки и передняя крышка представляют собой тонкостенные пластинки и оболочки. Каждая корпусная деталь двигателя вносит вклад в образование структурного шума пропорционально площади своей поверхности. На рисунке 1 показана

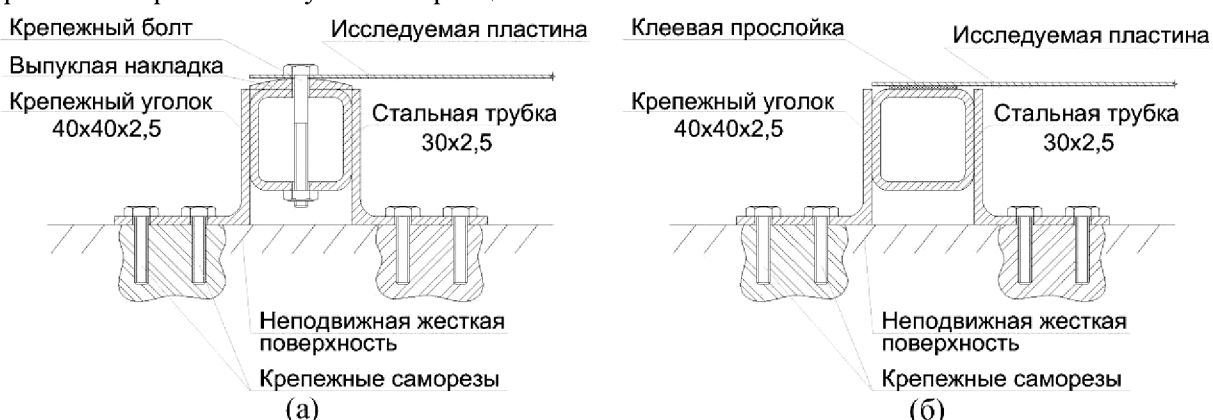
диаграмма вклада различных поверхностей бензинового двигателя в образование структурного шума [3, 5].



**Рисунок 1 - Вклад поверхностей бензинового двигателя в образование структурного шума**

Поставлена задача уменьшения шума двигателя за счет изменения конструкции его корпусных деталей. Для решения этой задачи Московским государственным техническим университетом «МАМИ» совместно с АМО «ЗИЛ» проведена серия экспериментов по выявлению влияния свойств материала на вибрационные свойства образцов в виде пластин. Испытания проводились для трех типов закрепления пластин: шарнирное закрепление по периметру, шарнирное закрепление по двум противоположным краям и жесткое защемление по двум противоположным краям. Исследовались пластины трех различных размеров, но с одинаковым соотношением сторон 3:2 (675x450 мм, 450x300 мм и 300x200 мм). Образцы были изготовлены из следующих материалов: сталь 08 толщиной 1 мм (серийный материал), сэндвич панель (сталь-клей-сталь) толщиной 1,2 мм, сталь 08 по ГОСТ 1050-88 толщиной 1 мм с вибропоглощающим покрытием Виброфол 0,30, сталь 08 толщиной 1 мм с вибропоглощающим покрытием СКЛГ-6020М и базальтопластик толщиной 3,4 мм.

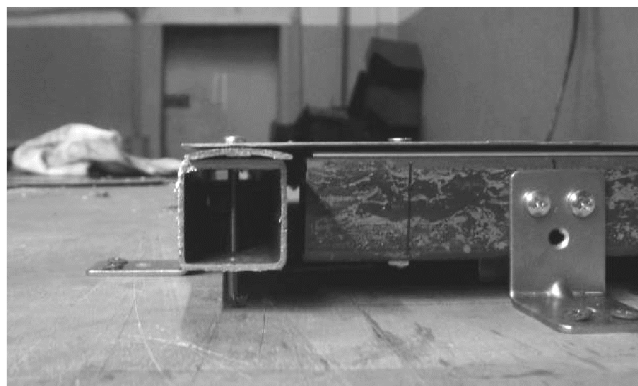
Все испытания проводились в соответствии с разработанной на АМО «ЗИЛ» программой-методикой вибрационных испытаний деталей автомобилей, изготовленных из новых перспективных материалов. В соответствии с этой методикой было спроектировано и изготовлено приспособление (рисунки 2, 3), позволяющее моделировать шарнирное и жесткое закрепления краев испытуемых образцов.



**Рисунок 2 - Схемы приспособлений для закрепления краев образцов: а – шарнирного опирания; б – жесткого защемления**

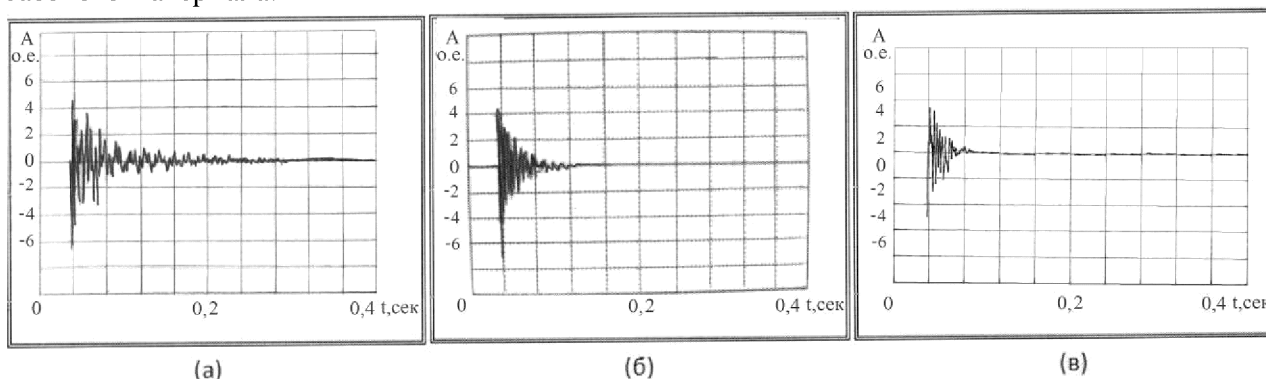
Моделирование шарнирного закрепления осуществлялось болтами и специальными выпуклыми накладками. Жесткое защемление – клеевыми соединениями. Возбуждение системы производилось ударным импульсом с помощью специального молотка. В ходе эксперимента фиксировали график затухания ускорения свободных колебаний испытуемых пластин и получали частотный спектр этих колебаний. Регистрация величины ударного импуль-

са, виброотклика и частотного спектра проводилась частотным двухканальным анализатором CF-920 компании Ono Sokki. В качестве акселерометра применялся датчик 4343 компании Брюль и Кьер. Ударный импульс измерялся пьезоэлектрическим датчиком силы 8200 компании Брюль и Кьер. Для каждого образца испытания проводились по четыре раза. За результаты экспериментов принимались средние арифметические значения, найденные из всех четырех испытаний.



**Рисунок 3 - Приспособление для моделирования шарнирного закрепления**

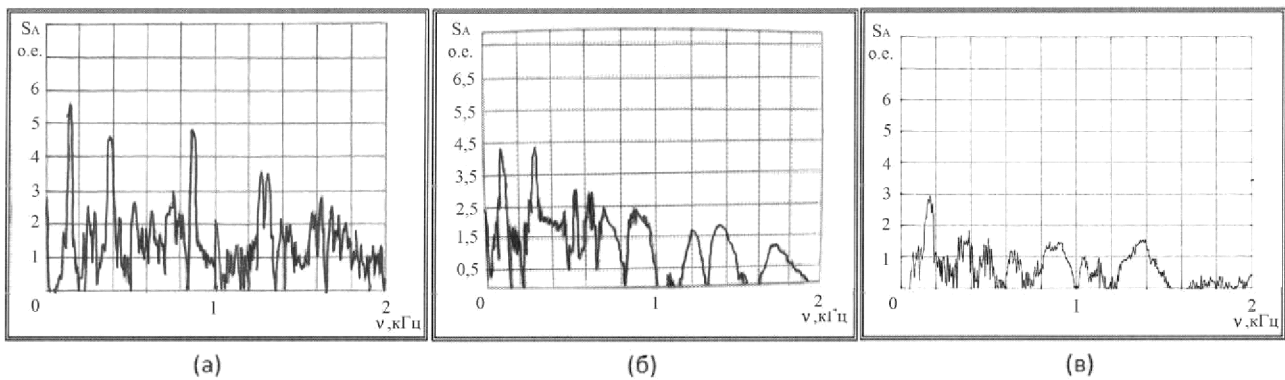
В качестве примера на рисунке 4 представлены законы изменения во времени виброускорения затухающих колебаний пластин с размерами 450x300 мм листовой стали 08 (а), базальтопластика (б) и панели с покрытием Виброфол 0,30 (в) для случая шарнирного опирания по всему контуру. Видно, что время, за которое образцы возвращаются в первоначальное состояние равновесия, у панели из серийного материала (стали) наибольшее, для базальтопластика существенно меньшее и для панели с покрытием Виброфол 0,30 минимальное. Темп затухания колебаний, а следовательно, вибродемпфирование базальтопластиковых образцов и панелей с покрытием Виброфол 0,30 в несколько раз больше, чем для панелей из базового материала.



**Рисунок 4 - Графики зависимости виброускорения в относительных единицах (о.е.) от времени  $t$  свободных затухающих колебаний пластин размерами 450x300 мм, шарнирно закрепленных по контуру: а – лист стали 08; б – базальтопластик; в – панель с покрытием Виброфол 0,30**

Частотные спектры виброускорения свободных затухающих колебаний этих же пластин представлены на рисунке 5. Их анализ показывает, что спектр серийного материала (а) широкополосный с резкими пиками во всем диапазоне частот и особенно в полосе от 500 до 1500 Гц, которая оказывает наибольшее влияние на вибрации и шум машин. Спектр колебаний панели из базальтопластика (б) имеет более плавные пики и большую тенденцию к понижению с ростом частот. То же отмечается и для спектра панели с покрытием Виброфол 0,30 (в). Последний материал имеет сравнительно лучшую спектральную характеристику с точки зрения вибродемпфирования. Отмеченные качественные соотношения между характеристиками для пластин из этих материалов сохраняются при всех видах закрепления.

Рассмотрим количественные оценки вибродемпфирующих характеристик экспериментально исследованных панелей.



**Рисунок 5 - Частотные спектры виброускорения в относительных единицах (о.е.) свободных затухающих колебаний пластин размерами 450x300 мм, шарнирно закрепленных по контуру: а – лист стали 08; б – базальтопластик; в – панель с покрытием Виброфол 0,30**

Свободные колебания пластины после приложения ударного импульса описываются следующим выражением [1, 2]:

$$Z(x, y, t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cdot f_i(x, y) \cdot e^{-\alpha_i t} \cdot \cos(\omega_i \cdot t + \beta_i), \quad (1)$$

где:  $Z(x, y, t)$  – функция прогибов пластины;

$A_i$  – начальная амплитуда  $i$ -ой формы колебаний;

$f_i(x, y)$  –  $i$ -ая собственная форма колебаний;

$x, y$  – координаты в системе координат, расположенной в срединной плоскости пластины;

$\alpha_i$  – коэффициент затухания  $i$ -ой формы колебаний;

$\omega_i, \beta_i$  – собственная частота и начальная фаза  $i$ -ой формы колебаний.

Продифференцировав (1) по времени  $t$  первый раз, получим скорость, а второй раз – ускорение. Из этих выражений найдем амплитудные значения перемещения  $A_z$ , скорости  $A_{z'}$ , и ускорения  $A_{z''}$  для  $i$ -ой формы колебаний в момент времени  $t_k$ :

$$\begin{aligned} A_z(t_k) &= A_i \cdot f_i(x, y) \cdot e^{-\alpha_i t_k}; \\ A_{z'}(t_k) &= A_i \cdot f_i(x, y) \cdot \sqrt{\alpha_i^2 + \omega_i^2} \cdot e^{-\alpha_i t_k}; \\ A_{z''}(t_k) &= A_i \cdot f_i(x, y) \cdot (\alpha_i^2 + \omega_i^2) \cdot e^{-\alpha_i t_k}. \end{aligned}$$

Тогда для логарифмического декремента колебаний  $\delta_i$   $i$ -ой формы колебаний можем записать:

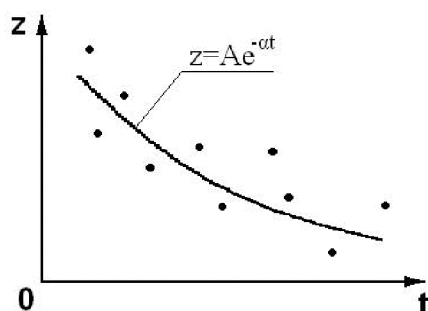
$$\delta_i = \ln \frac{A_z(t_k)}{A_z(t_k + T_i)} = \ln \frac{A_{z'}(t_k)}{A_{z'}(t_k + T_i)} = \ln \frac{A_{z''}(t_k)}{A_{z''}(t_k + T_i)} = \alpha_i \cdot T_i = \alpha_i \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\omega_i},$$

где:  $T_i = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_i}$  – период колебаний по  $i$ -ой форме.

Отсюда следует, что декремент колебаний может быть найден по любой из зависимостей, определяющих закон перемещений, скоростей или ускорений. На практике наиболее просто получить характеристики ускорений, так как пьезодатчики непосредственно регистрируют ускорения. И в этом случае можно обойтись без дополнительных интегрирующих элементов в цепи регистрации и анализа экспериментальных данных.

Однако ввиду сложности структуры системы, теоретическое и экспериментальное определение значений декремента колебаний и частот собственных колебаний связано с принципиальными сложностями. Вместе с тем для решения поставленных задач достаточно провести сравнительную количественную оценку демпфирующих свойств исследуемых пла-

стин. Это можно сделать по эффективному коэффициенту затухания  $\alpha$  – показателю экспоненциальной зависимости, аппроксимирующей максимумы выходного процесса  $Z(t)$  колебаний пластины. Для этого следует рассмотреть экстремумы верхней части процесса, которые для иллюстрирующего примера показаны в виде точек на графике в координатах  $Z, t$  (рисунок 6).



**Рисунок 6 - Экстремумы процесса и аппроксимирующая зависимость в исходных координатах  $Z, t$**

Аппроксимирующая зависимость в исходных координатах  $Z, t$  подбирается в виде:

$$Z = A \cdot e^{-\alpha t}, \quad (2)$$

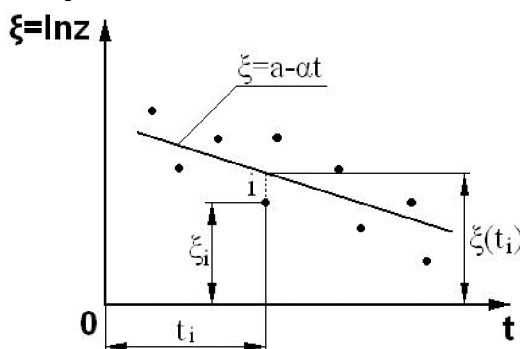
где:  $A$  и  $\alpha$  – неизвестные амплитуда и коэффициент затухания.

Для отыскания параметров  $A$  и  $\alpha$  удобно перейти к логарифмической координате по оси  $Z$ . Прологарифмировав правую и левую части уравнения (2), получим:

$$\xi = a - \alpha \cdot t, \quad (3)$$

где:  $\xi = \ln Z$ ;  $a = \ln A$ .

В координатах  $\xi, t$  подбираемая зависимость стала линейной (рисунок 7).



**Рисунок 7 - Экстремумы процесса и аппроксимирующая зависимость в логарифмической координате  $\xi$  и времени  $t$**

В соответствии с методом наименьших квадратов составим сумму квадратов отклонений значений аппроксимирующей функции  $\xi(t_i)$  и дискретных значений максимумов  $\xi_i$  процесса:

$$S = \sum_{i=1}^k (\xi(t_i) - \xi_i)^2 = \sum_{i=1}^k (a - \alpha \cdot t_i - \xi_i)^2, \quad (4)$$

где:  $S$  – сумма квадратов отклонений;

$k$  – общее число рассматриваемых экстремумов процесса.

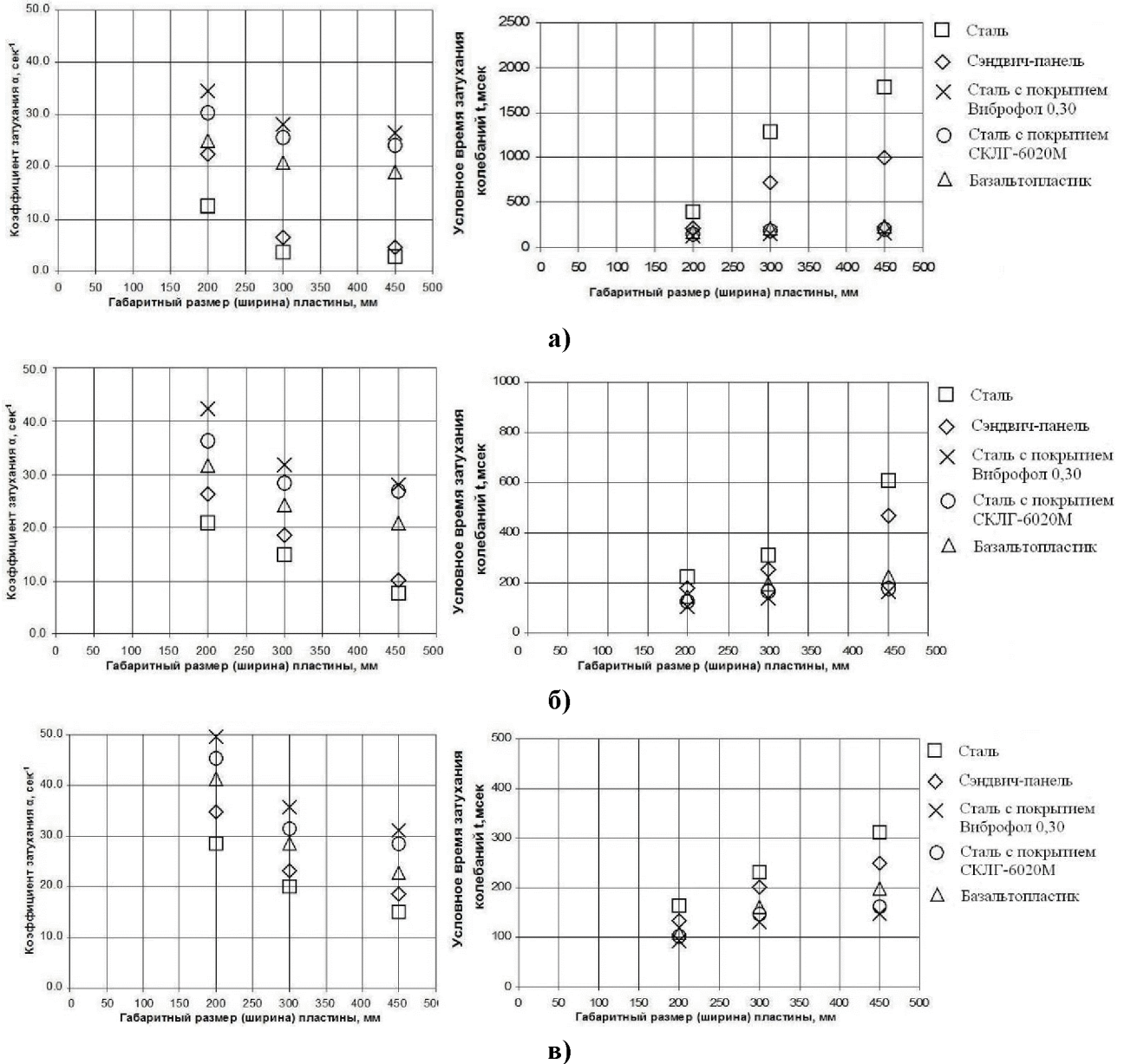
После исследования  $S$  на экстремум по варьируемым параметрам  $a$  и  $\alpha$  получим следующую формулу для определения значений эффективного коэффициента затухания:

$$\alpha = \frac{k \cdot \sum_{i=1}^k \xi_i \cdot t_i - \sum_{i=1}^k t_i \cdot \sum_{i=1}^k \xi_i}{\left( \sum_{i=1}^k t_i \right)^2 - k \cdot \sum_{i=1}^k t_i^2}; \quad (5)$$

В качестве дополнительной характеристики демпфирующих свойств системы можно использовать условное время затухания  $t_{затух}$  – это время, в течение которого амплитуда аппроксимирующей кривой  $A$  уменьшится, например, в сто раз. Заменяв в уравнении (2)  $Z$  на  $A \cdot 10^{-2}$  и время  $t$  на  $t_{затух}$ , найдем:

$$t_{затух} = \frac{4.606}{\alpha} \quad (6)$$

Результаты расчетов коэффициента затухания  $\alpha$  по формуле (5) и времени затухания  $t_{затух}$  – (6) показаны в графической форме на рисунке 8.



**Рисунок 8 - Зависимость коэффициента затухания  $\alpha$  и условного времени затухания  $t_{затух}$  колебаний от материала пластины и вида закрепления: а – шарнирно опертой по двум краям; б – шарнирно опертой по контуру; в - жестко защемленной по двум краям**

Из представленных графиков видно, что наилучшими вибродемпфирующими свойствами обладают панели из базальтопластика и с покрытием Виброфол 0,30. Так, значения коэффициента затухания  $\alpha$  для случая шарнирного закрепления по всему контуру панелей размерами 450x300 мм (см. рисунок 8, б) составили следующие величины: 31 для покрытия Виброфол 0,3; 28,5 - базальтопластика; 18,8 – сэндвич-панели; 14 - стали. А их отношения к значению  $\alpha$  для базового материала (стали) равны 2,21, 2,03 и 1,4 соответственно для по-

крытия Виброфол 0,30, базальтопластика и сэндвич-панели.

Сравнительную оценку изменения спектра собственных частот пластин из экспериментальных материалов по отношению к пластинам из серийного материала (стали) можно провести по теоретическим формулам и спектрам. Так, для пластины с шарнирно опертыми краями по всему контуру собственные частоты находятся по следующей формуле [1, 2]:

$$\omega_{m,n} = \pi^2 \cdot \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \cdot \sqrt{\frac{D}{\rho \cdot h}}, \quad (7)$$

где:  $a, b$  - размеры сторон пластины;

$h$  - толщина пластины;

$m = 1, 2, 3, \dots$ ;

$n = 1, 2, 3, \dots$ ;

$\rho$  - плотность материала;

$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}$  - цилиндрическая жесткость;

$E$  - модуль упругости материала пластины;

$\mu$  - коэффициент Пуассона материала пластины.

Для других вариантов закрепления пластины формулы, определяющие собственные частоты, отличаются от формулы (7) лишь коэффициентом перед радикалом, причем эти коэффициенты зависят только от геометрических размеров пластины и параметров  $m$  и  $n$ . Следовательно, сравнительную оценку изменения собственных частот для образцов из различных материалов, но при одинаковых размерах и условиях закрепления будем проводить по выражению, стоящему под радикалом, т.е.:

$$\sqrt{\frac{E \cdot h^2}{\rho \cdot (1 - \mu^2)}}. \quad (8)$$

Числовые расчеты по формуле (8) дают следующие результаты:

- для пластин из листа стали 08 толщиной  $h = 1$  мм,  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu = 0,24$ ,  $\rho = 7,85 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>  $\omega_{ст}^* = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{11} \cdot 1^2 \cdot 10^{-6}}{7,85 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,24^2)}} = 5,20 \frac{м^2}{с}$ ;
- для пластин из сэндвич-панелей толщиной  $h = 1,2$  мм,  $E = 1,76 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu = 0,24$ ,  $\rho = 6,75 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>  $\omega_{с-пан}^* = \sqrt{\frac{1,75 \cdot 10^{11} \cdot 1,2^2 \cdot 10^{-6}}{6,75 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,24^2)}} = 6,31 \frac{м^2}{с}$ ;
- для пластин из базальтопластика  $h = 3,4$  мм,  $E = 1,7 \cdot 10^4$  МПа,  $\mu = 0,28$ ,  $\rho = 1,60 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>  $\omega_{бп}^* = \sqrt{\frac{1,7 \cdot 10^{10} \cdot 3,4^2 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,28^2)}} = 11,54 \frac{м^2}{с}$ ;
- для пластин с покрытием Виброфол 0,30  $h = 1$  мм,  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu = 0,24$ ,  $\rho = 8,05 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>  $\omega_{ст}^* = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{11} \cdot 1^2 \cdot 10^{-6}}{8,05 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,24^2)}} = 5,15 \frac{м^2}{с}$ .

Полученные результаты позволяют заключить, что спектр собственных частот пластин с покрытием Виброфол 0,30 почти не изменился по отношению к спектру пластин из серийной листовой стали 08. В то время как частоты собственных колебаний из базальтопластика

повысились в  $\frac{11.54}{5.20} = 2.22$  раза, что должно благоприятно сказаться на снижении структурного шума. Частично эти материалы исследовались в работах [6, 7, 8].

#### **Выводы:**

Все рассмотренные альтернативные материалы имеют более высокие вибропоглощающие свойства по сравнению с серийным материалом - листовой сталью 08 толщиной 1 мм.

Наилучшими виброизолирующими свойствами обладают панели с нанесенными специализированными вибропоглощающими алюминиево-битумно-полимерными покрытиями (Виброфол 0,30). Примерно на 5-10% коэффициент условного затухания ниже у композиционных материалов, таких как базальтопластик и стеклопластик.

Для базальтопластика и стального листа с вибропоглощающими покрытиями частотные спектры колебаний смещаются в область высоких частот и имеют заметно меньшие амплитудные значения, что положительно сказывается на виброзащитных свойствах.

#### **Рекомендации**

Новые материалы – базальтопластик и материалы с вибропоглощающими покрытиями значительно больше гасят вибрации по сравнению с листовой сталью 08. С учетом специфики условий работы двигателя автомобиля базальтопластик рекомендуется для деталей масляного поддона и клапанных крышек. Для панелей кабины и кузова автомобиля могут быть рекомендованы покрытия Виброфол 0,30. В дальнейшем планируются натурные испытания деталей из этих материалов на двигателе и автомобиле.

#### **Литература**

1. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний [Текст] /В.Л. Бидерман. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
2. Гусев А.С. Теория колебаний в автомобиле- и тракторостроении: учебное пособие с грифом Минобрнауки [Текст] /А.С. Гусев, А.Л. Карунин, Н.А. Крамской, С.А. Стародубцева, В.И. Щербаков. - М.: МГТУ «МАМИ», 2007. – 336 с.
3. Руссинковский В.С. Разработка метода расчета вибрации и структурного шума корпусных деталей автомобильных дизелей: дис. ... канд. техн. наук. 05.04.02: защищена 09.06.2005 [Текст] /В.С. Руссинковский: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 182 с.
4. Рэндалл Р.Б. Частотный анализ, Брюль и Кьер. - Дания, Глоструп: К. Ларсен и сын, 1989 г., 389 с.
5. Яковенко А.Л. Разработка методики и инструментальных средств для прогнозирования структурного шума двигателя внутреннего сгорания: дис. ... канд. техн. наук. 05.04.02: защищена [Текст] /А.Л. Яковенко: МАДИ (ГТУ). – М.: МАДИ (ГТУ), 2009. – 144 с.
6. Варганов М.В. Расчет внутренних напряжений в клеевом шве [Текст] / М.В. Варганов, В.И. Щербаков, И.Н. Зинина //Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2004, № 7. – С. 15 – 18.
7. Щербаков В.И. Сравнительная оценка вибродемпфирующих характеристик панелей, выполненных с применением клея [Текст] /В.И. Щербаков, К.М. Круглов, Д.В. Аксенов, Л.С. Шкурко // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2012, № 3. – С. 44 – 48.
8. Щербаков В.И. Экспериментальная оценка вибродемпфирующих характеристик пластин из различных материалов [Текст] /В.И. Щербаков, К.М. Круглов, Д.В. Аксенов, Л.С. Шкурко // Вестник машиностроения. – 2012, № 8. – С. 31 – 34.

#### ***Разработка математической модели энергопоглощающего кресла с использованием результатов копровых испытаний***

к.ф.-м.н. Кулаков Н.А., Гаврилов Е.В.

*Университет машиностроения*

[kulakov@mami.ru](mailto:kulakov@mami.ru), (495)2230523 доб. 1507, [andhover@mail.ru](mailto:andhover@mail.ru)

*Аннотация.* В статье представлены результаты натурных копровых испытаний,