

УДК 624.04

## **ГАШЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ СТАЛЬНЫХ КАРКАСОВ ПРИ ПОМОЩИ ПЛАСТИЧЕСКИХ НАКЛАДОК**

**Шеин Александр Иванович,**

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,  
г. Пенза,*

*доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Механика».*

**Чуманов Александр Васильевич,**

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,  
г. Пенза,*

*старший преподаватель кафедры «Механика».*

**Евсеев Сергей Евгеньевич,**

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,  
г. Пенза,*

*инженер вычислительного центра ИСИ.*

### **Аннотация**

В статье приводится методика вывода уравнений МКЭ для композитного конечного элемента в виде стального стержня с накладками из жестко-пластического материала и результаты физического эксперимента по исследованию демпфирующего эффекта накладок. По результатам эксперимента установлена высокая эффективность работы алюминиевых накладок на защищаемой стальной конструкции на всем спектре возмущающих воздействий.

**Ключевые слова:** колебания, сейсмическая защита, гаситель колебаний, пластические накладки.

# DAMPING OF VIBRATIONS OF STEEL FRAMES BY MEANS OF PLASTICITY LININGS

*Shein Alexander Ivanovich,*

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the department "Mechanics".*

*Chumanov Alexander Vasilyevich,*

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,  
Senior Lecturer of the department of Mechanics.*

*Evseev Sergey Evgenyevich,*

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,  
engineer of the ICI Computing Center.*

## **Abstract**

The article presents a method for deriving FEM equations for a composite finite element in the form of a steel rod with overlays made of rigid plastic material and the results of a physical experiment to study the damping effect of overlays. According to the results of the experiment, the high efficiency of aluminum linings on the protected steel structure over the entire spectrum of disturbing influences was established.

**Keywords:** vibrations, seismic protection, vibration dampener, plasticity linings

**Введение.** В работах [1, 2, 3] описаны основные принципы борьбы с вибрациями. В [4...17] приведены основные положения работы двух новых систем гашения: ленточно-тросовой системы с гидроцилиндром одностороннего действия и накладок из жестко-пластических материалов.

Данная статья посвящена более подробному методическому изложению материала по выводу соотношений МКЭ для композитного стержня с пластическими накладками и иллюстрации гашения колебаний плоских и пространственных стальных стержневых систем, вызванных стационарными и

нестационарными воздействиями природного и техногенного характера, включая действие нерегулярных импульсов. При этом практическая борьба с развитием колебаний осуществляется при помощи алюминиевых полосовых накладок – устройств гашения колебаний пассивного типа: генераторов моментов сопротивления движению для гашения и низкочастотных и высокочастотных колебаний. Таким образом данная система гашения работает на всем спектре колебаний. Высокая эффективность разработанных устройств подтверждается данными экспериментальных исследований.

Для гашения колебаний и предотвращения резонансных перемещений элементов каркаса зданий используем систему защиты «упругий сердечник – пластические накладки». Данная система может быть весьма полезна для снижения уровня вибрации приборов и электронных модулей. При этом пластическими накладками могут служить, например, полиэтиленовые пленки покрытия.

**Вывод уравнений МКЭ для композитного стержня.** Рассмотрим композитное сечение стержня (колонны), состоящее из упругой центральной части и пластических накладок (рисунок 1).

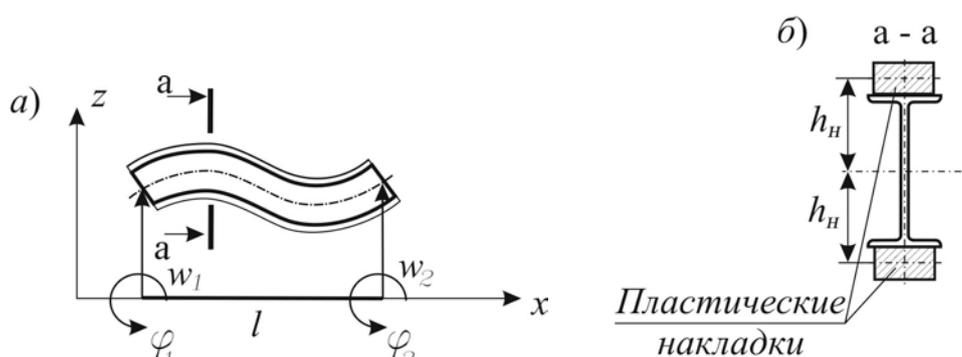


Рисунок 1 – Композитное сечение стержня

При колебательном движении такого стержня в идеально жесткопластических накладках возникают постоянные по величине, но переменные по направлению силы сопротивления движению. Эти силы создают постоянный по модулю момент сопротивления движению. При

симметричных сечениях и постоянных по толщине накладках величина этого момента равна

$$M_{pl} = 2 \cdot \sigma_T \cdot A_H \cdot h_H \quad (1)$$

Здесь  $A$  – площадь сечения накладки;

$h_H$  – расстояние от центра тяжести сечения до центра накладки;

$\sigma_H$  – предел текучести материала накладок.

Работа внутренних сил, затраченная на изгиб или разгиб композитного стержня, равна:

$$\Pi = \int_0^l \left( 0,5 \cdot E \cdot I \cdot w'' \pm 2 \cdot A \cdot h_H \cdot \sigma_H^T \right) \cdot w'' \cdot dx \quad (2a)$$

Здесь  $EI$  – жесткость упругой части сечения стержня;

$w''$  – кривизна оси стержня.

Перепишем интеграл (1) в виде:

$$\Pi = 0,5 \cdot E \cdot I \int_0^l (w'')^2 \cdot dx \pm M_{pl} \int_0^l w'' \cdot dx. \quad (2б)$$

Аппроксимируя прогиб кубическим полиномом:

$$w = w_1 + \varphi_1 x + \frac{-3w_1 - 2\varphi_1 l + 3w_2 - \varphi_2 l}{l^2} \cdot x^2 + \frac{2w_1 + \varphi_1 l - 2w_2 + \varphi_2 l}{l^3} \cdot x^3, \quad (3)$$

получим выражение для кривизны в виде:

$$w'' = 2 \frac{-3w_1 - 2\varphi_1 l + 3w_2 - \varphi_2 l}{l^2} + 6 \frac{2w_1 + \varphi_1 l - 2w_2 + \varphi_2 l}{l^3} \cdot x, \quad (4)$$

Здесь  $U = (w_1 \quad \varphi_1 \quad w_2 \quad \varphi_2)$  – вектор узловых перемещений стержня (см. рис.1).

Работа внешних сил в выражении для полной потенциальной энергии

$$A = -U^T P, \quad (5)$$

где  $P$  – вектор внешних воздействий

Используя свойства полной потенциальной энергии механической системы для композитного стержня придем к матричному соотношению:

$$KU = P - F_H. \quad (6)$$

Здесь  $K$  – матрица жесткости изгиба упругого сердечника стержня:

$$K = \frac{2EI}{l^3} \begin{bmatrix} 6 & 3l & -6 & 3l \\ 3l & 2l^2 & -3l & l^2 \\ -6 & -3l & 6 & -3l \\ 3l & l^2 & -3l & 2l^2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$F_H$  – вектор сил пластического сопротивления накладок при изгибе стержня

$$F_H = \begin{pmatrix} 0 \\ \mp M_{pl} \\ 0 \\ \pm M_{pl} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Переходя к механической системе и к динамической задаче вынужденных колебаний, приходим к дифференциальному уравнению движения

$$M\ddot{U} + KU = P - F_H \quad (9)$$

где  $M$  – диагональная матрица масс механической системы.

Формулы (1), (6) и (8) показывают, что эффективность работы силы пластического торможения зависит от площади накладок и величины пластических напряжений материала накладок.

**Физический эксперимент.** При подготовке и проведении физического эксперимента в качестве материала пластических накладок был выбран алюминий, который отличается высокой пластичностью. В настоящее время соединения разнородных конструкционных материалов могут выполняться с использованием наклейки. В данном случае алюминиевые ленты толщиной 25 мкм наклеивались на стальные полосы.

При проведении эксперимента выполнена видеосъемка колебаний стальных конструкций консольных балок с массами на концах консолей без накладок и с алюминиевыми накладками.

Конструкции консольных балок представляли собой две одинаковые стальные полосы 4x40x1000 мм. Сверху к консолям приварены одинаковые прямоугольные стальные параллелепипеды весом 3650 г. Эти параллелепипеды и представляли собой одинаковые колеблющиеся массы.

Исследовалось два случая:

1. Колебания масс без установки накладок (рисунок 2).



Рисунок 2 – Колебания без накладок (практически одинаковые амплитуды и частоты)

2. Колебания с накладками (рисунок 3) (наклеено по три слоя алюминиевых лент - 75 мкм с каждой стороны на правую (при снятии отсчетов – дальнюю) от наблюдателя стальную полосу). Т.е. толщина накладок составляла всего 3,75% от высоты сечения балки.

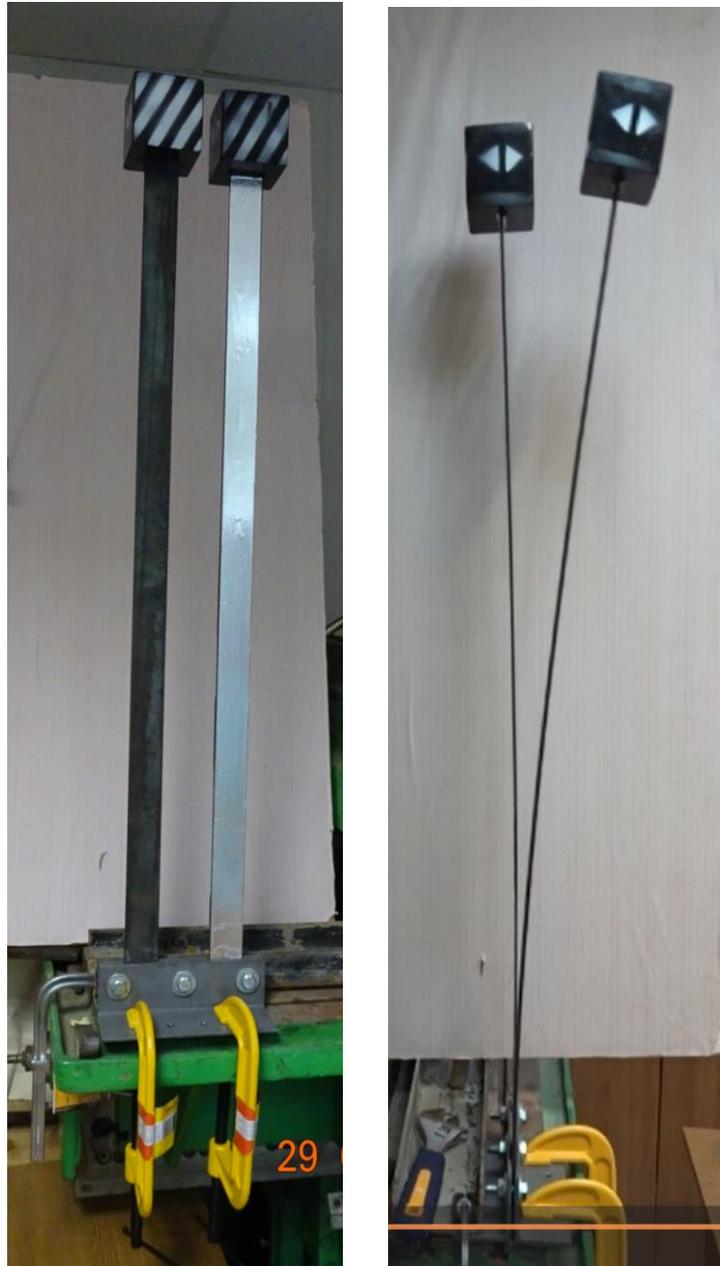


Рисунок 3 – Колебания с накладками (наклеено 75 мкм с каждой стороны на правую (при снятии отсчетов – дальнюю) от наблюдателя стальную полосу).

Для создания начальных сил упругости грузы отклонялись на одинаковые расстояния от начального положения равновесия и отпускались.

В первом случае колебания совершались на всем временном интервале с практически одинаковыми, между собой, амплитудами и частотами на всем интервале колебательных движений, т.е. синхронно.

Во втором случае амплитуда колебаний балки с накладками достаточно резко уменьшается по отношению к балке без накладок. Грузы отклонялись от положения исходного равновесия на 15 см и одновременно отпускались. Через 9,55с груз с накладками снижал размах колебаний на одну треть, а через 26,16с размах колебаний снижался на две трети. За это время балка с накладками совершила 20 полных колебаний (рисунок 4). При этом после практически полной остановки груза с накладками амплитуда колебаний груза без накладок превышала 5 см. Т.е. с помощью данного эксперимента показан эффект гашения колебаний стальных конструкций накладками из пластических материалов. Физический эксперимент очень убедительно подтверждает высокую демпфирующую способность пластических накладок. Важно, что в процессе колебаний не произошло никаких отслоений или выпучиваний накладок.

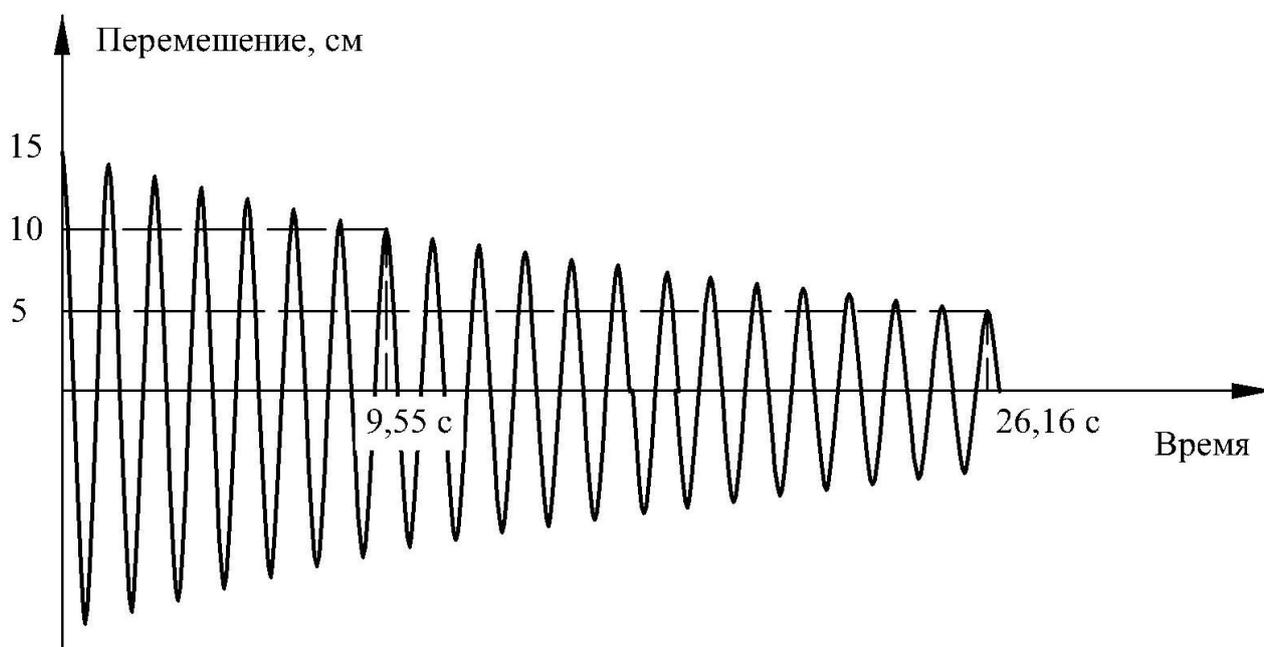


Рисунок 4 – График колебаний массы консольной балки с накладками

Амплитуда колебаний балки с накладками достаточно резко уменьшается

**Вывод:** Приведена методика вывода уравнений МКЭ для композитного конечного элемента в виде стального стержня с накладками из жестко-пластического материала и результаты физического эксперимента по исследованию демпфирующего эффекта накладок. Экспериментально подтверждена высокая демпфирующая способность пластических накладок.

В работе развивается актуальное научное направление гашения колебаний. Полученные результаты могут служить отправной точкой для широкого круга задач гашения колебаний и повышения долговечности защищаемых конструкций.

Статья подготовлена при поддержке гранта РФФ № 23-29-00653 «Разработка способов гашения колебаний куполообразующих и прямоугольных каркасов зданий и сооружений».

#### **Библиографический список:**

1. Динамический расчет зданий и сооружений.–Под. ред. Б.Г. Коренева. –М.: Стройиздат, 1984.– с. 303.
2. Дукарт А.В. Задачи теории ударных гасителей колебаний. –М.: Издательство АСВ, 2006–208 с.
3. Булгаков С.Н., Цейтлин А.И. и др. Теория здания. Том. 1. Здание–оболочка. –М.: Издательство АСВ, 2007–280 с.
4. Шеин А.И., Чуманов А.В. Ленточная система гашения колебаний локатора при сейсмических воздействиях // Строительная механика и расчет сооружений. 2020. № 3 (290). С. 62-67.
5. Шеин А.И., Чуманов А.В. Колебания стержневых систем с учетом физической и геометрической нелинейности // Строительная механика и расчет сооружений. 2020. № 4 (291). С. 54-60.
6. Чуманов А.В., Шеин А.И., Монахов В.А. Ленточная система гашения колебаний для закрытых куполов // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 1 (46). С. 122-129.

7. Шеин А.И., Чуманов А.В. Определения рационального направления лент (тросов) крепления ленточного-тросового гасителя колебаний сооружений // Региональная архитектура и строительство. 2022., №1. С.44-50.

8. Shein A.I., Chumanov A.V. Belt vibration system for closed-type domes // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Т. 160. С. 245-252.

9. Shein A., Chumanov A. Modified method of variable elasticity parameters for solving problems of dynamics of rod systems taking into account physical and geometric nonlinearities // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 5. Сер. "5th World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium, WMCAUS 2020 – Vol. 4. 2020. С. 042066.

10. Shein A., Chumanov A., Malkov A., Laskov N. New vibration dampers for buildings and structures // В сборнике AIP Conference Proceedings. Vol. 2503. 2022. С. 050065.

11. Шеин А.И., Чуманов А.В. Конструктивные способы гашения колебаний зданий и сооружений // Моделирование и механика конструкций. 2017. № 6. С. 7.

12. Шеин А.И., Чуманов А.В. Численные эксперименты по гашению колебаний вертикального стержня реактивными гасителями // Моделирование и механика конструкций. 2018. № 8. С. 2.

13. Шеин А.И., Чуманов А.В. Численные эксперименты по гашению колебаний рамных каркасов с помощью пластических накладок, установленных на элементы каркаса // Моделирование и механика конструкций. 2018. № 7. С. 2.

14. Шеин А.И., Чуманов А.В. Особенности колебательных движений циклически-симметричных рамных систем // Моделирование и механика конструкций. 2019. № 9. С. 3.

15. Шеин А.И., Чуманов А.В. Инерционно преднатяжительная полиэстерно-ленточная система гашения колебаний циклически симметричных

конструкций купольного типа // Моделирование и механика конструкций. 2019. № 10. С. 1-12.

16. Шеин А.И., Чуманов А.В. Колебания стержневых систем с учетом физической и геометрической нелинейности // Моделирование и механика конструкций. 2020. № 11. С. 1-14.

17. Шеин А.И., Чуманов А.В. Колебания закрытых куполов с ленточной системой гашения колебаний // Моделирование и механика конструкций. 2020. № 12. С. 1-10.

18. Шеин А.И., Чуманов А.В., Мальков А.И. Новые гасители колебаний зданий и сооружений // Моделирование и механика конструкций. 2021. № 13. С. 10-25.