

УДК 621.762

Канд. техн. наук А. В. Мозговой¹, д-р техн. наук Л. Р. Вишняков²,
канд. техн. наук Б. Н. Синайский², О. П. Ярёмченко², канд. техн. наук В. П. Мороз²

¹ Винницкий государственный педагогический университет имени М. Коцюбинского,
² Институт проблем материаловедения имени И. Н. Францевича НАНУ,

ИЗУЧЕНИЕ РАССЕЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТАХ, АРМИРОВАННЫХ ВОЛОКНАМИ

Исследованы особенности рассеяния механической энергии полимерными композитами, армированными углеродными, базальтовыми и стеклянными волокнами. Изучено влияние структуры, природы и направления укладки армирующих волокон на характеристики механических колебаний применительно к конструкции лопастей ветровых турбин.

Ключевые слова: полимерные композиты, углеродные волокна, механические колебания, деформация, структура, свойства.

Введение

В современной технике широко используются композиционные материалы с полимерной матрицей, армированные стеклянными, органическими и углеродными волокнами. Это связано с высокой удельной прочностью и повышенными эксплуатационными и технологическими свойствами ПКМ при низких энерго- и трудозатратах изготовления деталей из них [1]. Так, например, лопасти ветродвигателей, работающие в условиях воздействия больших статических и динамических нагрузок, изготавливаются, как правило, из гибридных ПКМ, армированных стеклянными и углеродными волокнами, которые нашли применение в малых ветротурбинах (мощностью до 100 кВт) и ветротурбинах большой мощности – до 4 MW [2, 3]. Важной характеристикой лопастей ветряных турбин, работающих в условиях переменных ветровых нагрузок, является демпфирующие свойства. Однако для гибридных ПКМ, в которых реализуются различные механизмы передачи нагрузки полимерной матрицей, они изучены недостаточно.

Методика эксперимента

Образцы ПКМ для испытаний изготавливали вакуумно-автоклавным прессованием препрегов, полученных пропиткой армирующих волокон. В качестве связующего использовали эпоксидную смолу ЭДТ-69Н с температурой затвердевания $125 \pm 5^\circ \text{C}$. В одном из вариантов материала оболочки лопасти в связующее для увеличения поперечной прочности и модуля упругости были введены мелкодисперсные добавки мультита ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) [4].

Образцы для испытаний размером $3 \times 4 \times 85$ мм вырезались вдоль направления оси лопасти из пластин ПКМ, расположение и состав армирующих волокон в

которых отличаются (рис. 1) по их назначению: для лонжерона (рис. 1, а) и для оболочки (рис. 1, б). Углы ориентации волокон по отношению к продольной оси оболочки совпадают с рекомендованными для аэроупругих ветролопастей [5].

Амплитудные зависимости внутреннего трения измеряли на обратном крутильном маятнике. Частота колебаний составляла ≈ 1 Гц, амплитуда деформации – от 2×10^{-5} до 3×10^{-3} .

Результаты экспериментов и их обсуждение

Были определены механические свойства (модуль упругости, предел прочности при растяжении вдоль и поперек продольной оси) образцов исследуемых ПКМ. Они представлены в таблице 1.

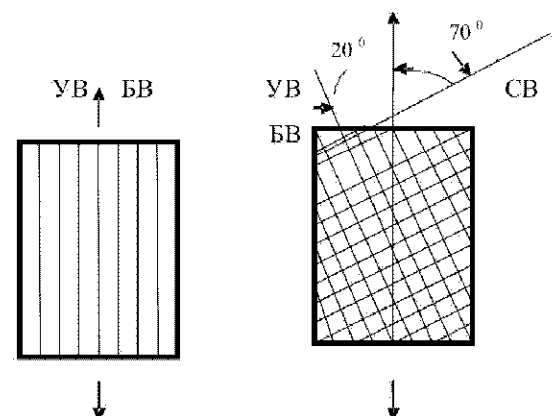


Рис. 1. Ориентация углеродных, стеклянных и базальтовых волокон в гибридно-армированном ПКМ для элементов конструкций лопастей (а – лонжерон, б – оболочка) ветряных турбин: УВ – углеродные волокна, СВ – стеклянные волокна и БВ – базальтовые волокна

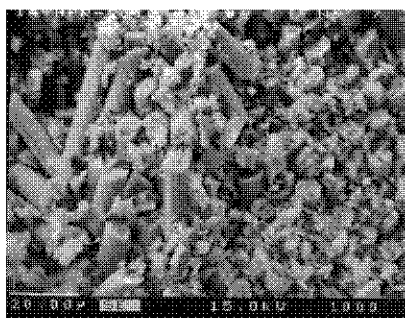
Микроструктуру поверхности изломов образцов ПКМ (рис. 2) изучали с помощью растрового электронного микроскопа САМЕВАХ-SX-50.

Затухания механических колебаний звуковой частоты изучали на специально изготовленной установке, позволяющей регистрировать развертку затухаю-

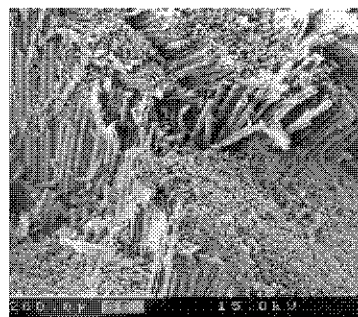
щих колебаний на компьютере. Влияние структуры, природы и направления укладки армирующих волокон на собственную частоту механических колебаний, скорость спада амплитуды и логарифмический декремент затухающих колебаний, значение основных частот и частот гармоник исследуемых ПКМ определяли с помощью разработанной программы [6].

Таблица 1 – Механические свойства образцов исследуемых ПКМ

№	Тип материала	вдоль оси		поперек оси	
		E_{X2} , ГПа	σ_{BX2} , МПа	E_{Y2} , ГПа	σ_{BY2} , МПа
1	Однонаправленный 100 %УВ	165	1598	9,3	10,3
2	Однонаправленный 80 %УВ + 20%БВ	162	1259	10,4	12,0
3	Армирование под углом к оси (70 %УВ)-20° + (30 %СВ) 70°	34	161	17,6	108
4	Армирование под углом к оси (70 %(УВ+20 %БВ))-20° + (30 %СВ) 70°	34,6	100	10,9	65,6
5	Армирование под углом к оси (70 %(УВ+40 %БВ))-20° + (30 %СВ) 70°	26,9	98,0	12,7	72,0



a



б

Рис. 2. Характерная микроструктура поверхности изломов образцов при растяжении однонаправленных ПКМ на основе углеродных волокон (*a*); на основе углеродных и 20 % базальтовых волокон (*б*)

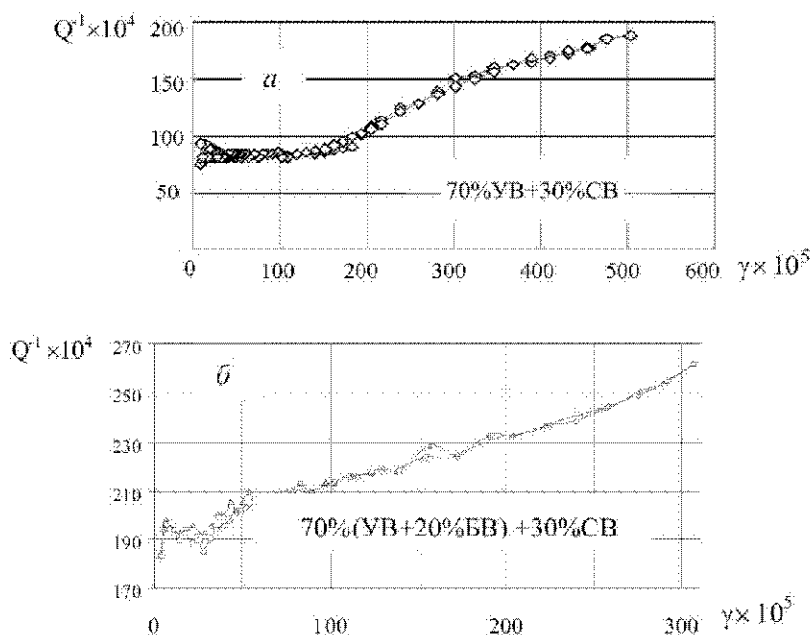


Рис. 3. Амплитудная зависимость внутреннего трения композитов, армированных углеродными, стеклянными и базальтовыми волокнами

Было установлено, что на амплитудных зависимостях внутреннего трения (АЗВТ) отсутствует гистерезис хода кривых. При увеличении и уменьшении амплитуды деформации кривые рассеяния механической энергии имеют одинаковый характер хода и величину внутреннего трения (рис. 3).

Для ПКМ, предназначенных для оболочки лопасти, вначале наблюдается амплитудно-независимая область (рис. 3, а), а затем рассеяние механической энергии достигает интенсивности с тангенсом наклона кривой АЗВТ 0,5. После амплитуды деформации 3×10^{-5} интенсивность рассеяния немного уменьшилась. При введении базальтовых волокон значение тангенса угла наклона уменьшилось в два раза, а величина фона внутреннего трения увеличилась (рис. 3, б). Уменьшилась сила связи колеблющихся элементов, ответственных за рассеяние механической энергии, с центрами закрепления, что подтверждается уменьшением первой критической амплитуды деформации с $1,5 \times 10^{-3}$ (рис. 3, а) до $5,0 \times 10^{-4}$ (рис. 3, б).

Введение в связующее композита дисперсных добавок в виде частиц муллита привело к уменьшению фона внутреннего трения. Это свидетельствует о существенном влиянии дисперсных добавок на рассеяние механической энергии композита.

Частицы муллита способствовали упрочнению связующего, уменьшая при этом величину рассеяния механической энергии, что и подтверждается экспериментально (рис. 4).

Характерным для образцов композитов, предназначенных для лонжерона лопасти, является отсутствие амплитудно-независимой области на кривых амплитудной зависимости внутреннего трения. При увеличении амплитуды деформации рассеяние механической энергии в этом материале возрастает, а затем мало зависит от амплитуды (рис. 5).

Как показано в таблице 1, введение вместо углеродных в однонаправленные образцы 20% базальтовых волокон позволяет практически сохранить модуль упругости, несколько понизив прочность материала. В то же время незначительно повысилась величина рассеяния механической энергии. Амплитудная зависимость внутреннего трения приобретает более прямолинейный характер (рис. 6).

Установлено, что рассеяние механической энергии в композитах зависит от вида армирующих волокон и их расположения в композите.

На рисунке 7 представлены кривые затухающих колебаний в исследуемых ПКМ.

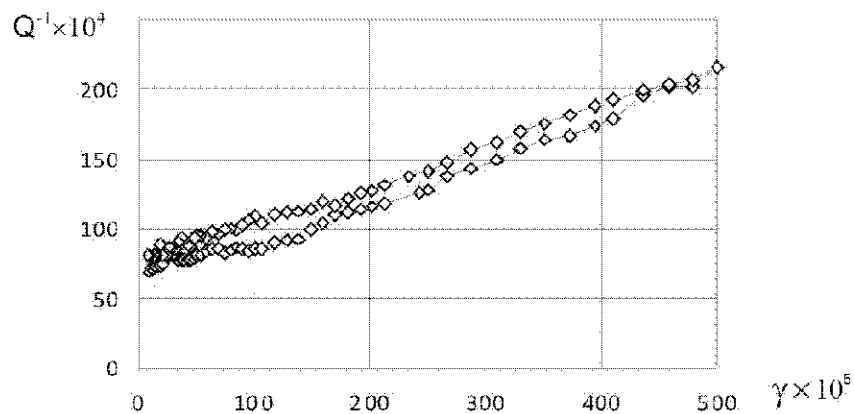


Рис. 4. Амплитудная зависимость внутреннего трения гибридно-армированного композита состава: 70 % (УВ + 20 % БВ) + 30 % СВ (с добавлением в полимерное связующее частичек муллита)

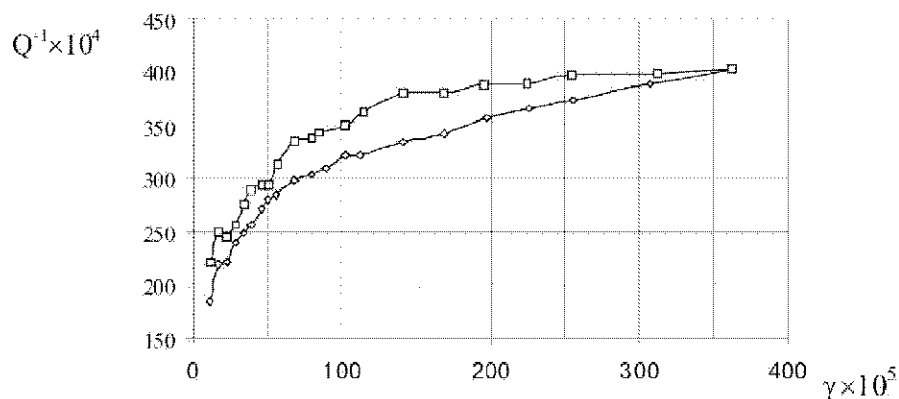


Рис. 5. Амплитудная зависимость внутреннего трения полимерного композита, армированного углеродными волокнами

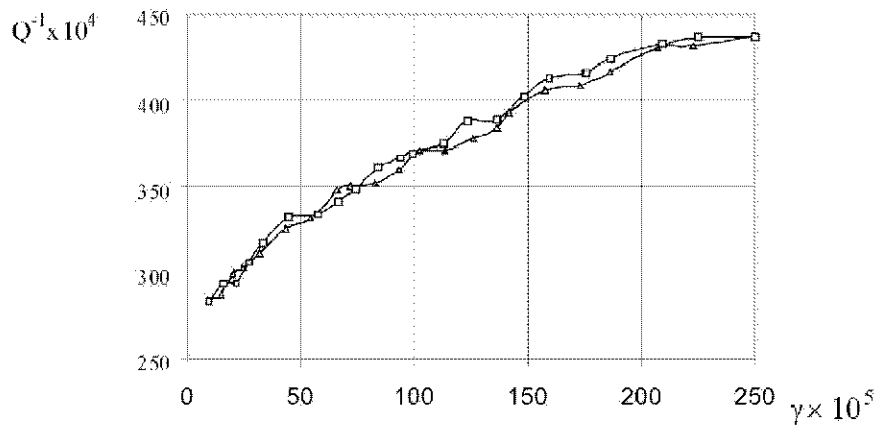


Рис. 6. Амплитудная зависимость внутреннего трения композита, армированного однонаправленными углеродными и 20 % базальтовыми волокнами

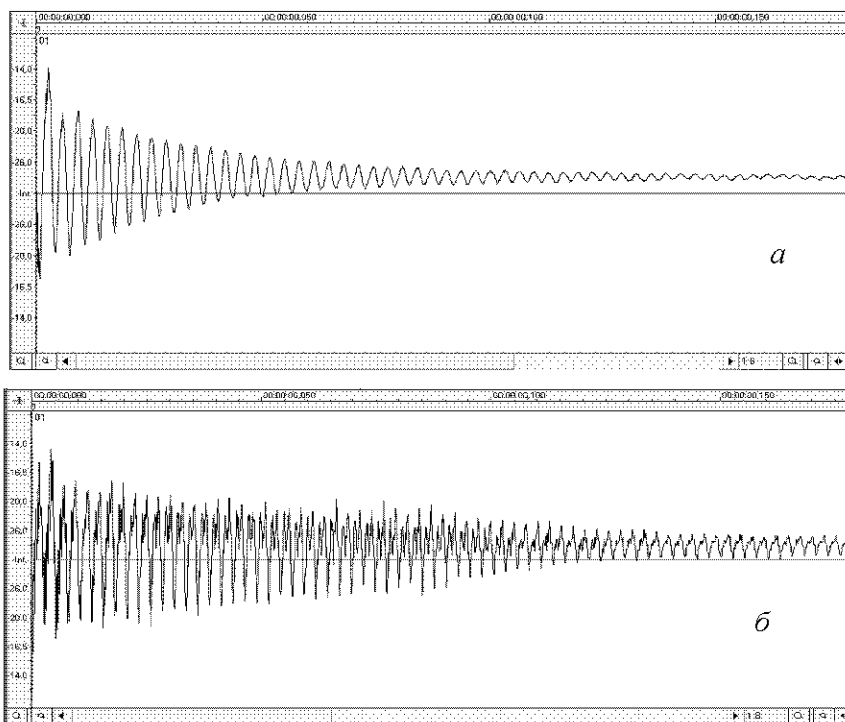


Рис. 7. Осциллограммы свободных затухающих колебаний в исследуемых ПКМ для материалов элементов конструкций лопастей ветряной турбины: *а* – оболочка; *б* – лонжерон

Стандартные и специально разработанные программы позволяют провести спектральный анализ колебаний, а также получить характеристики процесса рассеяния механической энергии в ПКМ [6].

На рис. 8 представлены кривые спектрального анализа колебательного процесса. Основная частота ПКМ для оболочки находится на уровне около 300 Гц, а для лонжерона – 400 Гц. Для лонжерона наблюдаются дополнительные гармоники при больших частотах: 780 Гц, 2430 Гц, 6150 Гц, 6610 Гц. В таблице 2 представлены частоты основных гармоник свободных поперечных затухающих колебаний полимерных композитов, армированных углеродными, стеклянными и базальтовыми волокнами.

В диапазоне до 500 Гц для всех композитов наблюдаются основные частоты от 250 до 350 Гц. При больших частотах при наличии только углеродных волокон для каждой последующей тысячи Герц присущи резонансные частоты. Наличие стеклянных и углеродных волокон убирает частоты выше 5000 Гц, а базальтовые волокна с углеродными уменьшают амплитуду средних частот в диапазоне до 3000 Гц. Введение в композит всех трех армирующих элементов уменьшает количество резонансных частот, как в средних, так и высших диапазонах частот до 9000 Гц. При этом происходит перераспределение напряжений в материале, сопровождающееся гашением определенных колебаний.

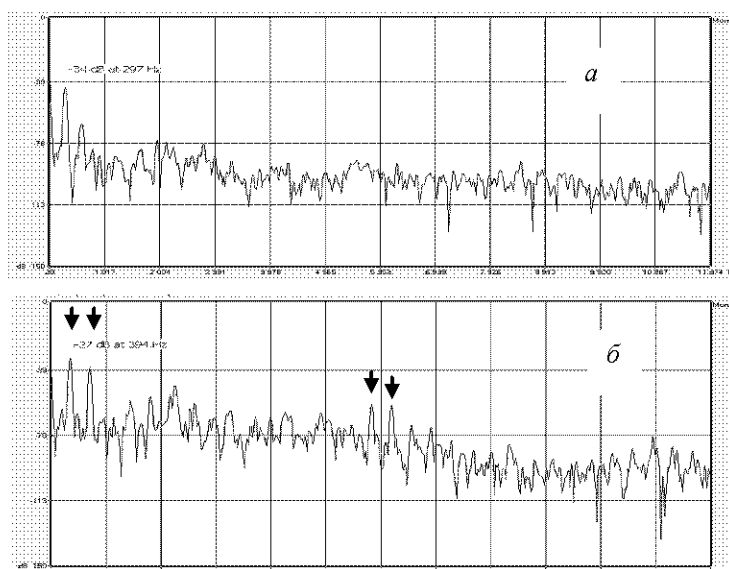


Рис. 8. Результаты спектрального анализа свободных затухающих колебаний в ПКМ: а – оболочка; б – лонжерон

Таблица 2 – Частоты основных гармоник свободных затухающих колебаний в полимерных композитах

Диапазоны основных гармоник, Гц	Полимерные композиционные материалы			
	УВ+30 % СВ Частота, Гц	УВ + 20 % БВ + 30 % СВ Частота, Гц	УВ Частота, Гц	УВ + 20 % БВ Частота, Гц
0–500	337	346	293	247
500–1000	565		623	
1000–2000	1610	1064	1359	1518
2000–3000	2350		2450	
3000–4000	3495	3245	3640	3767
4000–5000	4290	4448	4067	4335
5000–6000		5337	5039	5584
6000–7000			6583	6878
7000–8000	7900		7514	
8000–9000			8082	8604

Специальная программа обработки данных затухающих колебаний [6] дала возможность определить скорость затухания свободных колебаний в различных образцах. На рисунке 8 показано, что в материале оболочки затухания происходят быстрее, чем в однонаправленных ПКМ для лонжерона. Это можно объяснить гетерофазной структурой образца (рис. 2). Также различной структурой можно объяснить и характер уменьшения декремента затуханий (рис. 9, б).

В материале, рекомендуемом для лонжерона, логарифмический декремент в процессе затухания колебаний плавно уменьшается. Наличие армирующих волокон, расположенных под различными углами к продольной оси в начале затухания до 0,1 секунды быстро уменьшается (в полтора раза), а затем скорость его уменьшения аналогична однонаправленному композиту.

Таким образом, замена части углеродных волокон на базальтовые дает возможность удешевить изделия из ПКМ и при этом практически не ухудшает прочностные свойства полимерных композитов.

Выводы

1. Исследование характера рассеяния энергии в звуковом диапазоне частот вместе с изучением упругопрочностных свойств являются весьма информативным методом комплексной оценки состава, структуры и технологии получения гибридных полимерных композитов, используемых, в частности, в ветроэнергетике.

2. Установлено, что замена части углеродных волокон (20 %) базальтовыми с целью удешевления полимерного композита, рекомендуемого для элементов конструкций ветролопасти, существенно не снижает свойства гибридного материала.

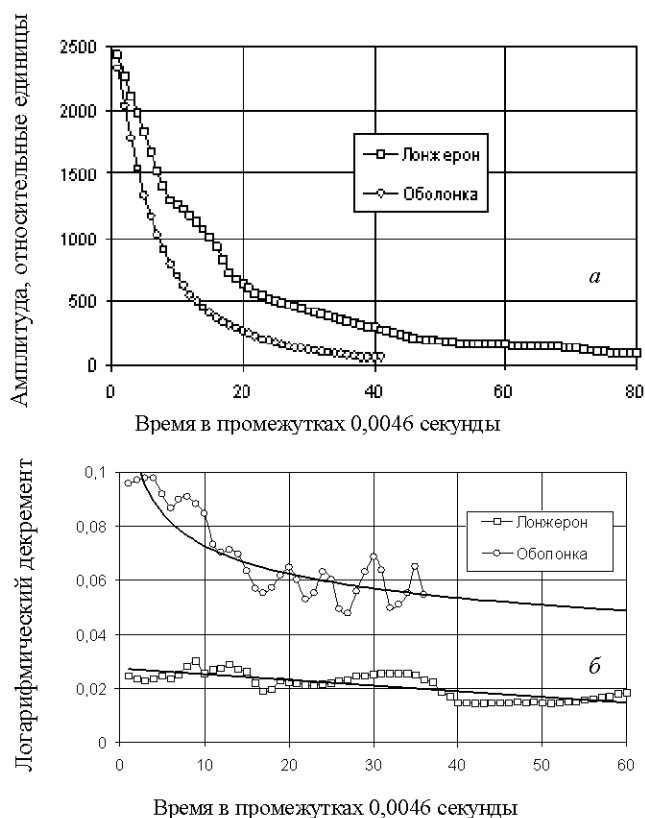


Рис. 9. Временная зависимость амплитуды (а) и логарифмического декремента затуханий (б) свободных затухающих колебаний ПКМ

Список литературы

1. Перепелкин К. Е. Полимерные волокнистые композиты, их основные виды, принципы получения и свойства / К. Е. Перепелкин // Химические волокна. Ч. 1. – №4. – 2005. – С. 7–22 ; Ч. 2. – № 5. – 2005. – С. 54–69 ; Ч. 3. – № 1. – 2006. – С. 41–50.
2. Griffin D.A., Aswill T.D. (May11-15, 2003). Alternative Composite Materials for Megawatt Scale Turbine Blades: Design Consideration and Test Evaluation // Proceedings of the 48 International SAMPE Symposium and Exhibition. Long Beach, CA.
3. Marsh G. Reinforced plastics transform small wind market// Reinforced Plastics, Vol. 48, I. 1, Jan.2004. – P. 22–26.
4. Структура и некоторые свойства оксидных кристаллов на основе муллита и армированных ими композитов с алюминиевой матрицей / [Вишняков Л. Р., Мороз В. П., Синайский Б. Н., Яременко О. П.] // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2006. – № 2. – С. 27–31.
5. Sandia Report. SAND2005-5748. Fabrication, testing and Analysis of Anisotropic Carbon/Glass Hybrid Composites. Vol. 1. Technical Report/ Sandia National Laboratories, Print. Nov. 2006. – 60 p. ; Vol. 2. Test Data/ Sandia National Laboratories, Print. Nov. 2006. – 301 p.
6. Розсіювання механічної енергії лопатками газотурбінних двигунів в залежності від їх дефектності / [Мозговий О. В., Тітов А. В., Мозговий С. В., Качан О. Я.] // Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение. – К. : НТУУ «КПИ». – 2006. – № 49. – С. 222–226.

Одержано 21.09.2012

Мозговий О.В., Вишняков Л.Р., Сінайський Б.Н., Яременко О.П., Мороз В.П. Вивчення розсіювання механічних коливань звукової частоти в полімерних композитах, армувальних волокнами

Досліджено особливості розсіювання механічної енергії полімерними композитами, армуваними вуглецевими, базальтовими та скляними волокнами. Вивчено вплив структури, природи та напрямку укладки армуючих волокон на характеристики механічних коливань відповідно до конструкції лопатей вітрових турбін.

Ключові слова: полімерні композити, вуглецеві волокна, механічні коливання, деформація, структура, властивості.

Mozgovoy A., Vishnyakov L., Sinayskiy B., Yaremenko O., Moroz V. Study of mechanical oscillation acoustic frequency of fiber reinforced polymer composites

The features of mechanical energy dissipation by polymer composites reinforced with carbon, basalt and glass fibers are studied. The effect of the structure, origin and direction of the reinforcing fibers lay-out on the characteristics of mechanical oscillations is investigated in relation to the design of wind turbine blades.

Key words: polymer composites, carbon fibers, mechanical oscillations, deformation, structure, properties.