



УДК 691.58

В. Д. ЧЕРКАСОВ д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой прикладной механики;
М. А. ТЮРЯКИН аспирант кафедры прикладной механики

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

ФГБУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва».

Россия, 430005, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68.

Тел.: (927) 276-40-35, (927) 184-27-32; эл. почта: vd-cherkasov@yandex.ru;
max5554284@yandex.ru

Ключевые слова: композит, демпфирующие свойства, коэффициент потерь.

В статье представлены результаты теоретического и экспериментального исследования демпфирующих свойств комбинированного вибропоглощающего покрытия, состоящего из стальной пластины, двух вязкоупругих слоев, прокладки из экструзионного пенополистирола и алюминиевой фольги. Приведена математическая модель для расчета коэффициента потерь многослойной конструкции с учетом геометрических параметров и упругих характеристик каждого слоя. Представленные результаты обеспечивает сходимость теоретических и экспериментальных данных. Доказано, что предложенная методика прогнозирования демпфирующих свойств является достоверной и может быть использована для инженерного расчета вибропоглощающих покрытий.

Введение

При гашении вибрации в настоящее время широко используют вибропоглощающие покрытия [1–4]. Существует большое количество различных видов этих материалов [4–8]. У всех у них имеется существенный недостаток. Коэффициент потерь не превышает 0,4. Для гашения больших вибраций этого недостаточно. Для увеличения демпфирующих свойств применяются комбинированные вибропоглощающие покрытия [9–11]. Недостатком существующих комбинированных вибропоглощающих покрытий является большая масса, недостаточный коэффициент потерь и отсутствие математических зависимостей, позволяющих проектировать комбинированные покрытия с необходимыми свойствами. Целью данной работы являлось проектирование демпфирующих свойств комбинированного покрытия в зависимости от демпфирующих свойств и геометрических параметров составляющих его слоев.

Основу комбинированного покрытия составляет армированное вибропоглощающее покрытие. Для увеличения демпфирующих свойств в нем предлагается это покрытие удалить от демпфирующей конструкции на определенное расстояние. Это достигается установкой легкой, жесткой прокладки между пластиной и вибропоглощающим покрытием [4, 11]. В результате этого в покрытии увеличиваются деформации, что приводит к повышению коэффициента потерь в конструкции.

Конструкция разработанного комбинированного покрытия представлена на рис. 1.

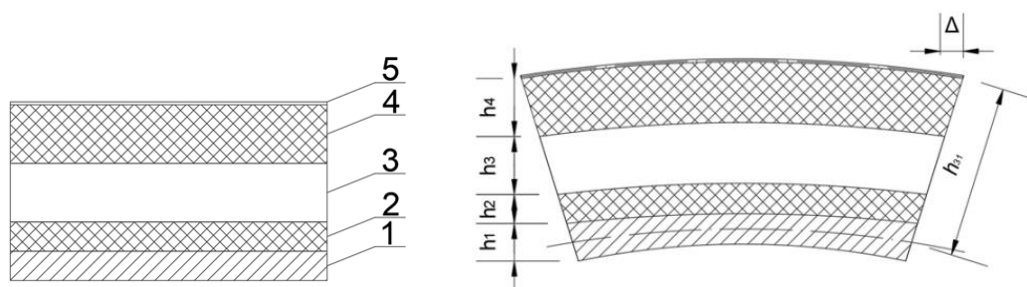


Рис. 1. Конструкция комбинированного вибропоглощающего покрытия и характер его деформации:

1 – демпфируемая пластина толщиной 1 мм; 2 – вязкоупругий слой толщиной 1 мм; 3 – прокладка из экструзионного пенополистирола толщиной 2 мм; 4 – вязкоупругий слой толщиной 2 мм; 5 – алюминиевая фольга 100 мкр

Коэффициент потерь такого покрытия предлагается определять по следующей формуле [2]:

$$\eta \approx \frac{\eta_2}{1 + \frac{a + 12a_3a_{21}^2\beta_3g_2(1 + \eta_3^2)}{a_3\beta_3[aa_3^2 + 12a_{31}^2g_2^2]}}, \quad (1)$$

где $a = (1 + g_2)^2 + \eta_3^2$; $g_2 = \frac{G_2}{E_3h_3k_n^2h_2}$;

$a_3 = \frac{h_2}{h_1}$; $a_3 = \frac{h_{31}}{h_1}$; $h_{31} = \frac{1}{2}(h_1 + h_3) + h_2$; $\beta_3 = \frac{E_3}{E_1}$.

Анализ выражения (1) показывает, что коэффициент потерь вязкоупругого слоя зависит от соотношения толщин слоев и модулей упругости материала слоев.

Таким образом, для получения покрытия с высоким коэффициентом потерь, прежде всего, необходимо подобрать материал вязкоупругого слоя с высоким коэффициентом потерь, установить необходимое соотношение толщин слоев и их модулей упругости.

Экспериментальная часть

Для подтверждения теоретических результатов были проведены экспериментальные исследования.

Материалы и методы

Коэффициент потерь комбинированных вибропоглощающих материалов определялся по методу, описанному в [4, 10–13].

В качестве прокладки и проставки использовали экструзионный пенополистирол.

Испытания образцов проводились при температуре 20°C, влажность в помещении составляла 60–70 %.

Результаты и обсуждения

Результаты теоретических и экспериментальных исследований представлены на рис. 2 и 3. Теоретические исследования показали, что оптимальная толщина прокладки составляет 2 мм. Это подтвердили и экспериментальные исследования (рис. 2).

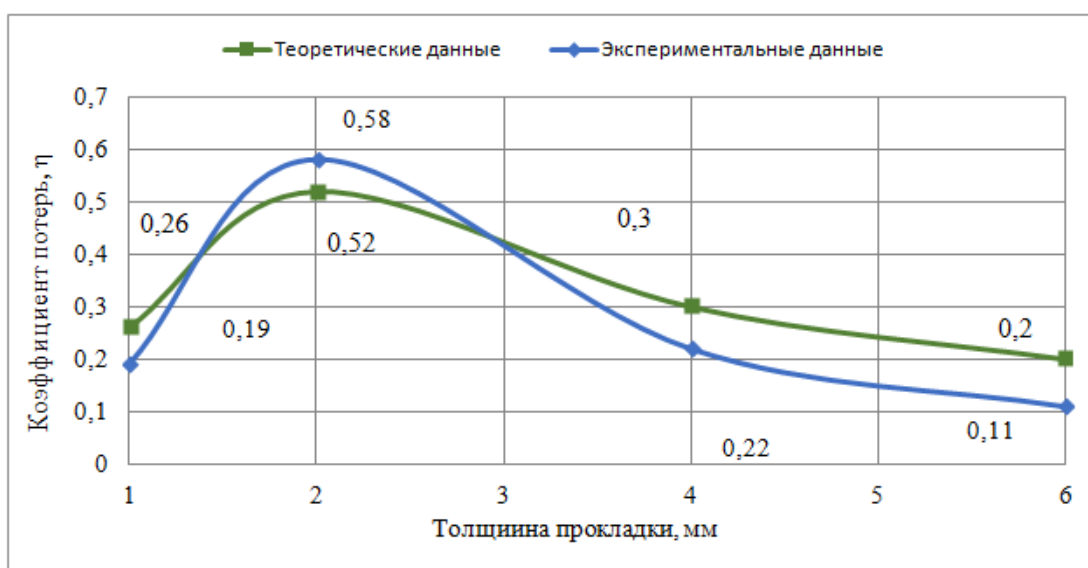


Рис. 2. Зависимость коэффициента потерь комбинированного покрытия от отношения толщины прокладки к вязкоупругому слою: экспериментальные и расчетные данные

Следующий показатель, влияющий на коэффициент потерь покрытия, – толщина вязкоупругого слоя. Экспериментальные и теоретические исследования показали, что достаточная толщина вязкоупругого слоя 2 мм (рис. 3).

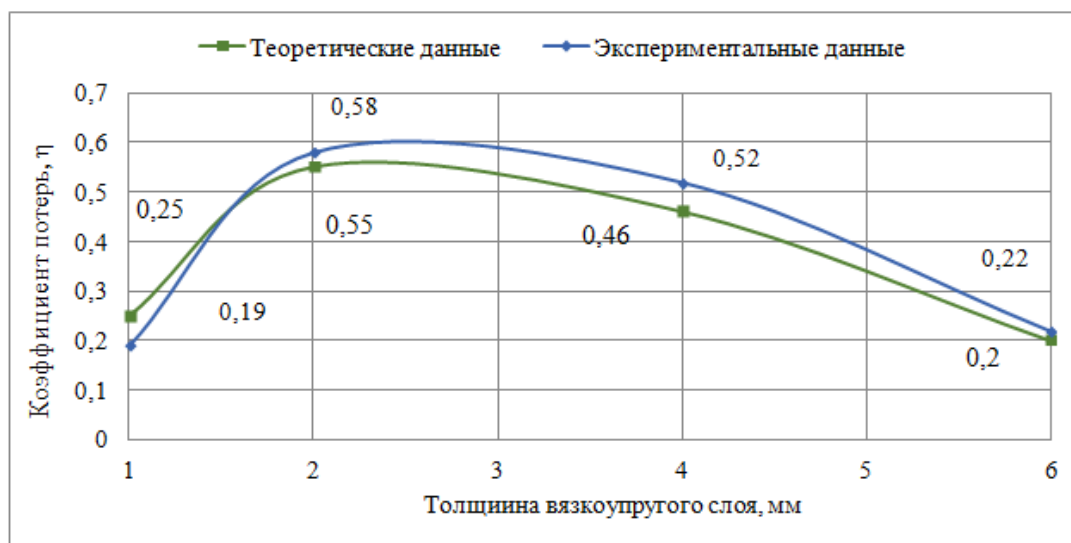


Рис. 3. Зависимость коэффициента потерь комбинированного покрытия от отношения толщин вязкоупругого слоя к прокладке: экспериментальные и расчетные данные

Увеличение толщины прокладки и вязкоупругого слоя более 2 мм приводит к смещению нейтральной линии конструкции к вязкоупругому слою, что приводит к снижению деформации в нем и, как следствие, снижению вибропоглощающих свойств. Расчеты коэффициента потерь по формуле (1) дают хорошую сходимость с экспериментальными значениями. Это говорит о том, что с помощью



зависимости (1) можно рассчитывать коэффициент потерь предложенного комбинированного вибропоглощающего покрытия.

Выводы

1. Разработана и экспериментально верифицирована математическая модель (формула 1) для расчета коэффициента потерь комбинированного вибропоглощающего покрытия, состоящего из стальной пластины, двух вязкоупругих слоев, прослойки из экструзионного пенополистирола и алюминиевой фольги. Высокая сходимость теоретических и экспериментальных данных подтверждает высокую точность предлагаемого метода.

2. Определены ключевые параметры, оказывающие определяющее влияние на демпфирующие свойства покрытия. Установлено, что наибольший вклад в увеличение коэффициента потерь вносит удаление вязкоупругого слоя от нейтральной оси конструкции, что достигается за счет использования промежуточной прокладки. Эффективность системы также существенно зависит от соотношения модулей упругости и толщин всех слоев.

3. Экспериментально установлены оптимальные соотношения геометрических и физико-механических характеристик слоев, при которых достигается максимальная эффективность вибропоглощения. На основе анализа полученных зависимостей предложены практические рекомендации по конструированию покрытий для конкретных инженерных задач.

4. Доказана перспективность использования комбинированных схем для создания вибропоглощающих материалов с коэффициентом потерь, значительно превышающим показатели традиционных монолитных покрытий. Предложенный подход является универсальным и может быть применен для широкого спектра материалов и конструкций, что открывает новые возможности в области виброакустической защиты оборудования и строительных конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О критериях оценки эффективности вибропоглощающих покрытий / Л. П. Борисов, Б. А. Канаев, С. А. Рыбак [и др.] // Акустический журнал. – 1977. – Т. XXIII, № 3. – С. 384–389.
2. Никифоров, А. С. Вибропоглощение на судах / А. С. Никифоров. – Ленинград : Судостроение, 1979. – 184 с.
3. Николаев, А. Ф. Вибропоглощающие полимерные материалы / А. Ф. Николаев, Н. И. Дувакина, Т. А. Александрова // Пластические массы. – 1989. – №11. – С. 40–42.
4. Черкасов, В. Комбинированные вибропоглощающие покрытия / В. Черкасов, Д. Черкасов, М. Тюрякин // Русский инженер. – 2021. – № 3 (72). – С. 47–48. – EDN IPGSHH.
5. Иванов, Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом : учебник / Н. И. Иванов. – Москва : Университетская книга, Логос, 2008. – 424 с. – ISBN 978-5-598704-286-0.
6. Соломатов, В. И. Вибропоглощающие композиционные материалы / В. И. Соломатов, В. Д. Черкасов, Н. Е. Фомин. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2001. – 96 с. – ISBN 5-7103-0585-5.
7. Шеянов, Д. А. Методы регулирования вибропоглощающих свойств полимерных материалов / Д. А. Шеянов // Научный аспект. – 2024. – Т. 43, № 1. – С. 5615–5621. – EDN GRXNVQ.



8. Кирпичников, В. Ю. Об эффективности вибропоглощающих покрытий / В. Ю. Кирпичников, И. О. Малинин, А. Ю. Олейников // Noise Theory and Practice. – 2024. – Т. 10, № 2 (37). – С. 29–43. – EDN KMVIWP.
9. Khorasani, R. An analytical and experimental study on dampening material effects on the dynamic behavior of free-free aluminum sheets / R. Khorasani, S. Kordkheili, H. Parviz // Engineering Solid Mechanics. – 2021. – Vol. 9. – P. 111–122. – DOI 10.5267/j.esm.2021.1.002.
10. Nonlinear vibration analysis of carbon fiber-reinforced composites with frequency-dependence and strain-dependence: Experimental and theoretical studies / Xiaofeng Liu, Wei Sun, Xianfei Yan [et al.] // Thin-Walled Structures. – 2023. – Vol. 183. – Art. 110369. – ISSN 0263-8231. – DOI 10.1016/j.tws.2022.110369.
11. Черкасов, В. Д. Свойства комбинированных вибропоглощающих покрытий / В. Д. Черкасов, М. А. Тюркин // Защита от шума и вибрации : сборник трудов X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 01–03 октября 2025 года. – Санкт-Петербург : Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2025. – С. 239–245. – EDN VTTEEP.
12. Авдонин, В. В. Вибропоглощающие композиционные покрытия : специальность 05.23.05 «Строительные материалы и изделия» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Авдонин Валерий Викторович. – Пенза, 2015. – 123 с. – EDN MTCAAI.
13. Черкасов, В. Д. Исследование влияния наполнителей и модификаторов на демпфирующие свойства материала на основе ПВА / В. Д. Черкасов, М. В. Тюрин, В. В. Авдонин // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 8 (59). – С. 36. – EDN ZMWROG.

CHERKASOV Vasily Dmitrievich, doctor of technical sciences, professor, holder of the chair of applied mechanics; TYURYAKIN Maksim Alekseevich, postgraduate student of the chair of applied mechanics

THEORETICAL BACKGROUND FOR THE DEVELOPMENT OF COMBINED VIBRATION-ABSORBING MATERIALS

National Research Ogarev Mordovia State University.

68, Bolshevistskaya St., Saransk, Republic of Mordovia, 430005, Russia.

Tel.: (927) 276-40-35, (927) 184-27-32; e-mail: vd-cherkasov@yandex.ru; max5554284@yandex.ru

Key words: composite, damping properties, loss factor.

This article presents the results of a theoretical and experimental study of the damping properties of a combined vibration-absorbing coating consisting of a steel plate, two viscoelastic layers, a lining made of extruded polystyrene foam, and aluminum foil. A mathematical model is presented for calculating the loss factor of the multilayer structure, taking into account the geometric parameters and elastic characteristics of each layer. The presented results ensure the convergence of theoretical and experimental data. The proposed method for predicting damping properties is proven to be reliable and can be used for engineering calculations of vibration-absorbing coatings.

REFERENCES

1. Borisov L. P., Kanaev B. A., Rybak S. A. [et al.] O kriteriyakh otsenki effektivnosti vibropogloshchayushchikh pokrytiy [Criteria for evaluating the efficiency of vibration-damping coatings]. Akusticheskiy zhurnal [Acoustic Journal]. 1977, Vol. XXIII, № 3, P. 384–389.



2. Nikiforov A. S. Vibropogloshchenie na sudakh [Vibration damping on ships]. Leningrad, Sudostroenie, 1979, 184 p.
3. Nikolaev A. F., Duvakina N. I., Aleksandrova T. A. Vibropogloshchayushchie polimernye materialy [Vibration-damping polymeric materials]. Plasticheskie massy [Plastic Masses]. 1989, № 11, P. 40–42.
4. Cherkasov V., Cherkasov D., Tyuryakin M. Kombinirovannye vibropogloshchayushchie pokrytiya [Combined vibration-damping coatings]. Russkiy inzhener [Russian Engineer]. 2021, № 3 (72), P. 47–48. EDN IPGSHH.
5. Ivanov N. I. Inzhenernaya akustika. Teoriya i praktika bor'by s shumom [Engineering acoustics. Theory and practice of noise control]: uchebnik. Moscow, Universitetskaya kniga, Logos, 2008, 424 p. ISBN 978-5-598704-286-0.
6. Solomatin V. I., Cherkasov V. D., Fomin N. E. Vibropogloshchayushchie kompozitsionnye materialy [Vibration-damping composite materials]. Saransk, Izd-vo Mordov. un-ta, 2001, 96 p. ISBN 5-7103-0585-5.
7. Sheyanov D. A. Metody regulirovaniya vibropogloshchayushchikh svoystv polimernykh materialov [Methods for regulating the vibration-damping properties of polymeric materials]. Nauchny aspekt [Scientific Aspect]. 2024, Vol. 43, № 1, P. 5615–5621. EDN GRXNVQ.
8. Kirpichnikov V. Yu., Malinin I. O., Oleynikov A. Yu. Ob effektivnosti vibropogloshchayushchikh pokrytiy [On the efficiency of vibration-damping coatings]. Noise Theory and Practice. 2024, Vol. 10, № 2 (37), P. 29–43. EDN KMVIWP.
9. Khorasani R., Kordkheili S., Parviz H. An analytical and experimental study on dampening material effects on the dynamic behavior of free-free aluminum sheets. Engineering Solid Mechanics. 2021, Vol. 9, P. 111–122. DOI 10.5267/j.esm.2021.1.002.
10. Liu X., Sun W., Yan X. [et al.] Nonlinear vibration analysis of carbon fiber-reinforced composites with frequency-dependence and strain-dependence: Experimental and theoretical studies. Thin-Walled Structures. 2023, Vol. 183, Art. 110369. ISSN 0263-8231. DOI 10.1016/j.tws.2022.110369.
11. Cherkasov V. D., Tyuryakin M. A. Svoystva kombinirovannykh vibropogloshchayushchikh pokrytiy [Properties of combined vibration-damping coatings]. Zashchita ot shuma i vibratsii [Protection against noise and vibration]: sbornik trudov X Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, 01-03 oktyabrya 2025 goda. Saint Petersburg, Baltiyskiy gosudarstvenny tekhnicheskiy universitet "VOENMEKH" im. D.F. Ustinova, 2025, P. 239–245. EDN VTTEEP.
12. Avdonin V. V. Vibropogloshchayushchie kompozitsionnye pokrytiya [Vibration-damping composite coatings]: spetsialnost 05.23.05 Stroitelnye materialy i izdeliya: diss. ... kand. tekhn. nauk ; Avdonin Valeriy Viktorovich. Penza, 2015, 123 p. EDN MTCAAI.
13. Cherkasov V. D., Tyurin M. V., Avdonin V. V. Issledovanie vliyaniya napolniteley i modifikatorov na dempfiruyushchie svoystva materiala na osnove PVA [Study of the influence of fillers and modifiers on the damping properties of PVA-based material]. Inzhenerny vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]. 2019, № 8 (59), P. 36. EDN ZMWROG.

© В. Д. Черкасов, М. А. Тюрякин, 2026

Получено: 21.07.2026 г.