

C. Агуиб^{a}, Н. Шух^a, А. Сеттет^a, А. Нур^a, М. Мелусси^{a,б}, Т. Джедид^a*

*^aDepartment of Mechanical Engineering, Dynamic of Engines and Vibroacoustic Laboratory,
F.S.I., M.B. Boumerdes University, Algeria*

*^бLaboratory of Condensed Matter Physics, University of Nice-Sophia Antipolis, CNRS, UMR
7336, 06100 Nice, France*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ БАЛКИ ИЗ ГИБРИДНОГО КОМПОЗИТА С РЕГУЛИРУЕМЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ¹

S. Aguib, N. Chikh, A. Settet, A. Nour, M. Meloussi, and T. Djedid*

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE TENSILE BEHAVIOR OF A HYBRID COMPOSITE BEAM WITH ADJUSTABLE MECHANICAL PROPERTIES

Keywords: tensile test, hybrid composite beam, adjustable mechanical properties, experimental analysis

Magnetorheological elastomer beam samples were tested in uniaxial tension in magnetic fields of different intensities up to the final rupture. The samples deformed nonlinearly. Their maximum elongation reached 70% and the tensile strength increased by 120% with growing intensity of magnetic field applied.

Ключевые слова: испытание на растяжение, балка композита гибридного, свойства механические регулируемые, анализ экспериментальный

Образцы балок из магнитореологического эластомера испытаны на одноосное растяжение в магнитных полях разной интенсивности вплоть до разрушения. Образцы деформировались нелинейно. С увеличением напряженности приложенного магнитного поля их максимальное удлинение достигало 70%, а прочность при растяжении возросла на 120%.

*Автор, с которым следует вести переписку: s.aguib@univ-boumerdes.dz
Corresponding author: s.aguib@univ-boumerdes.dz

¹Перевод с англ.

Введение

В настоящее время материалы и конструкции с высокой способностью деформирования и виброизоляции — объекты серьезного изучения в силу их важности для развития авиастроения, гражданского строительства и машиностроения. Разработка новых сложных конструкций, иногда называемых “умными”, поглощающих вибрации, — предмет новейших исследований в области инженерных материалов. Большой интерес вызвали первые композитные сэндвич-балки и пластины с вязкоупругой сердцевиной, иногда включающие магнитореологические эластомеры (МРЭ) с частицами железа, улучшающими жесткость и устойчивость конструкций при воздействии магнитного поля. Некоторые предыдущие исследования уже были посвящены использованию вязкоупругой сердцевины из МРЭ и других материалов в композитных сэндвич-конструкциях. В [1] аналитически методом динамической жесткости исследовали свободные колебания трехслойных симметричных сэндвич-балок. Собственные частоты и соответствующие моды колебаний сэндвич-балок вычислили с помощью алгоритма Виттрика—Уильяма. Точный метод динамической жесткости также использовали в [2] для определения изгибного поведения трехслойной сэндвич-балки с лицевыми слоями разной толщины. Ее собственные значения вычислили с помощью алгоритма Виттрика—Уильяма. В [3] выполнили анализ свободных колебаний трехслойной балки с использованием экспериментальных данных и аналитического подхода, основанного на методе динамической жесткости. Ее слои неодинаковой толщины рассчитывали по теории балок Тимошенко. В [4] изучали зависящую от магнитного поля жесткость умных сэндвич-балок, имеющих мягкую сердцевину из МРЭ и не-МРЭ и токонепроводящие верхний и нижний лицевые слои для исключения эффектов, вызванных магнитоупругими нагрузками, возникающими в колеблющемся теле. Результаты показали, что модуль упругости, зависящий от магнитного поля, изменяет частоту антирезонанса и лишь немного — резонансную частоту.

Композитная сэндвич-балка с сердцевиной из МРЭ и токопроводящими лицевыми слоями под действием однородного магнитного поля была рассмотрена в [5, 6]. В [7, 8] исследовали затухание колебаний и сдвиг частоты с помощью нового адаптивно настраиваемого виброгасителя (АНВГ), основанного на свойствах МРЭ, управляемых приложенным магнитным полем. Результаты показали, что такой АНВГ может изменить собственную частоту с 25,5 до 82 Гц. В [9] разработали другой АНВГ с многослойными листами из МРЭ. В [10] провели экспериментальное и численное исследование вибрационных характеристик сэндвич-балок со стальными лицевыми слоями и сердцевиной из МРЭ. Демпфирующие свойства сердцевины изучали при разной напряженности приложенного магнитного поля. В [11] методом конечных элементов (МКЭ) численно исследовали свободные и вынужденные колебания композитной сэндвич-балки с вязкоупругим внутренним слоем с помощью теории дефор-

мирования высокого порядка, основанной на независимых поперечных перемещениях по толщине верхнего и нижнего лицевого слоев. Этот анализ более сложен и реалистичен, чем стандартная теория Мида и Маркуса [12], основанная на нескольких упрощающих предположениях и обычно используемая для моделирования трехслойных сэндвич-балок. В [13] провели аналитическое исследование с использованием метода Галеркина. В работе рассматривали свободные колебания симметричной сэндвич-балки с сердцевинной из МРЭ, подверженной разным граничным условиям, и исследовали области параметрической неустойчивости конструкции, подверженной периодической осевой нагрузке. Свободные и вынужденные колебания той же композитной конструкции, что и в [13], в [14] исследовали методом конечных элементов. В [15] области параметрической неустойчивости сэндвич-балки с сердцевинной из МРЭ также исследовали с помощью МКЭ. В [16] динамическое поведение сэндвич-пластины, содержащей МРЭ, проанализировали экспериментально и с помощью двух численных подходов — модели, имеющейся в программном обеспечении MATLAB, разработанной методом аппроксимации Ритца, и моделирования на основе инструментов МКЭ. Затем сравнили результаты обоих численных методов с экспериментальными данными. Нелинейную динамику геометрически несовершенной сэндвич-балки с сердцевинной из МРЭ и лицевыми слоями из алюминия экспериментально изучали в [17]. В [18] исследовали собственную частоту, коэффициент потерь и свободные колебания вращающейся магнитореологической конической сэндвич-балки. Для разработки соответствующего определяющего уравнения для вращающейся конструкции использовали метод Ритца и уравнение Лагранжа. В [19] изготовили и испытали первую композитную сэндвич-конструкцию с сотовым наполнителем, содержащим МРЭ. Динамические свойства этой новой конструкции проанализировали и оценили при испытаниях на свободные и вынужденные колебания. Результаты показали, что амплитуды и частоты колебаний изменяются с увеличением напряженности магнитного поля. В [20] представили экспериментальное, численное и аналитическое исследование поведения при изгибе и сдвиге свободно опертых железобетонных балок, состоящих из двух слоев бетона разных марок. Факторы, влияющие на характеристики сэндвич-балки с МРЭ в ее сердцевине, определены в [21]. В [22] изучали влияние разных микроструктур на макроскопический отклик МРЭ. В [23], используя эквивалентную линейную однослойную теорию оболочек из слоистых композитов, исследовали свободные и вынужденные колебания тонких цилиндрических сэндвич-панелей с сердцевинной из МРЭ.

Было выполнено несколько работ по определению вибрационных и изгибных свойств конструкций с МРЭ, но отсутствует исследование их поведения при растяжении. Поэтому в настоящей работе изучали поведение при растяжении гибридной алюминиевой магнитореологической эластомерной балки в ходе испытаний на растяжение до разрушения под действием магнитных полей разной интенсивности.

1. Теоретическая формулировка

Изменение фазы можно описать линейной зависимостью между напряжением σ и деформацией ε

$$\sigma = E^* \varepsilon, \quad (1)$$

где E^* — комплексный модуль вязкоупругого материала [23], равный

$$E^* = E' + iE'' = E'(1 + i\eta). \quad (2)$$

Здесь E' и E'' — модули накопления и потерь соответственно. Отношение модуля потерь к модулю накопления обозначим как η и назовем коэффициентом потерь:

$$\eta = \operatorname{tg} \delta = \frac{E''}{E'}. \quad (3)$$

1.1. Геометрическая модель композитной с андвич-балки с МРЭ изображена на рис. 1. Балки состоят из лицевых слоев и сердцевины. Верхний и нижний лицевые слои упругие, неповрежденные и токопроводящие. Сердцевина сделана из вязкоупругого МРЭ с диспергированными в нем ферромагнитными частицами.

Введем следующие предположения:

— МРЭ несжимаем, поперечные перемещения одинаковы во всех трех слоях;

— МРЭ деформируется только при растяжении; его сдвиговую деформацию не учитываем;

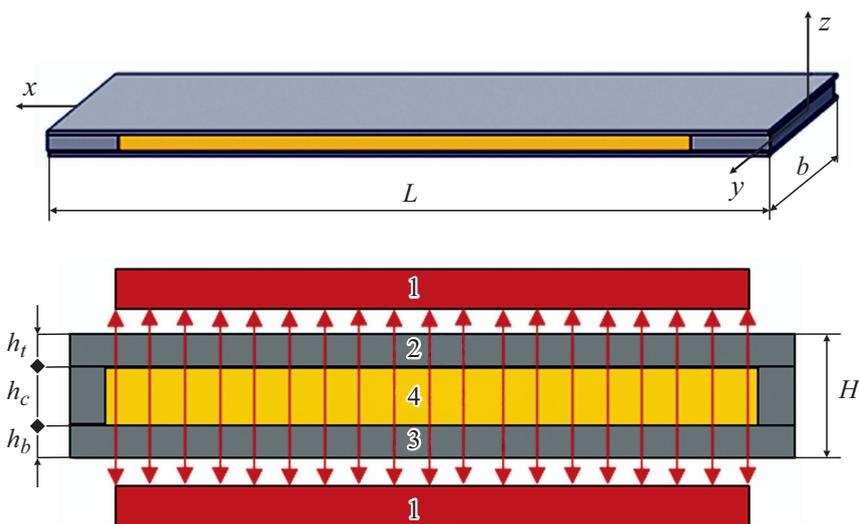


Рис. 1. Геометрическая модель балки: 1 — магнит; 2 и 3 — верхний и нижний лицевые слои соответственно; 4 — сердцевина из МРЭ.

— в ходе деформирования сцепление между слоями идеальное, без проскальзывания или расслоения.

2. Экспериментальные процедуры

Балки подвергали испытаниям на растяжение с постоянной скоростью перемещения 2 мм/мин до разрушения в магнитных полях напряженностью $B = 0,1, 0,3, 0,5$ Тл.

2.1. Разработка МРЭ. Эластомер получали следующим образом. Смесь силиконового масла и полимера RTV141A выливали в сосуд и перемешивали вручную в течение 10 мин для получения хорошо гомогенизированного гелевого эластомера. В другой сосуд помещали частицы железа микрометрического размера, вводимые в эластомер. Полученный гель перемешивали с частицами железа в течение 15 мин. Эластомер, изготовленный таким способом, содержал 30% частиц железа. Затем эластомер дегазировали в вакууме в течение 10 мин для удаления пузырьков воздуха, проникших при перемешивании, и полученную смесь хранили герметично закрытой при низкой температуре. Этапы этой процедуры показаны на рис. 2. Полученный эластомер включал 1,064 г силиконового масла, 1,0385 г RTV141 (А), 7,559 г частиц железа и 0,104 г RTV141 (В). Частицы железа содержат 0,1% нерастворимых примесей.

Характеристики эластомера RTV141 приведены в таблице.

2.2. Образцы балок с магнито реологическим эластомером. Из подготовленного эластомера изготовили (см. [16]) образцы балок для испытаний (рис. 3) длиной $L = 200$ мм, шириной $b = 30$ мм и толщиной $H = 44$ мм ($h_t = h_b = 1$ мм и $h_c = 2$ мм). Плотность лицевого слоя из алюминия $\rho = 2700$ кг/м³, модуль упругости $E = 67$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,34$.

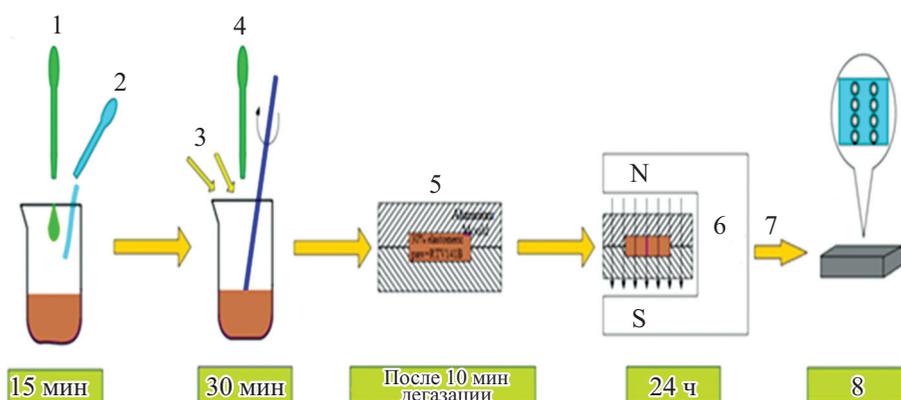


Рис. 2. Этапы изготовления МРЭ: 1 — силиконовое масло; 2 — RTV141A; 3 — частицы железа; 4 — гель эластомера; 5 — дегазация; 6 — воздействие магнитным полем; 7 — анизотропный образец МРЭ; 8 — окончание процесса.

Характеристики эластомера RTV141A

Характеристика	Изначальный	Катализатор	Смешанный
Вязкость, Па·с	3,5	0,65	4
Модуль Юнга, кПа	—	—	700
Удлинение при разрыве	—	—	120%
Время выдержки, ч	—	—	4(60°) 2(100°)
Плотность	—	—	1,02
Цвет	Прозрачный	Прозрачный	—



Рис. 3. Образец балки с МРЭ.

Образец балки, подвергнутый растяжению силой в магнитном поле, показан на рис. 4.

2.3. Экспериментальное устройство для испытания на растяжение. Испытания на одноосное растяжение образцов балок с МРЭ проводили на универсальной испытательной машине № 0350-08151 (WinTest Analysis) (рис. 5) в механической лаборатории Высшей школы территориальной противовоздушной обороны (ESDAT, Регая, Алжир). Индукционная катушка I излучала магнитное поле, покрывающее всю площадь балки.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 6—*a* представлены зависимости сила—удлинение $F—\Delta$ образцов в магнитном поле разной напряженности B . Видно, что диаграммы деформирования сильно нелинейны и возрастают с увеличением напряженности магнитного поля B . При этом максимальное удлинение дости-



Рис. 4. Образец балки с МРЭ, нагруженный растяжением в магнитном поле.

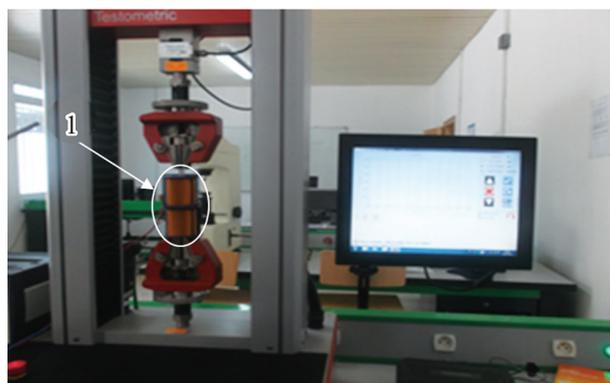


Рис. 5. Машина Testometric M350 для одноосных испытаний на растяжение и сжатие.
1 — индукционная катушка.

гает 70%. Кроме того, жесткость МРЭ также возрастает с увеличением напряженности магнитного поля.

Зависимости нагрузки F от времени t при разных значениях B представлены на рис. 6—б. Видно, что магнитное поле интенсивностью $B = 0,5$ Тл увеличило время до разрушения на 30%, а максимальную нагрузку — на

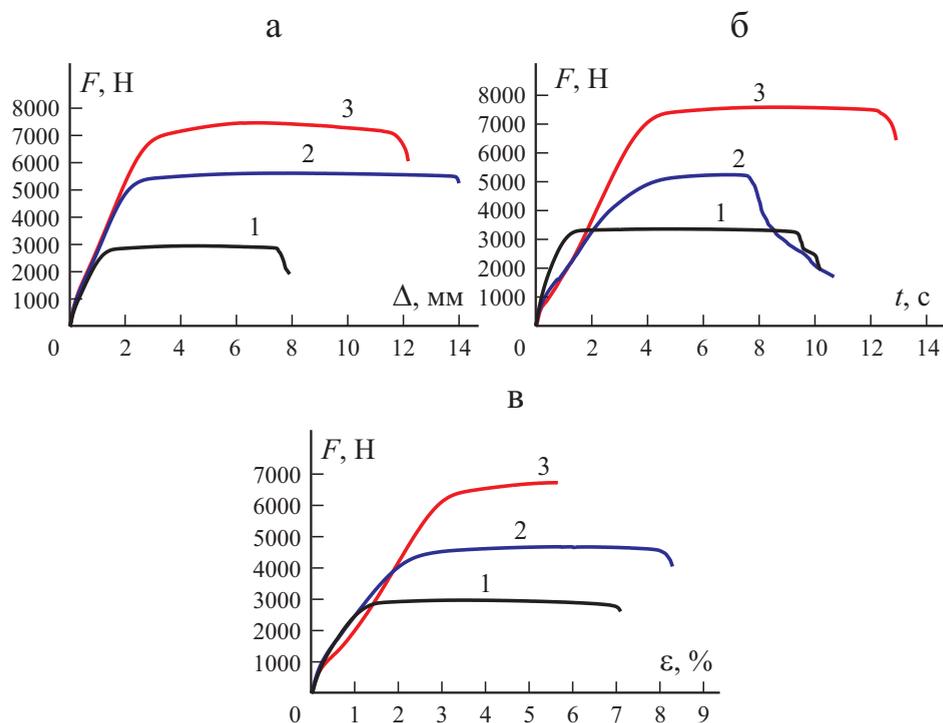


Рис. 6. Зависимости растягивающей силы F от удлинения Δ (а); времени t (б); деформации ε (в) при интенсивности магнитного поля $B = 0,1$ (1), 0,3 (2), 0,5 Тл (3).

120%. Это увеличение объясняется силами притяжения между частицами железа под действием магнитного поля. Вязкоупругость эластомера с частицами железа в сочетании с влиянием магнитного поля приводит к сильно нелинейному поведению балок с МРЭ.

Зависимости $F—\varepsilon$, приведенные на рис. 6—в, свидетельствуют о том, что слой МРЭ сильно влияет на механическое поведение балок. Установлено, что напряжение при напряженности магнитного поля $B = 0,5$ Тл почти в два раза больше, чем при $B = 0,3$ Тл, и в три раза больше, чем при $B = 0,1$ Тл. На этих зависимостях можно выделить три участка. На начальном участке сравнительно малых деформаций ($F \leq 3000$ Н при $B = 0,1$ Тл; $F \leq 4500$ Н при $B = 0,3$ Тл и $F \leq 6000$ Н при $B = 0,5$ Тл) нагрузка F быстро возрастала. На участке с практически постоянной силой ($F \approx 3000$ Н при $B = 0,1$ Тл, $F \approx 4500$ Н при $B = 0,3$ Тл и $F \approx 6000$ Н при $B = 0,5$ Тл) быстро возрастала деформация. Третий короткий участок связан с усталостным разрушением. В ходе испытаний происходило довольно быстрое разрушение алюминиевых лицевых слоев.

Таким образом, в настоящей работе установлено следующее.

— Балки с МРЭ в магнитных полях продемонстрировали большие (до 70%) сильно нелинейные деформации растяжения.

— Деформационная способность балок с МРЭ прямо пропорциональна напряженности приложенного магнитного поля.

— Быстрое увеличение жесткости балок с МРЭ с увеличением интенсивности магнитного поля имела место при малых удлинениях (менее 1 мм).

— Время деформирования образцов с МРЭ при растяжении до разрушения возрастало с увеличением напряженности магнитного поля.

— При напряженности приложенного магнитного поля $B = 0,5$ Тл максимальная нагрузка возросла на 120%.

— На диаграммах деформирования образцов с МРЭ можно выделить три участка: быстрого увеличения нагрузки при малых деформациях; быстрого увеличения деформации при постоянной нагрузке; участок усталостного разрушения образцов.

Благодарность. Авторы благодарны руководству Высшей школы территориальной противовоздушной обороны (Регая, Алжир), сотруднице лаборатории физики конденсированного состояния (LPMC) Университета Ниццы Софии Антиполис (Франция) за поддержку данного исследования. Авторы также благодарны Джорджу Боссису, почетному директору по исследованиям, и доктору Кужиру Павлу из LPMC за их помощь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Banerjee J. R.* Free vibration of sandwich beams using the dynamic stiffness method // *Comput. Struct.* — 2003. — Vol. 81. — P. 1915—1922.
2. *Howson W. P. and Zare A.* Exact dynamic stiffness matrix for flexural vibration of three-layered sandwich beams // *J. Sound Vib.* — 2005. — Vol. 282. — P. 753—767.

3. *Banerjee J. R., Cheung C. W., Morishima R., Perera M., and Njuguna J.* 'Free vibration of a three-layered sandwich beam using the dynamic stiffness method and experiment // *Int. J. Solids Struct.* — 2007. — Vol. 44. — P. 7543—7563.
4. *Zhou G. Y. and Wang Q.* Magnetorheological elastomer-based smart sandwich beams with nonconductive skins // *Smart Mater. Struct.* — 2005. — Vol. 14. — P. 1001.
5. *Zhou G. Y. and Wang Q.* Use of magnetorheological elastomer in an adaptive sandwich beam with conductive skins. Part I: Magnetoelastic loads in conductive skins // *Int. J. Solids Struct.* — 2006. — Vol. 43. — P. 5386—5402.
6. *Zhou G. Y. and Wang Q.* Use of magnetorheological elastomer in an adaptive sandwich beam with conductive skins. Part II: Dynamic properties // *Int. J. Solids Struct.* — 2006. — Vol. 43. — P. 5403—5420.
7. *Deng H., Gong X., and Wang L.* Development of an adaptive tuned vibration absorber with magnetorheological elastomer // *Smart Mater. Struct.* — 2006. — Vol. 15. — P. 111—116.
8. *Deng H. and Gong X.* Application of magnetorheological elastomer to vibration absorber // *Communications in Nonlinear Sci. Numer. Simulation.* — 2008. — Vol. 13. — P. 1938—1947.
9. *Sun S., Deng H., Yang J., Li W., Du H., Alici G., and Nakano M.* An adaptive tuned vibration absorber based on multilayered MR elastomers // *Smart Mater. Struct.* — 2015. — Vol. 24. — P. 045045.
10. *Choi W., Xiong Y., and Sheno R.* Vibration characteristics of sandwich beams with steel skins and magnetorheological elastomer cores // *Adv. Struct. Eng.* — 2010. — Vol. 13. — P. 837—847.
11. *Arvin H., Sadighi M., and Ohadi A. R.* A numerical study of free and forced vibration of composite sandwich beam with viscoelastic core // *Compos. Struct.* — 2010. — Vol. 92. — P. 996—1008.
12. *Mead D. J. and Markus S.* The forced vibration of a three-layer, damped sandwich beam with arbitrary boundary conditions // *J. Sound Vib.* — 1969. — Vol. 10. — P. 163—175.
13. *Nayak B., Dwivedyn S., and Murthy K.* Dynamic analysis of magnetorheological elastomer-based sandwich beam with conductive skins under various boundary conditions // *J. Sound Vib.* — 2011. — Vol. 330. — P. 1837—1859.
14. *Nayak B., Dwivedyn S., and Murthy K.* Vibration analysis of a three-layer magneto-rheological elastomer embedded sandwich beam with conductive skins using finite element method // *Proc. Institution Mech. Eng., Part C, J. Mech. Eng. Sci.* — 2013. — 227. — P. 714—729.
15. *Nayak B., Dwivedyn S., and Murthy K.* Dynamic stability of a rotating sandwich beam with magnetorheological elastomer core // *Eur. J. Mech. A/Solids.* — 2014. — Vol. 47. — P. 143—155.
16. *Aguib S., Nour A., Zahloul H., Bossis G., Chevalier Y., and Lançon P.* Dynamic behavior analysis of a magnetorheological elastomer sandwich plate // *Int. J. Mech. Sci.* — 2014. — Vol. 87. — P. 118—136.
17. *Yildirim T., Ghayesh M., Li W., and Alici G.* Experimental nonlinear dynamics of a geometrically imperfect magneto-rheological elastomer sandwich beam // *Compos. Struct.* — 2016. — Vol. 138. — P. 381—390.
18. *Navazi H., Bornassi S., and Haddad H.* Vibration analysis of a rotating magneto-rheological tapered sandwich beam // *Int. J. Mech. Sci.* — 2017. — Vol. 122. — P. 308—317.
19. *Eloy F. S., Gomes G. F. A., Ancelotti A. C., Cunha Jr. S. S., Bombard A. J. F. C., and Junqueira D. M.* Experimental dynamic analysis of composite sandwich beams with magnetorheological honeycomb core // *Eng. Struct.* — 2018. — Vol. 176. — P. 231—242.

20. *Ataria Y. R. and Wang B. C.* Bending and shear behaviour of two layer beams with one layer of rubber recycled aggregate concrete in tension // *Structures*. — 2019. — Vol. 20. — P. 214—225.

21. *Barman H. and Hegde S.* Comprehensive review of parameters influencing the performance of magnetorheological elastomers embedded in beams // *Mater. to Day*. — 2020. — Vol. 26. — P. 2130—2135.

22. *Zabihyan R., Mergheim J., Pelteret J. P., Brands B., and Steinmann P.* FE2 simulations of magnetorheological elastomers: influence of microscopic boundary conditions, microstructures and free space on the macroscopic responses of MREs // *Int. J. Solids Struct.* — 2020. — Nos. 193—194. — P. 338—356.

23. *Mikhasev G. I., Eremeyev V. A., Wilde K., and Maevskaya S. S.* Assessment of dynamic characteristics of thin cylindrical sandwich panels with magnetorheological core // *J. Intelligent Mater. Systems Struct.* — 2019. — Vol. 30, Nos. 18—19. — P. 2748—2769.

Поступила в редакцию 13.01.2020

Окончательный вариант поступил 28.04.2021

Received Jan. 13, 2020 (Apr. 28, 2021)
