

Таким образом, наиболее действенными мерами снижения магнитных полей КЛ ВН является:

- 1 Расположение проводов и кабелей каждой цепи в вершинах треугольника и максимально возможное их сближение.
- 2 Для многоцепных конструкций уменьшение интенсивности магнитного поля достигается путем выбора фазировки напряжения на проводах и кабелях каждой цепи.

#### Список литература

- 1 СанПиН 2.2.4.1191–03. Гл. 3.4: Предельно допустимые уровни электромагнитного поля частотой 50 Гц.
- 2 Санитарные нормы и правила СанПин 2.2.4.723–98: изд. офиц. – М. : Минздрав России, 1999.
- 3 Постановление главного санитарного врача РФ № 74 от 25 сентября 2007 г. О введении в действие новой редакции санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200–03 «Санитарнозащитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов».

УДК 539.3

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЯЗКОУПРУГОГО МАТЕРИАЛА

*П. С. ШЕСТЕРКИН, Ю. О. СОЛЯЕВ, А. В. БАБАЙЦЕВ*  
*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

В работе рассматривались характеристики демпфирования, обеспечиваемые различными вязкоупругими материалами. Характеристики демпфирования вязкоупругого материала исследовались с использованием метода демпфирования с ограниченным слоем. Использовался вязкоупругий материал в качестве основного слоя, при котором получалось существенное демпфирование с минимальным воздействием на общую массу конструкции. В подобной структуре энергия рассеивается посредством процессов релаксации в длинноцепочечных молекулярных сетях, когда полимерный материал подвергается вибрациям.

Проводилось экспериментальное исследование вязкоупругих материалов путем испытаний на балке Оберста и импульсной техники в соответствии со стандартом ASTM E 756. Величина демпфирования структуры измерялась методом полосы пропускания половинной мощности. Для измерения демпфирующих характеристик использовалась демпфирующая обработка с ограниченным слоем. Демпфирование в ограниченном слое более эффективно, чем демпфирование в свободном слое, поскольку при работе, выполняемой при сдвиге в вязкоупругом слое, расходуется и рассеивается больше энергии на тепло. Такая обработка считается эффективным способом подавления вибраций от различных конструкций, изготовленных из обычных материалов (к примеру сталь), которые содержат небольшое демпфирование. Эффективность демпфирующей обработки ограниченного слоя в большей степени зависит от геометрии и типа ограничивающего слоя. Максимальная величина напряжения сдвига достигается всякий раз, когда ограничивающий слой имеет тот же тип и геометрию, что и демпфирующая структура.

*Работа выполнена при финансовой поддержке государственного проекта Министерства образования и науки РФ код проекта «Современные технологии экспериментального и цифрового моделирования и оптимизации параметров систем космических аппаратов», код проекта FSFF-2020-0017.*

УДК 539.3

### ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ ИЗГИБ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ ЛИНЕЙНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКОЙ С УЧЕТОМ НЕПОЛНОГО ОПИРАНИЯ НА УПРУГОЕ ОСНОВАНИЕ

*А. В. ЯРОВАЯ*  
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В практике строительства, транспортного машиностроения широко используются трехслойные панели, которые могут полностью опираться на упругое основание, а также иметь зазоры между

конструкцией и основанием. Причиной появления зазора между конструкцией и основанием могут быть как техногенные условия в зоне строительства, так и природные условия. Это приводит к изменению расчетной схемы и напряженно-деформированного состояния рассматриваемого элемента, что в ряде случаев может привести к его преждевременному разрушению.

Рассматривается прямоугольная трехслойная пластина длиной  $l$ , шириной  $b_0$  и высотой  $h$  (рисунок 1). На верхний внешний слой пластины действует распределенная нагрузка, изменяющаяся по линейному закону от значения  $q_0$  до  $q_l$ .

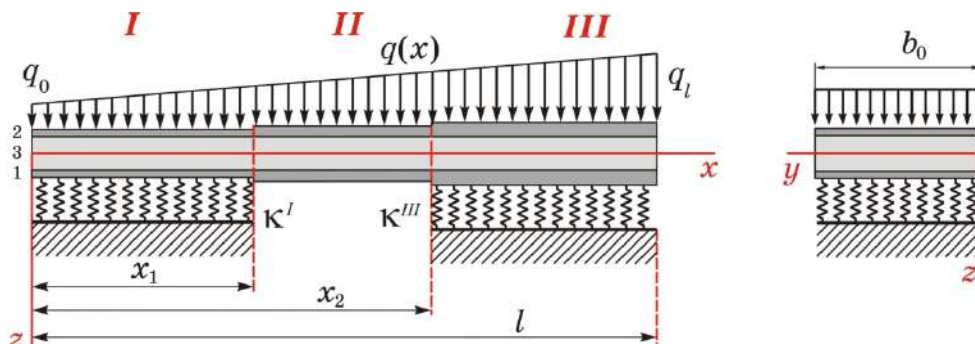


Рисунок 1 – Расчетная схема прямоугольной трехслойной пластины

Номер слоя обозначен индексом  $k$  ( $k = 1, 2, 3$ ). Система координат  $x, y, z$  связана со срединной плоскостью заполнителя. По длине пластины выделяются три участка  $I$  ( $0 \leq x \leq x_1$ ),  $II$  ( $x_1 \leq x \leq x_2$ ),  $III$  ( $x_2 \leq x \leq l$ ). Пластина имеет ступенчато-переменную толщину, высота 1-го и 2-го несущих слоев и половина высоты заполнителя на  $n$ -м участке обозначены  $h_1^n, h_2^n, c^n$  ( $n = I, II, III$ ).

Нагрузка изменяется вдоль пластины по закону:

$$q(x) = q(a_0x + b_0), \quad (1)$$

где  $q, a_0, b_0$  – константы,  $q(0) = qb_0 = q_0$ ;  $q(l) = q(a_0l + b_0) = q_l$ .

Пластина опирается на два участка упругого основания Винклера, через  $\kappa^n$  обозначен коэффициент жесткости упругого основания на  $n$ -м участке. Реакция основания  $q_R^n(x)$  пропорциональна прогибу  $w^n(x)$ :  $q_R^n(x) = \kappa^n w^n(x)$ . Слои считаются несжимаемыми по толщине. Деформации малые. Материалы слоев проявляют упругие свойства, для них справедлив закон Гука.

Для описания кинематики трехслойного пакета используется гипотеза «ломаной» линии: прямолинейная до деформирования нормаль при изгибе становится ломаной; в несущих слоях нормаль остается перпендикулярной к деформированной оси стержня; в заполнителе за счет сдвига она поворачивается на дополнительный угол.

В качестве искомых величин принимаются функции  $w^n(x), u^n(x)$  – прогиб и продольное перемещение срединной плоскости заполнителя, а также  $\psi^n(x)$  – угол поворота нормали в заполнителе за счет сдвига (угол сдвига) на  $n$ -м участке. В точках сопряжения участков соблюдаются условия непрерывности перемещений.

Уравнения равновесия выводятся с помощью принципа возможных перемещений Лагранжа, который выражает условие равновесия системы внутренних и внешних сил. Для этого составляются и приравниваются выражения возможных работ внешних и внутренних сил. Из полученного равенства следуют дифференциальные уравнения равновесия в усилиях, силовые граничные условия и условия для внутренних усилий в точках сопряжения участков.

Связь напряжений  $\sigma_x$  и деформаций  $\epsilon_x$  при цилиндрическом изгибе ортотропной пластины:

$$\sigma_x = A_x \epsilon_x; \quad A_x = \frac{E_x}{1 - \nu_{xy} \nu_{yx}}. \quad (2)$$

где  $E_x$  – модуль Юнга;  $\nu_{xy}, \nu_{yx}, \nu_{xz}$  – коэффициенты Пуассона.

С использованием соотношений (2) компоненты тензора напряжений в слоях выражаются через перемещения, и далее внутренние силы и моменты через искомые функции. Полученные выражения подставляются в уравнения равновесия в усилиях. В результате получают системы обыкновенных дифференциальных уравнений равновесия упругой трехслойной пластины в перемещениях. Для участков  $I$  и  $III$ , связанных с упругим основанием, система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} a_1^n u^n_{,xx} + a_6^n \psi^n_{,xx} - a_7^n w^n_{,xxx} = 0, \quad a_6^n u^n_{,xx} + a_2^n \psi^n_{,xx} - a_3^n w^n_{,xxx} - a_5^n \psi^n = 0, \\ a_7^n u^n_{,xxx} + a_3^n \psi^n_{,xxx} - a_4^n w^n_{,xxx} - \kappa^n w^n = 0 \quad (n = I, III). \end{aligned} \quad (3)$$

Для участка  $II$ , не связанного с упругим основанием и нагруженного поперечной нагрузкой, система имеет вид:

$$\begin{aligned} a_1^n u^n_{,xx} + a_6^n \psi^n_{,xx} - a_7^n w^n_{,xxx} = 0, \quad a_6^n u^n_{,xx} + a_2^n \psi^n_{,xx} - a_3^n w^n_{,xxx} - a_5^n \psi^n = 0, \\ a_7^n u^n_{,xxx} + a_3^n \psi^n_{,xxx} - a_4^n w^n_{,xxx} = -q^n, \quad (n = II). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $a_1^n, \dots, a_7^n$  – параметры, характеризующие геометрические и упругие свойства слоев на  $n$ -м участке,

$$a_1^n = A_x^{(1)} h_1^n + A_x^{(2)} h_2^n + 2A_x^{(3)} c^n; \quad a_2^n = c^{n2} \left[ A_x^{(1)} h_1^n + A_x^{(2)} h_2^n + \frac{2}{3} A_x^{(3)} c^n \right]; \dots \quad (5)$$

Соотношения для сдвига в заполнителе  $\psi^n(x)$ , прогиба  $w^n(x)$  и продольного перемещения срединной плоскости заполнителя  $u^n(x)$  получим, решив соответствующие системы уравнений равновесия (3), (4). Аналитический вид решений зависит от типа упругого основания.

Для первого и третьего участков ( $n = I, III$ ) на упругом основании средней жесткости выражение для прогиба имеет вид

$$w^n(x) = C_1^n \operatorname{sh}(\lambda_1^n x) + C_2^n \operatorname{ch}(\lambda_1^n x) + C_3^n \operatorname{sh}(\lambda_3^n x) + C_4^n \operatorname{ch}(\lambda_3^n x) + C_5^n \operatorname{sh}(\lambda_5^n x) + C_6^n \operatorname{ch}(\lambda_5^n x) + w_p^n. \quad (6)$$

Для второго участка ( $n = II$ ), не связанного с упругим основанием,

$$w^n(x) = C_1^n \left( \alpha_{17}^n b_{11}^n x + \alpha_{18}^n x^3 / 6 \right) + C_2^n b_{14}^n \operatorname{ch}(\beta_3^n x) + C_3^n b_{14}^n \operatorname{sh}(\beta_3^n x) + C_4^n x^2 / 2 + C_5^n x + C_6^n + g_2^n(x). \quad (7)$$

В выражениях (6), (7)  $C_1^n, \dots, C_6^n$  – константы интегрирования,  $w_p^n(x) = \frac{q}{\kappa} (a_0 x + b_0)$  – частное решение, соответствующее линейной нагрузке (1), коэффициенты  $b_i^n, \alpha_i^n, \beta_i^n$  и функция  $g_2^n(x)$  выражаются через параметры  $a_i^n$  (5).

Для определения констант интегрирования необходимо учесть граничные условия и условия сопряжения участков друг с другом. Граничные условия на торцах и условия сопряжения на границах участков позволяют составить систему 24-линейных алгебраических уравнений для определения констант интегрирования.

Объединением решений для отдельных участков получаются перемещения для всей пластины. Выражение для прогиба имеет вид

$$w(x) = w^I(x) + \left[ w^{II}(x) - w^I(x) \right] H_0(x - x_1) + \left[ w^{III}(x) - w^{II}(x) \right] H_0(x - x_2). \quad (8)$$

В выражении (8)  $H_0$  – функция Хевисайда.

Был составлен комплекс программ в среде MathCad, с помощью которого получены числовые результаты для нескольких типов трехслойных пакетов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект T20P-047).*

УДК 539.8

## MECHANICAL RESPONSE OF A STRUCTURAL ELEMENT CONTAINING A HEALING AGENT: FINITE ELEMENT MODELING

T. ZHELYAZOV

Technical University of Sofi, Bulgaria

Various types of composites find numerous applications in all fields of industry: aeronautical, automotive, building, etc. Generally, composite materials are a viable technical solution because they are lightweight, and, at the same time, they possess high strength. Also, they are resistant to corrosion, chemical attacks, and high temperature.

This study focuses on the numerical modeling of the structural element made of a cement-based composite containing a healing agent. Presumably, nucleation and propagation of cracks trigger the self-healing