

Гребенюк С.Н., канд. техн. наук
(ЗНУ)

НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ РЕЗИНОВОГО ВИБРОИЗОЛЯТОРА С КОМПОЗИТНЫМИ ВСТАВКАМИ

Гребенюк С.М., канд. техн. наук
(ЗНУ)

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ГУМОВОГО ВИБРОИЗОЛЯТОРА З КОМПОЗИТНИМИ ВСТАВКАМИ

Grebenyuk S.N., Ph. D. (Tech.)
(ZNU)

STRESS-STRAIN STATE OF THE RUBBER VIBRATION ISOLATOR WITH THE COMPOSITE INSETS

Аннотация. В работе рассматриваются два варианта конструкции виброакустического изолятора со слоем композиционного материала. На основе метода конечных элементов получено напряженно-деформированное состояние конструкции. Для улучшения сходимости результатов использовалась моментная схема конечного элемента для слабосжимаемых и композиционных материалов. С помощью программного комплекса «МИРЕЛА+» проанализировано влияние объемного содержания волокон в композите на величину осадки виброизолятора при различных режимах нагружения. Анализ напряженно-деформированного состояния виброизолятора показал, что вне зависимости от расположения композиционного слоя увеличение доли волокна (от 0 до 0,3) в нем уменьшает максимальную осадку конструкции на 25-30 %.

Ключевые слова: виброизолятор, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, резина, композиционный материал

Одной из актуальных проблем является защита машин, механизмов, зданий, сооружений от вибраций, возникающих по причинам техногенного и естественного характера. Анализ конструктивных особенностей вибро- и сейсмоизоляции машин, зданий, сооружений, инфраструктурных объектов показывает, что одним из наиболее перспективных направлений является применение виброизоляторов на основе резинометаллических конструкций.

В этом направлении имеются следующие исследования. Так, экспериментальные и аналитические методы расчёта виброизоляторов представлены в работе [1]. Сложность процесса деформирования таких элементов конструкций приводит к необходимости применения численных методов, в частности метода конечных элементов [2, 3].

Виброакустические изоляторы представляет собой упругие опоры, которые используются при виброизоляции машин обще-

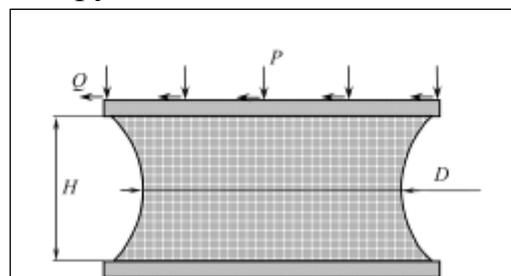


Рисунок 1 – Виброакустический резиновый изолятор с композитными вставками

го, горно-металлургического, агропромышленного комплекса и в специальной вибродинамической технике. Конструкция виброакустического изолятора разработана в ИГТМ НАН Украины (г. Днепрпетровск) и состоит из двух металлических пластин и присоединённого к ним резинового элемента в виде цилиндра с вогнутой боковой поверхностью (рисунок 1).

Для улучшения виброизоляционных и прочностных характеристик приведённого изолятора была предложена его модификация, в которой предполагается наличие в резиновом массиве вставки из резинокордного материала. Для исследования напряжённо-деформированного состояния рассмотрим конструктивные варианты, представленные на рис. 2.

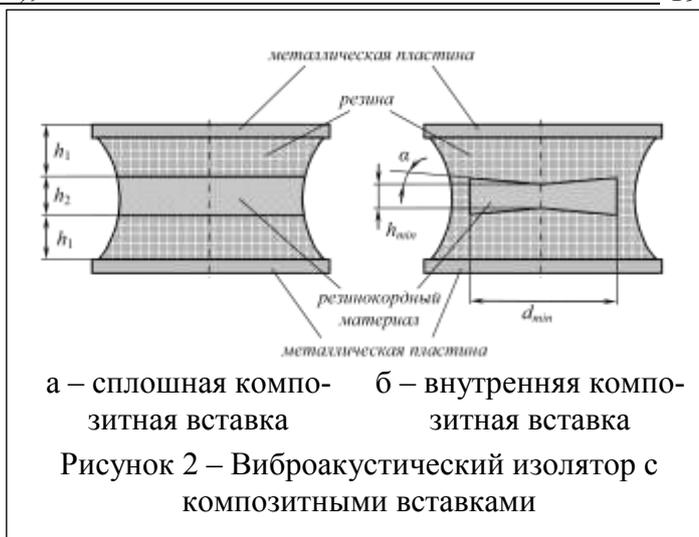
Одним из основных расчётов при проектировании виброизоляционных амортизаторов является статический прочностной расчёт. Для этого необходимо определить напряжённо-деформированное состояние виброизолятора при реальных условиях нагружения. Конструктивная сложность виброизолятора, наличие разнородных материалов в конструкции, а также сложные граничные условия не дают возможности применить к такому расчёту аналитические методы. Поэтому при расчёте таких конструкций целесообразно применять численные методы, в частности, метод конечных элементов.

Для того чтобы нивелировать негативные свойства традиционного метода конечных элементов, такие как неучёт смещений конечного элемента как абсолютно жёсткого целого, учёт эффекта «ложного» сдвига и для слабосжимаемых материалов (каковым является резина) учёт слабой сжимаемости, применим моментную схему конечного элемента [6].

Согласно данной схеме компоненты вектора перемещений аппроксимируются рядом Тейлора. Аналогичным образом аппроксимируются компоненты вектора деформаций, а для слабосжимаемых материалов – ещё и функция изменения объёма. После этого, согласно определённым правилам, в разложении деформаций и функции изменения объёма опускается из разложения ряд слагаемых. Такой подход позволяет улучшить сходимость получаемых результатов в сравнении с традиционным методом конечных элементов.

Так, для параллелепипедного конечного элемента с линейной аппроксимацией перемещений указанные разложения выглядят следующим образом. Компоненты вектора перемещений имеют вид:

$$u_{k'} = \omega_{k'}^{(000)} + \omega_{k'}^{(100)} \psi^{(100)} + \omega_{k'}^{(010)} \psi^{(010)} + \omega_{k'}^{(001)} \psi^{(001)} + \omega_{k'}^{(110)} \psi^{(110)} + \omega_{k'}^{(101)} \psi^{(101)} + \omega_{k'}^{(011)} \psi^{(011)} + \omega_{k'}^{(111)} \psi^{(111)}, \quad (1)$$



где $\omega_k^{(pqr)}$ – коэффициенты разложения; $k' = 1, 2, 3$ – направления глобальной декартовой системы координат; $\psi^{(pqr)}$ – набор степенных координатных функций вида:

$$\psi^{(pqr)} = \frac{(x_1)^p (x_2)^q (x_3)^r}{p!q!r!}, \quad (2)$$

$p = 0, \dots, M$; $q = 0, \dots, N$; $r = 0, \dots, L$ – степени аппроксимирующего полинома по соответствующим координатным направлениям; x_1, x_2, x_3 – координаты местной, связанной с конечным элементом системы координат.

Выражения для компонент тензора деформаций запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= e_{11}^{(000)} + e_{11}^{(001)} \psi^{(001)} + e_{11}^{(010)} \psi^{(010)} + e_{11}^{(011)} \psi^{(011)}; \\ \varepsilon_{22} &= e_{22}^{(000)} + e_{22}^{(001)} \psi^{(001)} + e_{22}^{(100)} \psi^{(100)} + e_{22}^{(101)} \psi^{(101)}; \\ \varepsilon_{33} &= e_{33}^{(000)} + e_{33}^{(010)} \psi^{(010)} + e_{33}^{(100)} \psi^{(100)} + e_{33}^{(110)} \psi^{(110)}; \\ \varepsilon_{12} &= e_{12}^{(000)} + e_{12}^{(001)} \psi^{(001)}; \quad \varepsilon_{13} = e_{13}^{(000)} + e_{13}^{(010)} \psi^{(010)}; \quad \varepsilon_{23} = e_{23}^{(000)} + e_{23}^{(100)} \psi^{(100)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $e_{ij}^{(pqr)}$ – коэффициенты разложения деформаций.

Для линейного закона аппроксимации приближённое значение функции изменения объёма имеет вид

$$\theta = \xi^{(000)}, \quad (4)$$

где $\xi^{(000)}$ – коэффициент разложения функции изменения объёма.

Процедура формирования матрицы жёсткости конечного элемента на основе предложенных разложений описана в работах [2, 3].

В результате конечно-элементного подхода приходим к необходимости решения системы линейных алгебраических уравнений вида:

$$[K]\{u\} = \{P\}, \quad (5)$$

где $[K]$ – глобальная матрица жёсткости конструкции; $\{u\}$ – вектор узловых перемещений; $\{P\}$ – вектор узловых нагрузок.

Описанная процедура построения матрицы жёсткости и определения напряжённо-деформированного состояния конструкции реализована в программном комплексе «МРЕЛА+» [3], с помощью которого решена следующая задача.

Рассмотрим два конструктивных варианта виброакустического изолятора (рис. 2). Размеры изолятора: $H = 0,1$ м, $D = 0,18$ м, $h_1 = 0,035$ м, $h_2 = 0,03$ м, $d_{\min} = 0,12$ м, $\alpha = 10^\circ$, $h_{\min} = 0,02$ м. Прикладываемые нагрузки: $P = 0,1$ МПа, $Q = 0,05$ МПа. Материал резинового элемента – резина марки 2959, со следующими механическими характеристиками: коэффициент Пуассона $\nu = 0,49$, мо-

дуль упругости $E = 5,28$ МПа. В резинокордном материале в качестве резиновой матрицы выступает резина марки 2959, а в качестве корда волокна с механическими характеристиками: коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, модуль упругости $E = 1277,5$ МПа.

Максимальная осадка конструкции в зависимости от объёмной доли волокна в композите для различных схем армирования и нагружения показана на рис. 3, рис. 4.

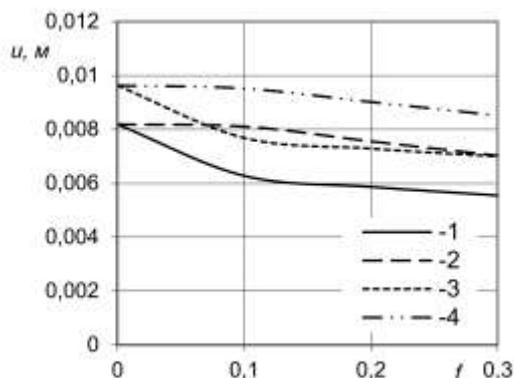
Характер распределения перемещений и напряжений (первое направление – направление действия сдвиговой нагрузки) для различных схем армирования волокнами и различных схем нагружения показан на рис. 5 – рис. 8.

Анализируя напряжённо-деформированное состояние виброизолятора можно сделать следующие заключения: вне зависимости от расположения композиционного слоя увеличение доли волокна (от 0 до 0,3) в нём уменьшает максимальную осадку конструкции (25-30) %.

Армирование в окружном направлении уменьшает величину максимальной осадки в сравнении с радиальным армированием на (12-20) %. Конструктивное представление виброизолятора со сплошным расположением композиционного слоя снижает максимальную осадку на величину до 15 % в сравнении с внутренним расположением композиционного слоя.

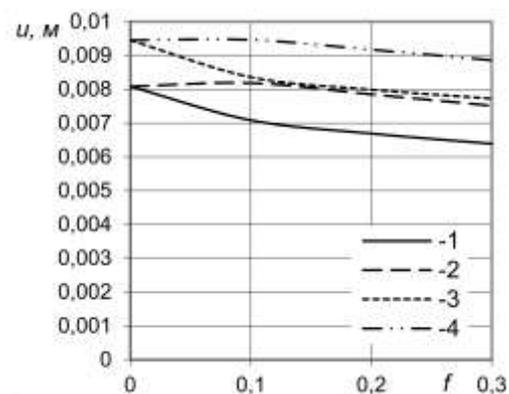
Максимальные значения сжимающих напряжений, возникающие в виброisolаторе, при различных схемах армирования больше для случая внутреннего расположения композиционного слоя в сравнении со сплошным расположением (до 20 %).

Таким образом, рассмотрены различные конструктивные решения для виброизолятора с композиционным слоем и их влияние на величину осадки в условиях действия механических нагрузок.



1 – осевое нагружение, окружное армирование, 2 – осевое нагружение, радиальное армирование, 3 – осевое и сдвиговое нагружение, окружное армирование, 4 – осевое и сдвиговое нагружение, радиальное армирование

Рисунок 3 – Максимальный прогиб виброизолятора со сплошным композиционным слоем



1 – осевое нагружение, окружное армирование, 2 – осевое нагружение, радиальное армирование, 3 – осевое и сдвиговое нагружение, окружное армирование, 4 – осевое и сдвиговое нагружение, радиальное армирование

Рисунок 4 – Максимальный прогиб виброизолятора с внутренним композиционным слоем

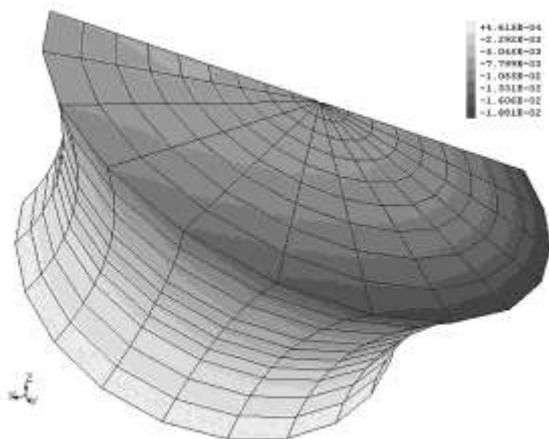


Рисунок 5 – Распределение осевых перемещений виброизолятора со сплошным композиционным слоем при осевом и сдвиговом нагружении (радиальное армирование, $f = 0,2$)

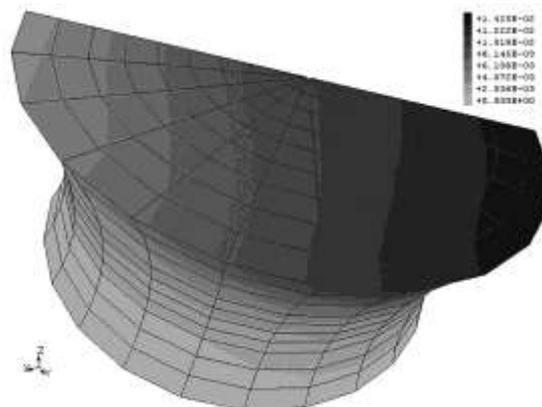


Рисунок 6 – Распределение напряжений σ_{11} виброизолятора со сплошным композиционным слоем при осевом и сдвиговом нагружении (радиальное армирование, $f = 0,2$)

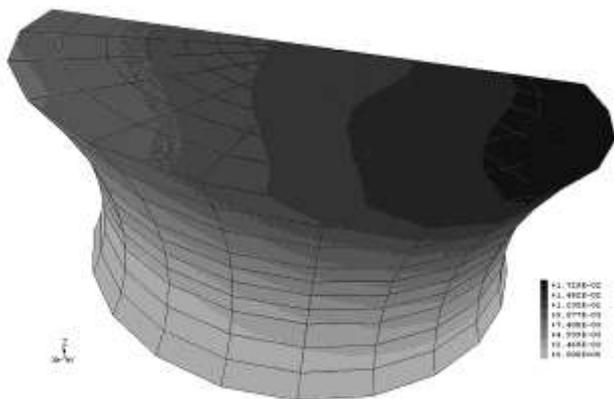


Рисунок 7 – Распределение напряжений σ_{11} виброизолятора с внутренним композиционным слоем при осевом и сдвиговом нагружении (радиальное армирование, $f = 0,2$)

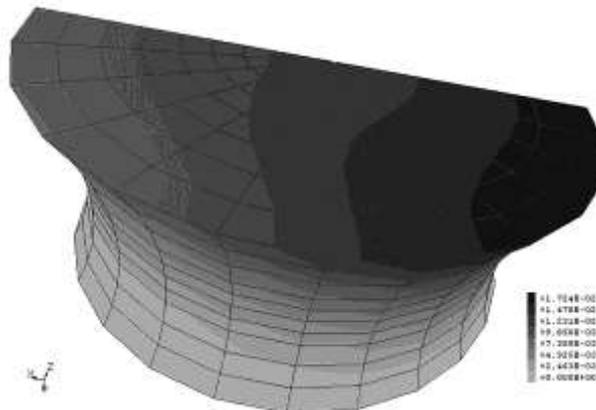


Рисунок 8 – Распределение напряжений σ_{11} виброизолятора с внутренним композиционным слоем при осевом и сдвиговом нагружении (окружное армирование, $f = 0,2$)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прикладная механика упруго-наследственных сред: В 3-х томах. Т. 1. Механика деформирования и разрушения эластомеров / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Е.Л. Звягельский, А.С. Кобец. – К.: Наук. думка, 2011. – 568 с.
2. Дырда В.И. Аналитические и численные методы расчета резиновых деталей / В.И. Дырда, С.Н. Гребенюк, С.И. Гоменюк. – Днепрпетровск-Запорожье: Запорожский национальный университет, 2012. – 370 с.
3. Метод конечных элементов в вычислительном комплексе «МИРЕЛА+» / В.В. Киричевский, Б.М. Дохняк, Ю.Г. Козуб, С.И. Гоменюк, Р.В. Киричевский, С.Н. Гребенюк. – К.: Наук. думка, 2005. – 403 с.
4. Marvalova, V. Viscoelastic properties of filled rubber. Experimental observations and material modeling / V. Marvalova // Engineering Mechanics. – 2007. – Vol. 14, No. 1/2. – Pp. 81-89.
5. Gonzalez, M.N. Influence of rubber pre-processing on the rheological behavior of SBS/Crumb rubber-modified bitumen / M.N. Gonzalez, M.H. Wagner // Annual Transactions of the Nordic Rheology Society. – 2009. – Vol. 17.

REFERENCES

1. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Zvyagilskiy, Ye.L., Kobets, A.S. (2011), *Prikladnaya mekhanika uprugonasledstvennykh sred. Tom 1. Mehanika deformirovaniia i razrusheniia elastomerov* [Applied mechanics of elastic-hereditary media. Vol. 1. Mechanics of deforming and breaking down of elastomers], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
2. Dyrda, V.I., Grebenyuk, S.N. and Gomenyuk, S.I. (2012), *Analiticheskiye i chislennyye metody rascheta rezinovykh detaley* [Analytical and numerical methods for calculating rubber parts], Zaporizhzhya National University, Dnepropetrovsk-Zaporozhye, Ukraine.
3. Kirichevskiy, V.V., Dokhnyak, B.M., Kozub, Yu.G., Gomenyuk, S.I., Kirichevskiy, R.V. and Grebenyuk, S.N. (2005), *Metod konechnykh elementov v vychislitel'nom komplekse "MIRELA+"* [The finite element method in the computational complex "MIRELA+"], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
4. Marvalova, B. (2007), "Viscoelastic properties of filled rubber. Experimental observations and material modelling", *Engineering Mechanics*, vol. 14, no. 1/2, pp. 81-89.
5. Gonzalez, M.N. and Wagner, M.H. (2009), "Influence of rubber pre-processing on the rheological behavior of SBS/Crumb rubber-modified bitumen", *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, vol. 17.

Об авторе

Гребенюк Сергей Николаевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой математического анализа Запорожского национального университета (ЗНУ), Запорожье, Украина, mf@znu.edu.ua

About the author

Grebenyuk Sergey Nikolayevich, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of the Department of Mathematical Analysis in Zaporizhzhya National University (ZNU), Zaporizhzhya, Ukraine, mf@znu.edu.ua

Анотація. У роботі розглядаються два варіанти конструкції віброакустичного ізолятора з шаром композиційного матеріалу. На основі методу скінченних елементів отримано напружено-деформований стан конструкції. Для поліпшення збіжності результатів використовувалася моментна схема кінцевого елемента для слабостискувальних і композиційних матеріалів. За допомогою програмного комплексу «MIRELA+» проаналізовано вплив об'ємного вмісту волокон в композиті на величину осадки віброізолятора при різних режимах навантаження. Аналіз напружено-деформованого стану виброізолятора показав, що незалежно від розташування композиційного шару збільшення частки волокна (від 0 до 0,3) у ньому зменшує максимальну осадку конструкції на 25-30%.

Ключові слова: віброізолятор, напружено-деформований стан, метод кінцевих елементів, гума, композиційний матеріал

Abstract. Two alternative structures of vibroacoustic isolator with a composite material layer are considered in the paper. The stress-strain state of the structure was obtained by finite elements method. To improve convergence of the results a moment scheme of the finite element was used for the weakly-compressible and composite materials. Interdependence between volume content of the composite fibers and size of the vibration isolator settling was analyzed by means of the program complex "MIRELA+". Analysis of stress-strain state of the vibration insulator has shown that increase of the fiber layer (from 0 to 0.3) reduces maximum settlement of the structure by 25-30% regardless of the location of the composite layer.

Keywords: vibration isolator, stress-strain state, the finite elements method, rubber, composite material

Статья поступила в редакцию 03.02.2015

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук, проф. В.И. Дырдой