

## **О демпфирующих свойствах вискеризованного слоя в модифицированных волокнистых композитах**

**Кривень Г.И.\*, Маковский С.В.\*\***

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*\*e-mail: [Kriven\\_Galina@inbox.ru](mailto:Kriven_Galina@inbox.ru)*

*\*\*e-mail: [Makovsky93@mail.ru](mailto:Makovsky93@mail.ru)*

**Статья поступила 04.10.2020**

### **Аннотация**

В данной работе впервые изучаются эффективные динамические свойства вискеризованного слоя в модифицированных композитах с учетом структурных характеристик межфазного слоя – длины вискерсов, объемного содержания вискерсов, их механических свойств. В случае чистого сдвига вдоль вискерсов оцениваются эффективные динамические свойства межфазного слоя, полученные методом трех фаз и методом Рейсса. Показывается, что действительно, в вискеризованном слое могут быть реализованы высокие эффективные диссипативные свойства, что открывает перспективы моделирования и прогнозирования модифицированных волокнистых композитов с аномально высокими демпфирующими свойствами при одновременно достаточно высоких механических характеристиках.

**Ключевые слова:** вискерс, волокнистые композиты, вязкоупругое связующее, микромеханика, эффективный модуль потерь, демпфирующие свойства.

### Введение

Известно, что механические свойства волокнистых композитов контролируются условиями контакта между волокном и матрицей, поэтому для более эффективной передачи нагрузок между волокнами и матрицей разрабатываются различные способы, направленные улучшение межфазных адгезионных свойств композита и на увеличение эффективной площади поверхности волокна. Одним из таких способов является выращивание специальных наноструктур - вискерсов (нанопроволок и углеродных нанотрубок) на поверхности волокна. Для полученного модифицированного композиционного материала в результате образования специальной наноструктуры на поверхности волокон одновременно могут быть улучшены различные свойства: прочность, жесткость, усталость, и электро- и теплопроводность. Значительную роль в таких композитах играет вискеризованный слой, вводимый первоначально для улучшения характеристик, лежащих в плоскости трансверсальной изотропии. Мы полагаем, что вискеризованный слой на поверхности волокон может играть существенную роль в реализации высоких демпфирующих характеристик модифицированного волокнистого композита в целом.

В аэрокосмической промышленности к материалам предъявляются высокие требования по прочности, жесткости и демпфированию, поскольку со временем все больше конструктивных элементов самолетов конструируется из композитных

материалов. В связи с чем была предложена концепция оптимизации конструкции и материалов для улучшения демпфирующих свойств композитов на микромеханическом и макромеханическом уровнях [1-9], заключающаяся в выращивании на поверхности волокон специальных микроструктур, содержащие нановолокна (вискерсы) — нанопроволоки [10-12] и углеродные нанотрубки («fuzzy»-волокна) [13-15]. В работе [16] исследовалось влияние вязкоупругого слоя вокруг сферического включения, погруженного в эпоксидную матрицу, и было обнаружено, что при очень тонком вязкоупругом слое из материала с высоким модулем потерь существенно возрастает эффективный модуль сдвиговых потерь, в то время как уменьшение эффективного модуля сдвига минимально. Основываясь на работе [16] можно сделать вывод, что композит обладающий одновременно высокими жесткостью и демпфированием может быть получен благодаря межфазному слою с высокими потерями.

В работах [17-19] впервые исследовались динамические свойства модифицированных волокнистых композитов, содержащих волокна с вискеризованным слоем. Предполагалось, что волокна и микроструктура вискеризованного слоя являются упругими, а демпфирующие свойства композита в целом связаны с вязкоупругими свойствами матрицы. Показано, что эффективные свойства потерь композита могут превышать модуль потерь матрицы более чем в 20 раз.

В зависимости от толщины межфазного слоя, степень замещения им эпоксидной матрицы может оказываться весьма существенной. Как показали предварительные исследования композитов их динамические характеристики

существенно зависят от относительных жесткостных характеристик фаз. Следовательно, влияние межфазного слоя и на механические и на динамические свойства может оказаться значительными, особенно если учесть, что жесткостные характеристики микроструктуры межфазного слоя могут изменяться в широких пределах.

## 1 Определение эффективных демпфирующих свойств композитов по методу Рейса и по методу трех фаз

Из-за наличия наноструктур, окружающих поверхность волокна, между волокном и матрицей образуется так называемый вискеризованный межфазный слой. На рисунке 1 показана ячейка вискеризованного слоя и ячейка вискеризованного волокнистого композита.

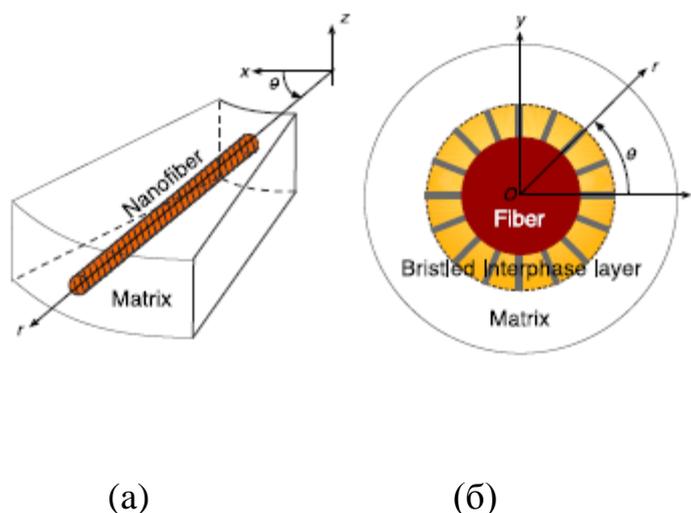


Рисунок 1 - Однонаправленный вискеризованный волокнистый композит

(а) – ячейка вискеризованного межфазного слоя, (б) – ячейка вискеризованного волокнистого композита

При изучении межфазного вискеризованного слоя можно рассматривать простую задачу слоистого композита, в котором могут быть реализованы два типа нагрузок отдельно касательными напряжениями и нормальными поперечными напряжениями. Эффективный модуль продольного сдвига и модуль Юнга определяются с использованием различных методов [20-26]. В данной работе для определения эффективных свойств вискеризованного слоя используются оценки Рейсса и метод трех фаз. Согласно методу Рейсса эффективные модули можно записать следующим образом:  $1/\mu_{eff}^* = (1-V)/\mu_1^* + V/\mu_2^*$ ,  $1/E_{eff}^* = (1-V)/E_1^* + V/E_2^*$ , где  $V$  объемная доля матрицы,  $\mu_1^*$ ,  $\mu_2^*$ ,  $E_1^*$  и  $E_2^*$  модули сдвига и Юнга вискерса и матрицы соответственно.

В случае определения эффективного модуля сдвига и модуля Юнга по методу трех фаз используются формулы, приведенные Кристенсенем [27]:

$$E_{eff}^* = (1-V)E_1^* + VE_2^* + \frac{4V(1-V)(v_1 - v_2)^2 \mu_2^*}{V \mu_2^* / (k_1 + \mu_1^* / 3) + (1-V) \mu_2^* / (k_2 + \mu_2^* / 3) + 1},$$

$$\frac{\mu_{23}''}{\mu_2^*} = \frac{\mu_1^* (2-V) + \mu_2^* V}{\mu_1^* V + \mu_2^* (2-V)},$$

где  $v_1$  – коэффициент Пуассона вискерса,  $v_2$  – коэффициент Пуассона матрицы,  $k_1$  – объемный модуль вискерса,  $k_2$  – объемный модуль матрицы.

Вискерсы рассматриваются как жесткий материал с  $\mu_1^* = b$ , а матрица как вязкоупругий материал с  $\mu_2^* = a(1+i\eta) = \mu_2' + i\mu_2''$ .

Для приближенной оценки эффективных динамических свойств всего композита воспользуемся процедурой Рейсса, обобщенной на четырехслойную систему, которая в случае продольного сдвига приводит к следующим простым соотношениям

$$1/\mu_{23}^{eff} = V_1(1/\mu_{23}^{(1)}) + V_1(2\Delta/d)(1/\mu_{23}^{(2)}) + V_3(1/\mu_{23}^{(3)})$$

$$V_1 = (1 - V_3)/(1 + 2\Delta/d)$$

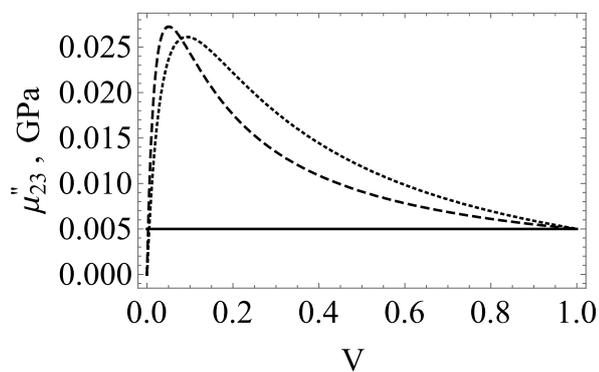
## 2 Анализ эффективных модулей потерь композитов с вискеризованными волокнами в случае чистого сдвига вдоль вискерсов

Оценим динамические свойства вискеризованного слоя для четырех типов вискеризованного слоя. Рассмотрим вискеризованный слой образованный нановискерсами ZnO и УНТ. Полагаем, что в качестве матрицы может рассматриваться эпоксидная матрица и вязкоупругий полимер при температуре ниже стеклования. Свойства нановискерсов, эпоксидной матрицы и вязкоупругого полимера приводятся в таблице 1.

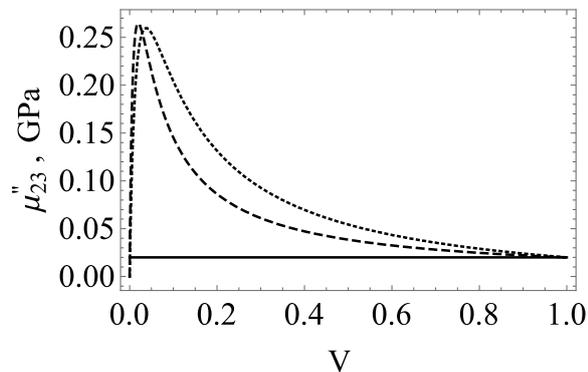
**Таблица 1.** Характеристики материалов

Параметры	Связующее		Включение	
	Эпоксидная матрица	Полимер при температуре ниже температуры стеклования	ZnO	УНТ
Модуль сдвига, ГПа	2,5+0,005i	1+0,02i		
Модуль упругости первого рода, ГПа			140	1100
Объемный модуль плоской деформации, ГПа	2,5	4		
Коэффициент Пуассона			0,35	0,14

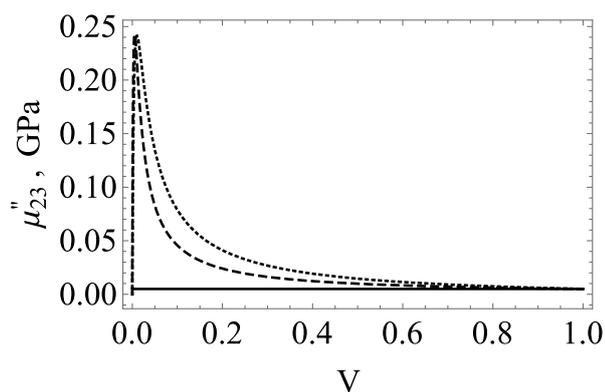
На рисунке 2 показаны графики зависимости модуля потерь от объемной доли связующего при продольном сдвиге, полученные на основе метода трех фаз. На тех же рисунках приведены более приближенные оценки, полученные с использованием осреднения по Рейсу.



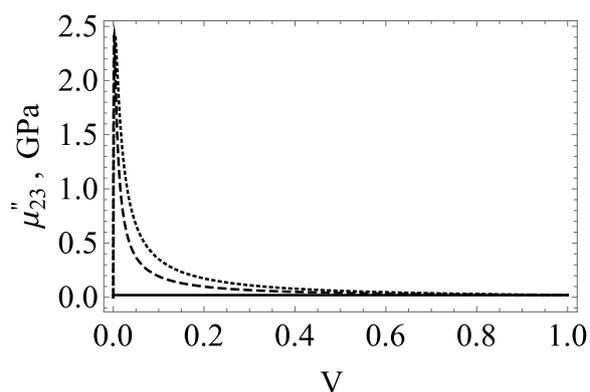
(a)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 2 - Зависимости эффективного модуля потерь при продольном сдвиге: метод трех фаз (...), метод Рейсса (- - -), матрица (\_\_\_\_) (а)- вискеризованный слой с ZnO и эпоксидной матрицей; (б)- вискеризованный слой с ZnO и вязкоупругим полимером при температуре ниже температуры стеклования, (в)- вискеризованный слой с УНТ и эпоксидной матрицей; (г)- вискеризованный слой с УНТ и вязкоупругим полимером при температуре ниже температуры стеклования

Сравнение кривых, приведенных на рисунке 2 указывает на эффект существенного повышения (примерно на порядок) эффективного модуля потерь вискеризованного слоя, если использовать вязкоупругий полимер при температуре ниже температуры стеклования вместо эпоксидной матрицы.

Заметим, что использование в качестве вискерсов УНТ приводит к существенному повышению демпфирующих свойств вискеризованного межфазного слоя (Рисунок 3).

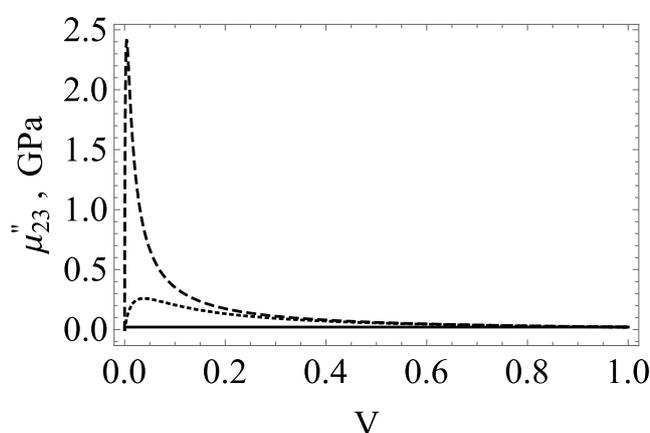


Рисунок 3 - Зависимости эффективного модуля потерь при продольном сдвиге в межфазном слое из вязкоупругого полимера при температуре ниже температуры стеклования и двух различных видов микроструктур: УНТ (- - -), ZnO (....).

Сплошной линией указан модуль потерь вязкоупругого полимера при температуре ниже температуры стеклования

Отметим, однако, что эти эффекты могут быть значительными лишь при малых объемных содержаниях матрицы (Рисунок 3), т.е. для тонких вискеризованных слоев с малым содержанием вискерсов. Для значений объемных содержаний больше, чем 0.3, использование УНТ приводит к незначительному повышению

эффективных динамических свойств по сравнению с вискерсами из ZnO. Однако даже при относительно больших объемных содержаниях матрицы (около 0.5), учет структуры межфазного слоя позволяет установить, что эффективный модуль потерь вискеризованного слоя превышает модуль потерь матрицы более чем в 5 раз для эпоксидной матрицы и более чем в 10 раз в случае вязкоупругого полимера.

### **Заключение**

Отметим, что использование более точной процедуры вычисления эффективных свойств, основанной на методе трех фаз дает несколько большие значения для эффективных характеристик модуля потерь, однако не меняет принципиально зависимость для модуля потерь. Важно отметить, что предложенная новая процедура модификации волокнистого композита приводит к существенному повышению эффективного модуля потерь, когда эффективный модуль потерь может быть существенно увеличен по сравнению с модифицированными композитами, полученными на основе лишь эпоксидной матрицы и даже по сравнению с модулем потерь самой эпоксидной матрицы (более чем в 40 раз по сравнению с модулем потерь эпоксидной матрицей (Рисунок 4)). При этом легко проверить, что эффективные механические свойства меняются незначительно, и все полезные характеристики и особенности модифицированных волокнистых композитов остаются неизменно высокими.

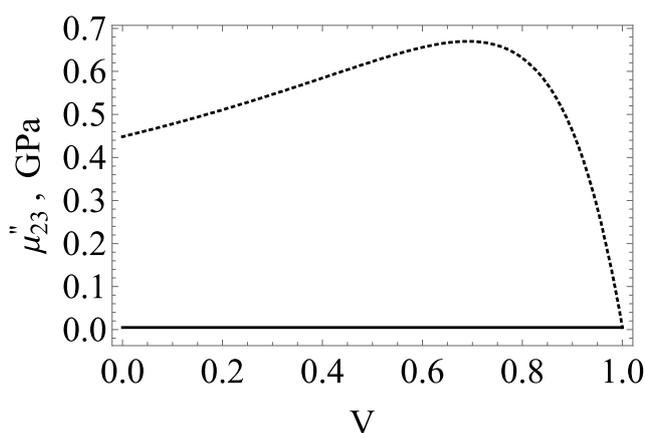


Рисунок 4 Зависимость эффективного модуля потерь модифицированного композита состоящего из углеродного волокна, вискеризованного слоя (ZnO, вязкоупругий полимер при температуре ниже температуры стеклования) и эпоксидной матрицы. Сплошной линией указан модуль потерь эпоксидной матрицы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке государственного проекта Министерства образования и науки РФ по теме “Теоретические и экспериментальные исследования в области производства и переработки перспективных металлических и композиционных материалов на основе алюминиевых и титановых сплавов”, код проекта FSFF-2020-0017*

### Библиографический список

1. Chandra R., Singh S.P. and Gupta K. Damping studies in fiber-reinforced composites – a review // Composite Structures, 1999, vol. 46, pp. 41 – 51.

2. Fisher F.T., Brinson L.C. Viscoelastic interphases in polymer-matrix composites: Theoretical models and finite element analysis // Composites Science Technology, 2011, vol. 61, pp. 731 – 748. DOI: [10.1016/s0266-3538\(01\)00002-1](https://doi.org/10.1016/s0266-3538(01)00002-1)
3. Meaud J., Sain T., Hulbert G.M., Waas A.M. Analysis and optimal design of layered composites with high stiffness and high damping // International Journal of Solids and Structures, 2013, vol. 50 (9), pp. 1342 - 1353. DOI: [10.1016/j.ijsolstr.2013.01.014](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.01.014)
4. Lakes R.S. High damping composite material. Effect of structural hierarchy // Journal of Composite Materials, 2002, vol. 36, no. 3, pp. 287 - 297. DOI: [10.1177/0021998302036003538](https://doi.org/10.1177/0021998302036003538)
5. Berthelot J.M., Assarar M., Sefrani Y., Mahi A.E. Damping of composite materials and structures // Composite Structures, 2008, vol. 85, pp. 189 - 204. DOI: [10.1016/j.compstruct.2007.10.024](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.10.024)
6. Yu L., Ma Y., Zhou C., Xu H. Damping efficiency of the coating structure // International Journal of Solids and Structures, 2005, vol. 42, pp. 3045 – 3058. DOI: [10.1016/J.IJSOLSTR.2004.10.033](https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2004.10.033)
7. Wei P.J., Huang Z.P. Dynamic effective properties of the particle reinforced composites with viscoelastic interphase // International Journal of Solids and Structures, 2004, vol. 41, no. 24, pp. 6993 – 7007.
8. Климов Д.А., Мыктыбеков Б., Низовцев В.Е., Ухов П.А. Перспективы применения наноструктурных композиционных материалов на основе карбидов и оксидов тугоплавких металлов для авиакосмических объектов // Труды МАИ. 2011. № 46. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=26114>

9. Климов А.К., Климов Д.А., Низовцев В.Е., Ухов П.А. Эффективность применения наноструктурных композиционных материалов и изделий из них в авиационной промышленности // Труды МАИ. 2013. № 67. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=41486>
10. Lin Y., Ehlert G.J., Sodano H.A. Increased interface strength in carbon fiber composites through a ZnO nanowire interphase // Advanced Functional Materials, 2009, vol. 19, no. 16, pp. 2654 – 2660. DOI: [10.1002/adfm.200900011](https://doi.org/10.1002/adfm.200900011)
11. Wang Y., Tang Z., Liang X., Liz-Marzan L.M., Kotov N.A. SiO<sub>2</sub>-Coated CdTe nanowires: bristled nano centipedes // Nano Letters, 2004, vol. 4, no. 2, pp. 225 – 231. DOI: [10.1021/nl0349505](https://doi.org/10.1021/nl0349505)
12. Galan U., Lin Y., Ehlert G.J., Sodano H.A. Effect of ZnO nanowire morphology on the interfacial strength of nanowire coated fibers // Composites Science and Technology, 2011, vol. 71, pp. 946 – 954. DOI: [10.1016/J.COMPSCITECH.2011.02.010](https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2011.02.010)
13. Sager R.J., Klein P.J., Lagoudas D.C., Zhang Q., Liu J., Dai L. Effect of carbon nanotubes on the interfacial shear strength of T650 carbon fiber in an epoxy matrix // Composites Science and Technology, 2009, vol. 69, pp. 898 – 904.
14. Garcia E.J., Wardle B.L., Hart A.J., Yamamonj N. Fabrication and multifunctional properties of a hybrid laminate with aligned carbon nanotubes grown in situ // Composites Science and Technology, 2008, vol. 68, no. 9, pp. 2034 – 2041.
15. Sharma S.P., Lakkad S.C. Compressive strength of carbon nanotubes grown on carbon fiber reinforced epoxy matrix multi-scale hybrid composites // Surface & Coatings Technology, 2010, vol. 205 (2), pp. 350 – 355. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2010.06.055](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.06.055)

16. Gusev A.A., Lurie S.A. Loss amplification effect in multiphase materials with viscoelastic interfaces // *Macromolecules*, 2009, vol. 42, no. 14, pp. 5372 – 5377. URL: <https://doi.org/10.1021/ma900426v>
17. Lurie S., Minhat M., Tuchkova N., Soliaev J. On remarkable loss amplification mechanism in fiber reinforced laminated composite materials // *Applied Composite Materials*, 2014, vol. 21 (1). DOI: [10.1007/s10443-013-9371-2](https://doi.org/10.1007/s10443-013-9371-2)
18. Lurie S.A., Minhat M., Tuchkova N. Estimation of effective dynamic properties of bristled fiber composite materials based on self-consistent Eshelby method // *Journal of Engineering Mathematics*, 2015, vol. 95, no. 1, pp. 7 – 29. DOI: [10.1007/s10665-014-9719-0](https://doi.org/10.1007/s10665-014-9719-0)
19. Volkov-Bogorodsky D.B., Lurie S.A., Kriven G.I. Modeling the effective dynamic properties of fiber composites modified across length scales // *Nanoscience and Technology: An International Journal*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 117 - 138. DOI: [10.1615/nanoscitechnolintj.2018026537](https://doi.org/10.1615/nanoscitechnolintj.2018026537)
20. Guz I.A., Rodger A.A., Guz A.N., Rushchitsky J.J. Predicting the properties of micro- and nanocomposites: From the microwhiskers to the bristled nano-centipedes // *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2008, vol. 366 (1871), pp. 1827 – 1833. DOI: [10.1098/rsta.2007.2189](https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2189)
21. Guz I.A., Guz A.N., Rushchitsky J.J. Modelling properties of micro- and nanocomposites with brush-like reinforcement // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2009, vol. 40, no. 3, pp. 154 - 160. DOI: [10.1002/mawe.200700421](https://doi.org/10.1002/mawe.200700421)

22. Kundawal S.I., Ray M.C. Micromechanical analysis of fuzzy fiber reinforced composites // International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2011, vol. 7, pp. 149 – 166. DOI: [10.1007/s10999-011-9156-4](https://doi.org/10.1007/s10999-011-9156-4)
23. Chatzigeorgiou G., Siedel G.D., Lagoudas D. Effective mechanical of «fuzzy fiber»' composites // Composites Part B: Engineering, 2012, vol. 43, pp. 2577 – 2593. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.03.001>
24. Соляев Ю.О. Моделирование эффективных механических свойств керамик на основе градиентной теории межфазного слоя // Труды МАИ. 2011. № 42. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24316>
25. Курочкин А.В. Оптимизация архитектуры многослойных износостойких наноструктурированных покрытий // Труды МАИ. 2013. № 68. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=41998>
26. Лурье С.А., Дудченко А.А., Нгуен Д.К. Градиентная модель термоупругости для слоистой композитной структуры // Труды МАИ. 2013. № 75. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=49674>
27. Christensen R.M. Mechanics of composite materials, Dover Publications, New York, 2005, 384 p.

# On damping properties whiskered layer of modified fibre composites

**Kriven G.I.\*, Makovskii S.V.\*\***

*Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamskoe shosse,  
Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia*

*\*e-mail: [Kriven\\_Galina@inbox.ru](mailto:Kriven_Galina@inbox.ru)*

*\*\*e-mail: [Makovsky93@mail.ru](mailto:Makovsky93@mail.ru)*

## **Abstract**

In this work, for the first time, the effective dynamic properties of a whiskerized layer in modified composites are studied taking into account the structural characteristics of the interphase layer - the length of whiskers, the volumetric content of whiskers, and their mechanical properties. In the case of pure shear along the whiskers, the effective dynamic properties of the interphase layer obtained by the three-phase method and the Reuss method are estimated. In the calculation, we use two types of interfacial matrix: epoxy and viscoelastic polymer at temperatures below the glass transition temperature. Comparison of the obtained plots indicates the effect of a significant increase (by about an order of magnitude) of the effective loss modulus of the whiskerized layer if a viscoelastic polymer is used at a temperature below the glass transition temperature instead of an epoxy matrix. We will also show that an increase in the stiffness of whiskers has a positive effect on the effective characteristics of the interfacial layer, however, we note that this effect manifests itself only at very low volume fractions of the binder in the layer, in the rest of the range the effect is not so pronounced. high effective dissipative properties are realized, which opens up prospects for modeling and predicting modified fiber composites

with abnormally high damping properties at the same time sufficiently high mechanical characteristics.

Note that the use of a more accurate procedure for calculating the effective properties, based on the three-phase method, gives somewhat large values for the effective characteristics of the loss modulus, but does not fundamentally change the dependence for the loss modulus. It is important to note that the proposed new procedure for modifying a fiber composite leads to a significant increase in the effective loss modulus, when the effective loss modulus can be significantly increased in comparison with modified composites obtained on the basis of only an epoxy matrix and even in comparison with the loss modulus of the epoxy matrix itself (more than 40 times compared to the loss modulus of an epoxy matrix). At the same time, we note that the effective mechanical properties change insignificantly, and all the useful characteristics and features of the modified fiber composites remain invariably high.

**Keywords:** whiskers, fiber composites, viscoelastic binder, micromechanics, effective loss modulus, damping properties.

### **References**

1. Chandra R., Singh S.P. and Gupta K. Damping studies in fiber-reinforced composites – a review, *Composite Structures*, 1999, vol. 46, pp. 41 – 51.

2. Fisher F.T., Brinson L.C. Viscoelastic interphases in polymer-matrix composites: Theoretical models and finite element analysis, *Composites Science Technology*, 2011, vol. 61, pp. 731 – 748. DOI: [10.1016/s0266-3538\(01\)00002-1](https://doi.org/10.1016/s0266-3538(01)00002-1)
3. Meaud J., Sain T., Hulbert G.M., Waas A.M. Analysis and optimal design of layered composites with high stiffness and high damping, *International Journal of Solids and Structures*, 2013, vol. 50 (9), pp. 1342 - 1353. DOI: [10.1016/j.ijsolstr.2013.01.014](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.01.014)
4. Lakes R.S. High damping composite material. Effect of structural hierarchy, *Journal of Composite Materials*, 2002, vol. 36, no. 3, pp. 287 - 297. DOI: [10.1177/0021998302036003538](https://doi.org/10.1177/0021998302036003538)
5. Berthelot J.M., Assarar M., Sefrani Y., Mahi A.E. Damping of composite materials and structures, *Composite Structures*, 2008, vol. 85, pp. 189 - 204. DOI: [10.1016/j.compstruct.2007.10.024](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.10.024)
6. Yu L., Ma Y., Zhou C., Xu H. Damping efficiency of the coating structure, *International Journal of Solids and Structures*, 2005, vol. 42, pp. 3045 – 3058. DOI: [10.1016/J.IJSOLSTR.2004.10.033](https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2004.10.033)
7. Wei P.J., Huang Z.P. Dynamic effective properties of the particle reinforced composites with viscoelastic interphase, *International Journal of Solids and Structures*, 2004, vol. 41, no. 24, pp. 6993 – 7007.
8. Klimov D.A., Myktybekov B., Nizovtsev V.E., Ukhov P.A. *Trudy MAI*, 2011, no. 46. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26114>
9. Klimov A.K., Klimov D.A., Nizovtsev V.E., Ukhov P.A. *Trudy MAI*, 2013, no. 67. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=41486>

10. Lin Y., Ehlert G.J., Sodano H.A. Increased interface strength in carbon fiber composites through a ZnO nanowire interphase, *Advanced Functional Materials*, 2009, vol. 19, no. 16, pp. 2654 – 2660. DOI: [10.1002/adfm.200900011](https://doi.org/10.1002/adfm.200900011)
11. Wang Y., Tang Z., Liang X., Liz-Marzan L.M., Kotov N.A. SiO<sub>2</sub>-Coated CdTe nanowires: bristled nano centipedes, *Nano Letters*, 2004, vol. 4, no. 2, pp. 225 – 231. DOI: [10.1021/nl0349505](https://doi.org/10.1021/nl0349505)
12. Galan U., Lin Y., Ehlert G.J., Sodano H.A. Effect of ZnO nanowire morphology on the interfacial strength of nanowire coated fibers, *Composites Science and Technology*, 2011, vol. 71, pp. 946 – 954. DOI: [10.1016/J.COMPSCITECH.2011.02.010](https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2011.02.010)
13. Sager R.J., Klein P.J., Lagoudas D.C., Zhang Q., Liu J., Dai L. Effect of carbon nanotubes on the interfacial shear strength of T650 carbon fiber in an epoxy matrix, *Composites Science and Technology*, 2009, vol. 69, pp. 898 – 904.
14. Garcia E.J., Wardle B.L., Hart A.J., Yamamonj N. Fabrication and multifunctional properties of a hybrid laminate with aligned carbon nanotubes grown in situ, *Composites Science and Technology*, 2008, vol. 68, no. 9, pp. 2034 – 2041.
15. Sharma S.P., Lakkad S.C. Compressive strength of carbon nanotubes grown on carbon fiber reinforced epoxy matrix multi-scale hybrid composites, *Surface & Coatings Technology*, 2010, vol. 205 (2), pp. 350 – 355. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2010.06.055](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.06.055)
16. Gusev A.A., Lurie S.A. Loss amplification effect in multiphase materials with viscoelastic interfaces, *Macromolecules*, 2009, vol. 42, no. 14, pp. 5372 – 5377. URL: <https://doi.org/10.1021/ma900426v>

17. Lurie S., Minhat M., Tuchkova N., Soliaev J. On remarkable loss amplification mechanism in fiber reinforced laminated composite materials, *Applied Composite Materials*, 2014, vol. 21 (1). DOI: [10.1007/s10443-013-9371-2](https://doi.org/10.1007/s10443-013-9371-2)
18. Lurie S.A., Minhat M., Tuchkova N. Estimation of effective dynamic properties of bristled fiber composite materials based on self-consistent Eshelby method, *Journal of Engineering Mathematics*, 2015, vol. 95, no. 1, pp. 7 – 29. DOI: [10.1007/s10665-014-9719-0](https://doi.org/10.1007/s10665-014-9719-0)
19. Volkov-Bogorodsky D.B., Lurie S.A., Kriven G.I. Modeling the effective dynamic properties of fiber composites modified across length scales, *Nanoscience and Technology: An International Journal*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 117 - 138. DOI: [10.1615/nanoscitechnolintj.2018026537](https://doi.org/10.1615/nanoscitechnolintj.2018026537)
20. Guz I.A., Rodger A.A., Guz A.N., Rushchitsky J.J. Predicting the properties of micro- and nanocomposites: From the microwhiskers to the bristled nano-centipedes, *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2008, vol. 366 (1871), pp. 1827 – 1833. DOI: [10.1098/rsta.2007.2189](https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2189)
21. Guz I.A., Guz A.N., Rushchitsky J.J. Modelling properties of micro- and nanocomposites with brush-like reinforcement, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2009, vol. 40, no. 3, pp. 154 - 160. DOI: [10.1002/mawe.200700421](https://doi.org/10.1002/mawe.200700421)
22. Kundawal S.I., Ray M.C. Micromechanical analysis of fuzzy fiber reinforced composites, *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2011, vol. 7, pp. 149 – 166. DOI: [10.1007/s10999-011-9156-4](https://doi.org/10.1007/s10999-011-9156-4)

23. Chatzigeorgiou G., Siedel G.D., Lagoudas D. Effective mechanical of «fuzzy fiber»' composites, *Composites Part B: Engineering*, 2012, vol. 43, pp. 2577 – 2593. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.03.001>
24. Solyaev Yu.O. *Trudy MAI*, 2011, no. 42. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=24316>
25. Kurochkin A.V. *Trudy MAI*, 2013, no. 68. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=41998>
26. Lur'e S.A., Dudchenko A.A., Nguen D.K. *Trudy MAI*, 2013, no. 75. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=49674>
27. Christensen R.M. *Mechanics of composite materials*, Dover Publications, New York, 2005, 384 p.