

Для цитирования: Злобина И.В., Морозов Д.В., Павлов С.П. Виброакустические характеристики армированных углеродными волокнами композиционных материалов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (4):29-39. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-29-39

For citation: Zlobina I.V., Morozov D.V., Pavlov S.P. Vibroacoustic characteristics of composite materials reinforced by carbon fibres. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (4):29-39 (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-29-39

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ МЕХАНИКА

УДК 621.9.047/048

ББК 22.251, 30.3

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-4-29-39

ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Злобина И.В.¹, Морозов Д.В.³, Павлов С.П.²

¹⁻³Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,

¹⁻³410054, г. Саратов, ул. Политехническая 77, Россия,

¹e-mail: irinka_7_@mail.ru, ²e-mail: ppsar@yandex.ru, ³e-mail: thisistonypark@gmail.com

Резюме: Цель. Целью исследования является изучение особенностей прохождения волн механических колебаний ультразвуковой частоты через композиционные материалы, в том числе подвергнутые воздействию СВЧ электромагнитного поля. **Метод.** Выполнены исследования распространения механических волн, генерируемых источником ультразвуковых колебаний, в образцах из композиционных материалов, армированных углеродными волокнами, используемых в авиационной промышленности. **Результат.** Установлено, что при прохождении через композиционный материал частота волн снижается практически на два порядка по сравнению с частотой вынуждающей динамической силы, при этом существенное влияние оказывает метод укладки армирующих волокон: наибольшее снижение частоты наблюдается у композитов с квазиизотропной структурой. При прохождении колебаний непосредственно через металлическую поверхность снижение частоты происходит не более, чем на порядок. Амплитудные значения виброускорений возрастают при уменьшении толщины образцов и превышают в 2-3 раза полученные при контрольном прохождении волны через стальную поверхность оснастки. Уровень звукового давления изменяется от 4,1 Па для образцов с квазиизотропной структурой до 8,4 Па для образцов, армированных металлической сеткой. Обработка исследованных материалов в СВЧ электромагнитном поле приводит к изменению характера прохождения волн колебаний. Незначительно – на (7-9)% возрастает среднее за установленный период времени значение виброускорения, но при этом существенно (от 20% до 6 раз) снижается неравномерность значений, т.е. колебания становятся стабильными. У некоторых материалов (армированный металлической сеткой квазиизотропный и слоистый прессованный) значения виброускорения вообще не изменяются за цикл. **Вывод.** Полученный результат может явиться основой для разработки технологий создания конструкций из композиционных материалов со стабильными виброакустическими характеристиками.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720 «Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы повышенной динамической прочности, послойно формируемых электротехнологическими методами».

Ключевые слова: композиционные материалы, ультразвуковые колебания, виброакустические характеристики, углеродные волокна, СВЧ электромагнитное поле

PHYSICAL-MATEMATICALSCIENCE
MECHANICS

VIBROACOUSTIC CHARACTERISTICS OF COMPOSITE MATERIALS REINFORCED
BY CARBON FIBRES

*Irina V Zlobina*¹, *Danila V. Morozov*³, *Sergey P. Pavlov*²

¹⁻³Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,

¹⁻³77 Politehnicheskaya Str., Saratov 410054, Russia,

¹e-mail:irinka_7_@mail.ru, ²e-mail: pspсар@yandex.ru, ³e-mail:thisistonypark@gmail.com

Abstract. Objectives The aim of the research is to study the features of the propagation of mechanical oscillation waves of ultrasonic frequency through composite materials, including those exposed to a microwave electromagnetic field. **Methods** The propagation of mechanical waves generated by a source of ultrasonic vibrations is investigated in samples of composite materials reinforced by carbon fibres as used in aircraft construction. **Results** It is established that, when passing through a composite material, the frequency of the waves decreases by almost two orders of magnitude in comparison with the frequency of the driving dynamic force, while the method of laying reinforcing fibres has a significant effect: the greatest decrease in frequency is observed in composites with a quasi-isotropic structure. When the oscillations pass directly through the metal surface, the frequency decreases by not more than an order of magnitude. The amplitude values of vibration acceleration increase with decreasing thickness of the samples and exceed by 2-3 times the waves obtained during the control passage through the steel surface of the gear. The sound pressure level changes from 4.1 Pa for samples with a quasi-isotropic structure to 8.4 Pa for samples reinforced with a metal grid. The processing of the investigated materials in a microwave electromagnetic field leads to a change in the character of the passage of the oscillation waves. The average for a specified period of time vibration acceleration value increases slightly (7-9%), while its unevenness decreases significantly (by between 0.2 and 6 times), i.e. vibrations become stable. For some materials (reinforced with a quasi-isotropic and laminated pressed metal mesh), the vibration acceleration values do not change at all during a cycle. **Conclusion** The obtained result can form the basis for developing technologies for creating structures from composite materials with stable vibroacoustic characteristics.

Acknowledgment The research was supported by RFBR grant No. 17-03-00720 «Methodology of optimising microconstruction of composite materials for complex shape objects with increased dynamic strength, formed layer-by-layer by electrotechnological methods».

Keywords: composite materials, ultrasonic vibrations, vibroacoustic characteristics, carbon fibres, microwave electromagnetic field

Введение. Анализ научно-технической литературы, материалов конференций и выставок свидетельствует об интенсивном развитии производства композиционных материалов на основе углеродных волокон и стеклотканей, и их широком применении в авиационной, автомобильной, судостроительной промышленности, ракетостроении и космической технике [1, 3-15]. По данным исследовательской компании Grand View Research, объем мирового рынка углепластиков достигнет к 2022 году 23,55 млрд.долл. [2].

Одними из основных потребителей композитов на основе углеродных волокон в промышленно развитых странах были и остаются аэрокосмическая и оборонная промышленность, а также автомобилестроение [1-4]. При этом композиционные материалы используются не только в военной авиации [5], но все шире применяются при производстве легких спортивных самолетов, самолетов для местных авиалиний и тяжелых магистральных лайнерах типа перспективного Boeing 787 или Airbus 380 [6-7].

В настоящее время из композиционных материалов изготавливают изделия, работающие в условиях высоких скоростей и вибраций, например, лопасти низкотемпературных контуров газотурбинных двигателей.

Вибрации могут возникнуть при попадании летательного аппарата в зону турбулентности, при выполнении маневра уклонения от зенитного оружия, при внешне незначительных повреждениях, как правило, приводящих к дисбалансу. При этом распространение вибраций будет определяться не только размерами и формой объекта, но его внутренней структурой, состоящей из разнонаправленных армирующих волокон и полимерной матрицы.

При использовании топологической оптимизации конструкции наличие в структуре армирующих областей с резко отличающимися от основного материала физико-механическими свойствами вносит еще более высокую неопределенность в распространение вибраций.

Изложенное свидетельствует о существовании и сохранении в близкой и отдаленной перспективе потребности высокотехнологичных производств в применении композиционных материалов высокого качества.

Авиационные полимерные композиты в настоящее время условно разделяют на 4 группы: конструкционные пластики для слабо- и средненагруженных конструкций; баллистически стойкие пластики для защитных конструкций; антифрикционные пластики для тяжело нагруженных узлов трения, звукопоглощающие пластики для снижения шума самолетов на местности.

Особенностью волокнистых полимерных композиционных материалов является влияние на физико-механические свойства технологии изготовления и существование материала только в виде изделия, например, кожух звукопоглощающего контура авиационного двигателя [8]. Типовая технология формирования армированных композиционных материалов заключается в послойной выкладке пропитанных связующим волокнистых структур с последующим прессованием и отверждением.

В последнее время начинает развиваться использование для изготовления композиционных изделий аддитивных технологий [9-10]. Особенности данной технологии приводят к различным дефектам [11], к которым относятся: расслоение; трещины в связующем, складки, подмятие слоев, царапины, риски, забоины, отрыв поверхностных слоев, коробление, поводки и прогибы готового изделия, неправильная укладка наполнителя, оголение основы, нахлесты препрега, срезы препрега, зоны с повышенным содержанием пор и пузырьков и т.п. Для высоконагруженных элементов конструкции, а также в изделиях, работающих в условиях высоких температур, используют материалы типа «углерод-углерод» [12-13].

Также композиционные материалы характеризуются выраженной анизотропией физико-механических характеристик, определяемой видом и ориентацией армирующих компонентов. Применение армирования углеродными нанотрубками частично снимает проблему анизотропии, но не устраняет полностью, переводя ее на другой масштабный уровень, хотя и обеспечивает повышение физико-механических характеристик [14]. В тоже время перспективные авиационные и ракетные комплексы будут высокоманевренными, использоваться в условиях гиперзвуковых скоростей в атмосфере и ближнем космосе, что выдвигает повышенные требования к механической и термической прочности их конструктивных элементов, имеющих сложные формы, сильно влияющие на распределение опасных механических и температурных напряжений. Дополнительную трудность создает крайняя неоднородность свойств по объему материала, вызванная укладкой армирующего компонента, равномерностью его пропитки материалом матрицы.

На основании изложенного представляется целесообразным исследовать прохождение механических волн высокой частоты через композиционные материалы, используемые в авиационной технике, а именно – армированные углеродными волокнами. При этом целесообразно выявить влияние на физику данного процесса особенностей структуры материала и технологической наследственности, определяемой содержанием и режимами операций формования.

Для технологических процессов формирования большинства композиционных материалов с неоднородными структурой и составом (керамика, стекло- и углепластики, материалы, получаемые с применением аддитивных технологий) характерно использование термической обработки для стабилизации структуры и обеспечения когезионной прочности.

Однако из-за упомянутой выше неоднородности тепло- и электрофизических параметров композиции, тепловые потоки в объеме материала распределяются крайне неравномерно, что создает неоднородности и микрофлуктуации, способные вызвать нарушения в прохождении механических колебаний. Электротехнологические и, в частности, электрофизические методы воздействия на композиционные материалы могут оказаться весьма перспективными вследствие своей многофакторности, что расширяет сферу параметров их влияния. Применение СВЧ электромагнитного поля для тепловой и нетепловой обработки диэлектрических, в том числе композиционных, материалов позволяет интенсифицировать процесс и повысить степень равномерности обработки вследствие объемного характера воздействия, улучшить прочностные характеристики [15-17].

Следует отметить, что влияние СВЧ обработки композиционных материалов на их виброакустические характеристики изучено недостаточно. В тоже время использование данного метода воздействия может явиться одним из инструментов повышения стойкости изделий из данных материалов к вибрационным нагрузкам.

Постановка задачи. Целью исследований явилось изучение особенностей прохождения волн механических колебаний ультразвуковой частоты через композиционные материалы, в том числе подвергнутые воздействию СВЧ электромагнитного поля.

Методы исследования. Для измерения параметров колебаний образцов использовался компьютерный виброакустический комплекс ВК-01 производства ЗАО «Электронные технологии и метрологические системы» (г. Зеленоград Московской обл.) с датчиками виброускорений ВС-112 и микрофонами 1 класса ВС-501. Запись и обработка сигналов датчиков осуществлялась во встроенной в комплекс программной среде ZetLab. Схема измерения представлена на рис. 1, рабочее место – на рис. 2.

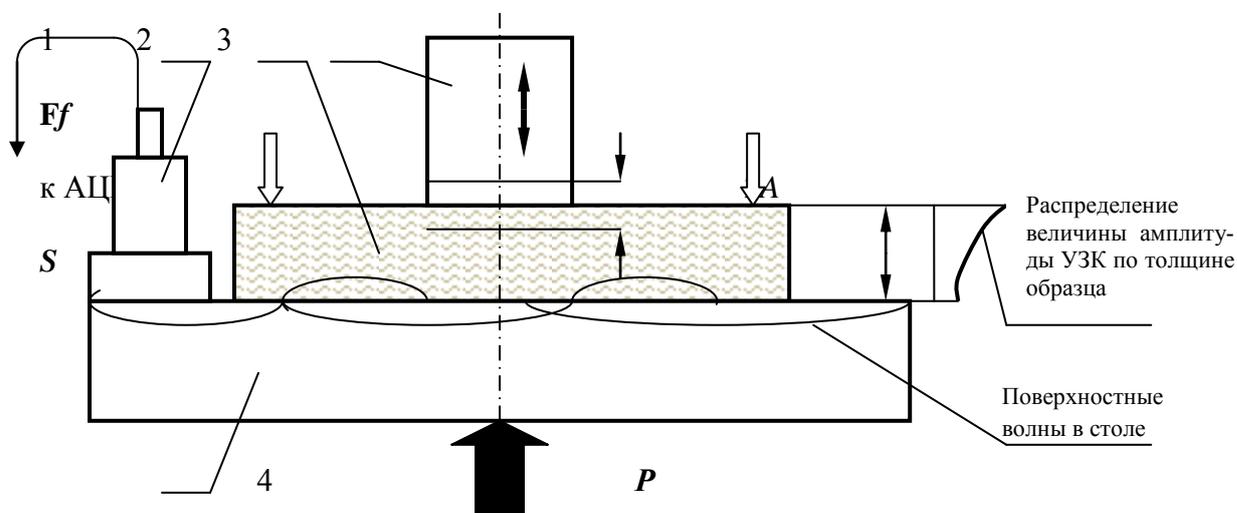


Рис. 1. Схема проведения виброизмерений

1 – датчик виброускорений ВС-112; 2 – образец; 3 – трансформатор ультразвуковых колебаний; 4 – стол экспериментальной установки

Fig. 1. Scheme of vibration measurements

1 - vibration acceleration sensor BC-112; 2 - sample; 3 - ultrasonic oscillation transformer; 4 - experimental setup table

Образцы устанавливали на стол экспериментальной ультразвуковой установки (рис. 2) и жестко крепили к его поверхности при помощи винтовых прихватов. На поверхность стола при помощи магнита крепили датчик ВС-112.

Генерируемая ультразвуковым пьезокерамическим преобразователем волна проходила через структуру исследуемого материала и возбуждала поверхностные волны в столе, амплитуда и частота которых регистрировались датчиком.

Амплитуду сигналов оценивали как среднюю по результатам их обработки в среде ZetLab, частоту – по количеству целых волн, укладывающихся в опорный интервал времени, который был принят равным 0,5 с.



Рис. 2. Рабочее место для проведения виброакустических измерений
Fig. 2. Workplace for conducting vibroacoustic measurements

Амплитуда и частота исходных колебаний излучателя составляли соответственно 10 мкм и 23350 Гц. Для питания излучателя использовали опытный многочастотный генератор с программированием базовой частоты при помощи ноутбука и тонкой настройкой с дискретностью 10 Гц.

Образцы нагружали вынуждающей силой путем прижатия торца излучателя к их поверхности с усилием 50 Н, которое задавалось при помощи пружины, размещенной в столе установки. Исследовали следующие образцы: из квазиизотропного отвержденного углепластика толщиной 5 и 3,3 мм; из квазиизотропного углепластика толщиной 1,7 мм, армированного металлической сеткой; из углепластика толщиной 1,8 мм, полученного послойной выкладкой на полимерную подложку. Во всех случаях поперечные размеры образцов составляли 70x70 мм. СВЧ обработку образцов проводили на специальной установке (рис. 3).



Рис. 3. Экспериментальная установка для обработки материалов в СВЧ электромагнитном поле
Fig. 3. Experimental installation for material processing in a microwave electromagnetic field

Источником СВЧ электромагнитного поля являлась микроволновая установка «Жук-2-02» производства ООО «АгроЭкоТех» (г. Обнинск Калужской обл.).

Образцы закрепляли на трехкоординатном столе с рабочей поверхностью из полипропилена PP15. При помощи винтов координатных перемещений устанавливали дистанцию 200 мм от среза излучающего рупора и размещали центр образца по оси излучения.

Излучаемая мощность установки «Жук-2-02» составляла 1200 Вт, частота – 2450 МГц. Время обработки выбирали равное 1 минуте на основе априорной информации [18-20] для обеспечения напряженности поля (удельной СВЧ мощности), исключающей перегрев образцов.

В процессе исследований оценивали величину виброускорения, стабильность его величины, частоту колебаний, прошедших через образец, и уровень звукового давления.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 4 –7 и в табл. 1, 2.

Таблица 1. Влияние обработки в СВЧ электромагнитном поле и структуры композиционных материалов на частоту прошедшей через образец вибрационной волны (Гц)

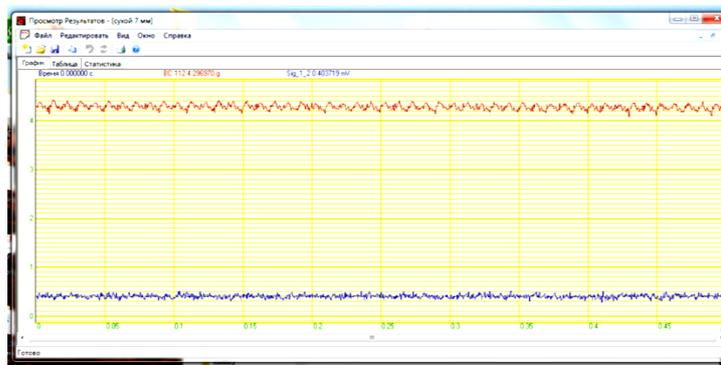
Table 1. Effect of processing in the microwave electromagnetic field and the structure of composite materials on the frequency of the transmitted vibration wave (Hz)

Вид образца	Квазиизотропный $S=5$ мм	Квазиизотропный $S=3,3$ мм	Квазиизотропный $S=1,7$ мм с сеткой	Слоистый $S=1,7$ мм
Контрольный	100	100	100	120
Обработанный	180	120	200	120

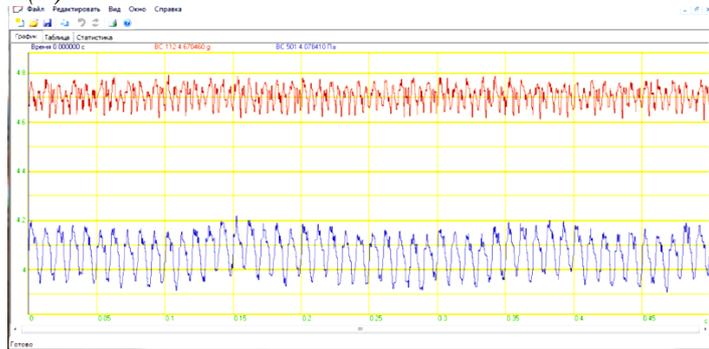
Таблица 2. Влияние обработки в СВЧ электромагнитном поле и структуры композиционных материалов на величину и стабильность виброускорения

Table 2. Effect of processing in the microwave electromagnetic field and the structure of composite materials on the magnitude and stability of vibration acceleration

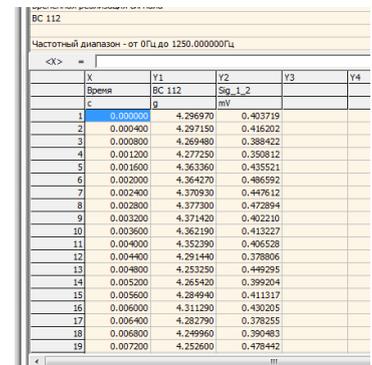
Вид образца		a_{max} , ед. g	a_{min} , ед. g	$a_{ср}$, ед. g	Δa , %
Квазиизотропный $S=5$ мм	контрольный	4,377	4,25	4,308	3
	обработанный	4,765	4,646	4,707	2,5
Квазиизотропный $S=3,3$ мм	контрольный	5,44	3,89	4,765	39,8
	обработанный	4,92	4,638	4,79	6
Квазиизотропный $S=1,7$ мм с сеткой	контрольный	7,083	6,707	6,926	5,6
	обработанный	7,444	7,36	7,414	1
Слоистый $S=1,7$ мм	контрольный	7,867	7,75	7,824	1,5
	обработанный	7,8699	7,8691	7,869	0,1



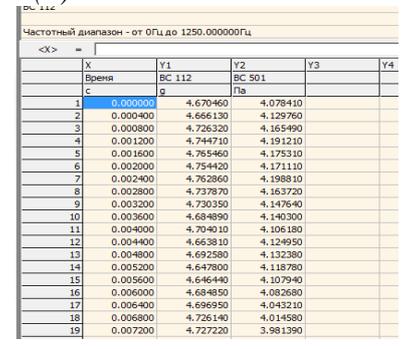
A(a)



B(c)



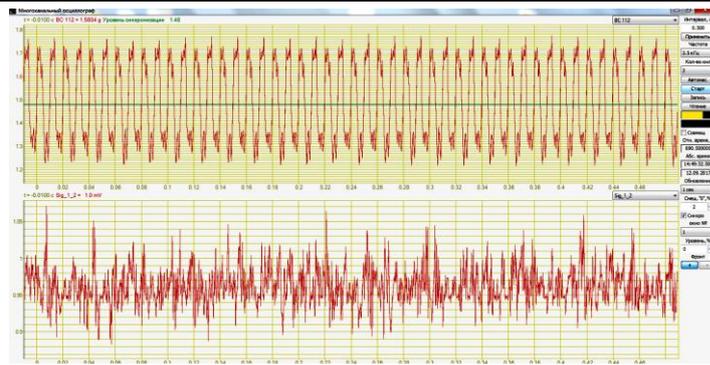
B(b)



Г(d)

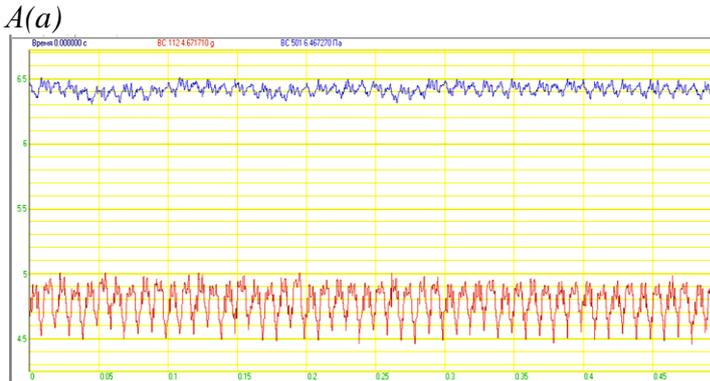
Рис. 4. Виброшумовые характеристики пластины толщиной 5 мм и значения сигналов: (а) и (б) контрольной; (в) и (г) после СВЧ воздействия

Fig. 4. Vibration noise characteristics of a plate 5 mm thick and signal values: (a) and (b) control; (c) and (d) after microwave exposure



Частотный диапазон - от 0Гц до 1250.000000Гц

X	Y1	Y2	Y3
Время	BC 112	Sig_1_2	
с	g	mV	
1	0.000000	4.255770	0.401718
2	0.000400	3.890030	0.379125
3	0.000800	5.094220	0.395143
4	0.001200	5.440360	0.396677
5	0.001600	5.013330	0.295050
6	0.002000	4.093360	0.314112
7	0.002400	4.405810	0.340246
8	0.002800	5.303110	0.349827
9	0.003200	5.358990	0.396789
10	0.003600	4.681360	0.320354
11	0.004000	3.920320	0.361862
12	0.004400	4.743440	0.410666
13	0.004800	5.413700	0.348525
14	0.005200	5.318020	0.416495
15	0.005600	4.279350	0.397056
16	0.006000	3.972570	0.387728
17	0.006400	5.031940	0.396408
18	0.006800	5.378160	0.328002
19	0.007200	4.950400	0.354915

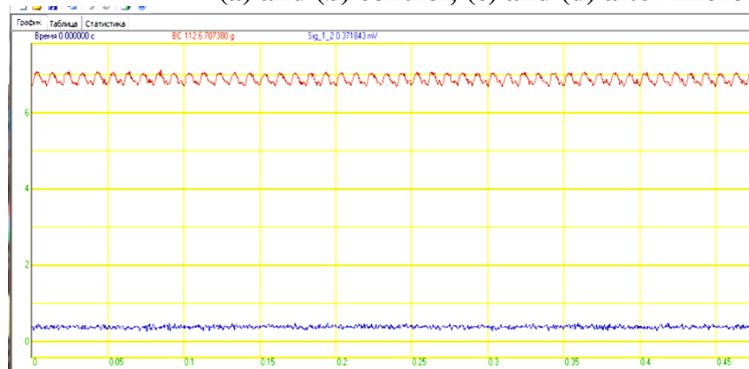


Частотный диапазон - от 0Гц до 1250.000000Гц

X	Y1	Y2	Y3	Y4
Время	BC 112	BC 501		
с	g	Pa		
1	0.000000	4.671710	6.467270	
2	0.000400	4.717740	6.450570	
3	0.000800	4.820030	6.446380	
4	0.001200	4.705160	6.443150	
5	0.001600	4.722220	6.401980	
6	0.002000	4.920550	6.415610	
7	0.002400	4.915190	6.392120	
8	0.002800	4.849680	6.406540	
9	0.003200	4.823960	6.398470	
10	0.003600	4.834760	6.381950	
11	0.004000	4.844690	6.385960	
12	0.004400	4.887950	6.376450	
13	0.004800	4.910370	6.358540	
14	0.005200	4.731500	6.365650	
15	0.005600	4.764210	6.355890	
16	0.006000	4.862590	6.381420	
17	0.006400	4.731440	6.427960	
18	0.006800	4.668010	6.425350	
19	0.007200	4.638200	6.437810	

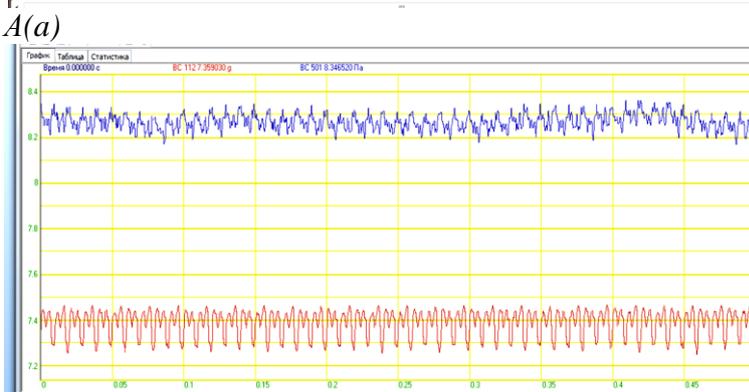


Рис. 5. Виброшумовые характеристики пластины толщиной 3,3 мм и значения сигналов: (а) и (б) контрольной; (в) и (г) после СВЧ воздействия
 Fig. 5. Vibro-noise characteristics of a plate 3.3 mm thick and signal values: (a) and (b) control; (c) and (d) after microwave exposure



Частотный диапазон - от 0Гц до 1250.000000Гц

X	Y1	Y2	Y3	Y4
Время	BC 112	Sig_1_2		
с	g	mV		
1	0.000000	6.707380	0.371843	
2	0.000400	6.749260	0.377783	
3	0.000800	6.802730	0.297103	
4	0.001200	6.875790	0.305073	
5	0.001600	6.964140	0.379884	
6	0.002000	7.037940	0.390123	
7	0.002400	7.034450	0.398933	
8	0.002800	7.030820	0.391941	
9	0.003200	7.082970	0.342385	
10	0.003600	7.058460	0.439849	
11	0.004000	7.049840	0.446369	
12	0.004400	7.055840	0.377966	
13	0.004800	6.973940	0.418385	
14	0.005200	6.942680	0.419932	
15	0.005600	6.925610	0.339302	
16	0.006000	6.890870	0.352356	
17	0.006400	6.817630	0.335644	
18	0.006800	6.782350	0.318524	
19	0.007200	6.831750	0.382197	

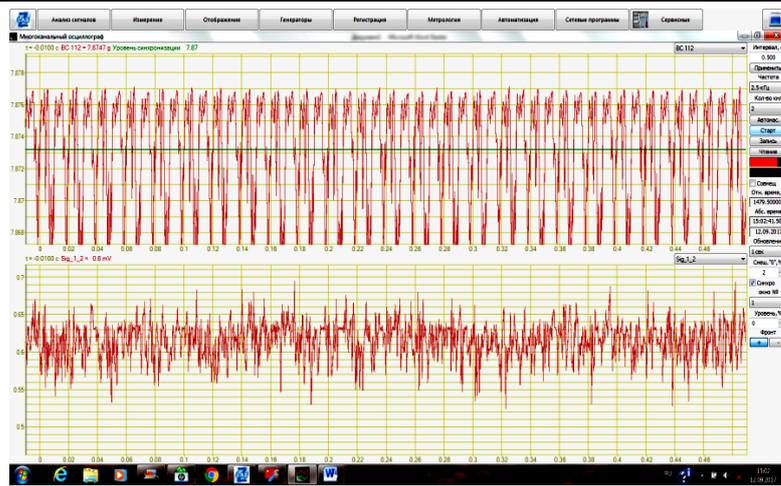


Частотный диапазон - от 0Гц до 1250.000000Гц

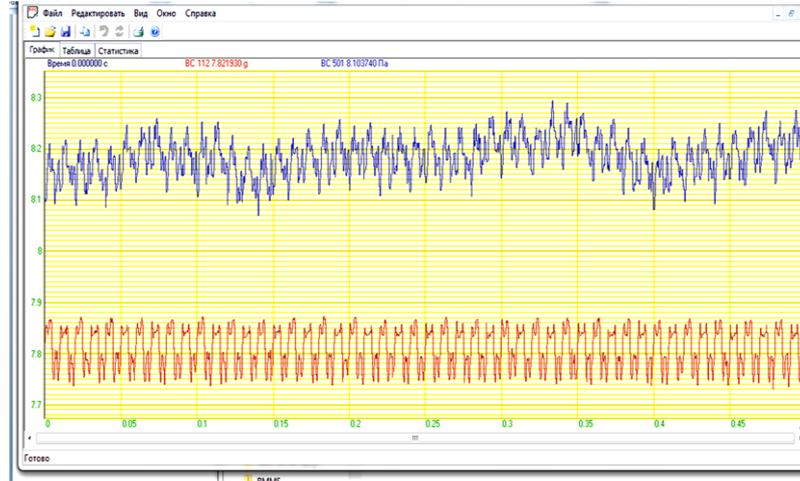
X	Y1	Y2	Y3	Y4
Время	BC 112	BC 501		
с	g	Pa		
1	0.000000	7.359030	8.346520	
2	0.000400	7.426760	8.310560	
3	0.000800	7.437930	8.285630	
4	0.001200	7.444050	8.288970	
5	0.001600	7.457180	8.284930	
6	0.002000	7.452910	8.275880	
7	0.002400	7.452260	8.251100	
8	0.002800	7.408290	8.252960	
9	0.003200	7.387780	8.278400	
10	0.003600	7.369680	8.279450	
11	0.004000	7.380870	8.280300	
12	0.004400	7.402940	8.254150	
13	0.004800	7.422710	8.252390	
14	0.005200	7.437120	8.280980	
15	0.005600	7.438110	8.279990	
16	0.006000	7.439990	8.229560	
17	0.006400	7.411270	8.210950	
18	0.006800	7.407180	8.242510	
19	0.007200	7.400680	8.272230	



Рис. 6. Виброшумовые характеристики пластины толщиной 1,7 мм с металлической сеткой и значения сигналов: (а) и (б) контрольной; (в) и (г) после СВЧ воздействия
 Fig. 6. Vibration response of a plate 1.7 mm thick with a metal mesh and the values of the signals: (a) and (b) of the control; (c) and (d) after microwave exposure



A(a)



B(c)

Частотный диапазон - от 0Гц до 1250.000000Гц

X	Y1	Y2	Y3
Время	BC 112	BC 501	Y3
с	g	Pa	
1	0.000000	7.821930	8.103740
2	0.000400	7.849560	8.097700
3	0.000800	7.855400	8.101120
4	0.001200	7.851240	8.132940
5	0.001600	7.841710	8.164230
6	0.002000	7.835090	8.192000
7	0.002400	7.843360	8.168810
8	0.002800	7.848560	8.180330
9	0.003200	7.865790	8.209900
10	0.003600	7.862570	8.164130
11	0.004000	7.866800	8.154620
12	0.004400	7.860220	8.155810
13	0.004800	7.808660	8.181020
14	0.005200	7.763330	8.158740
15	0.005600	7.750370	8.157860
16	0.006000	7.751950	8.153860
17	0.006400	7.785360	8.092300
18	0.006800	7.808630	8.102740
19	0.007200	7.792870	8.122580

B(b)

Частотный диапазон - от 0Гц до 1250.000000Гц

X	Y1	Y2	Y3
Время	BC 112	Sig_1_2	Y3
с	g	mV	
1	0.000000	7.869770	0.282784
2	0.000400	7.869710	0.309362
3	0.000800	7.869610	0.347974
4	0.001200	7.869410	0.335008
5	0.001600	7.869300	0.336927
6	0.002000	7.869200	0.310173
7	0.002400	7.869140	0.325439
8	0.002800	7.869100	0.346669
9	0.003200	7.869130	0.359308
10	0.003600	7.869250	0.332956
11	0.004000	7.869370	0.333643
12	0.004400	7.869440	0.342428
13	0.004800	7.869460	0.324727
14	0.005200	7.869670	0.322773
15	0.005600	7.869940	0.325668
16	0.006000	7.869810	0.305642
17	0.006400	7.869760	0.321666
18	0.006800	7.869710	0.304152
19	0.007200	7.869400	0.336904

B(d)

Рис. 7. Виброшумовые характеристики пластины из слоистого углепластика толщиной 1,8 мм и значения сигналов: (а) и (б) контрольной; (в) и (г) после СВЧ воздействия
Fig. 7. Vibration characteristics of a plate made of laminated carbon fiber with a thickness of 1.8 mm and the values of the signals: (a) and (b) of the control; (c) and (d) after microwave exposure

Обсуждение результатов. При прохождении через композиционный материал частота волн снижается практически на два порядка по сравнению с частотой вынуждающей динамической силы, при этом существенное влияние оказывает метод укладки армирующих волокон: наибольшее снижение частоты наблюдается у композитов с квазиизотропной структурой.

При прохождении колебаний непосредственно через металлическую поверхность снижение частоты происходит не более чем на порядок.

Амплитудные значения виброускорений возрастают на (10-11)% при уменьшении толщины контрольных образцов, что объясняется известным эффектом затухания ультразвуковых волн по толщине объекта воздействия. Однако после обработки в СВЧ электромагнитном поле виброускорение снижается значительно в меньшей степени и не превышает 2%. Одновременно частота волн колебаний, прошедших через обработанный образец, оказалась выше, чем через контрольный от 1,2 до 2,0 раз.

Наибольшее увеличение отмечено для образцов с размещенной в объеме материала металлической сеткой, что связано с более низким значением для металлов значений акустического сопротивления.

Данные эффекты могут быть объяснены отмеченным нами ранее [18-20] повышением плотности и однородности структуры, что способствует снижению акустического сопротивления. При этом значения виброускорения, как для контрольных, так и обработанных образцов

превышают в 2-3 раза полученные при контрольном прохождении волны через стальную поверхность оснастки.

Уровень звукового давления изменяется от 4,1 Па для образцов с квазиизотропной структурой до 8,4 Па для образцов, армированных металлической сеткой. У обработанных образцов незначительно – на (7-9)% возрастает среднее за установленный период времени значение виброускорения, но при этом существенно (от 20% до 6 раз) снижается неравномерность значений, т.е. колебания становятся стабильными. У некоторых материалов (армированный металлической сеткой квазиизотропный и слоистый прессованный) значения виброускорения вообще не изменяются за цикл.

Вывод. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета особенностей структуры композиционных материалов при проектировании и изготовлении несущих конструкций, работающих в условиях вибраций.

Для стабилизации виброакустических характеристик армированных углеродными волокнами композиционных материалов целесообразно применение финишной операции модифицирования изделий в СВЧ электромагнитном поле с невысокой напряженностью, что позволит повысить надежность функционирования изделий.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720 «Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы повышенной динамической прочности, послойно формируемых электротехнологическими методами».

Библиографический список:

1. Кошкин Р.П. Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем: <http://spmagazine.ru/420>, дата последнего обращения 28.01.2017 г.
2. <http://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-ryinok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>, дата последнего обращения сентябрь 2016 г.
3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»//Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
4. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники //Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
5. Rand, B. Appleyard, S. Yardim, M., 1998 Proceedings of the NATO advanced Study Institute on Design and Control of Structure of Advanced Carbon Materials for Enhanced Performance, pp.177-193.
6. Thomas, G 2007, ‘Composites come of age on 787’, The Australian, 18 May, p. 2830.
7. Werfelman, L 2007, ‘The Composite Evolution’, AeroSafety World, March 2007, p. 17-21.
8. Лобанов Д. С. Экспериментальные исследования деформационных и прочностных свойств полимерных композиционных материалов и панелей с наполнителем: дис. канд. техн. наук: Пермь, 2015. 130 с.
9. Ling, L.X, Jun, L.H, Wen Feng. X, and Zhi. L.K, 2007. ‘The effect of applied stress on damage mode of 3D C/C composites under bend-bend fatigue loading.’. Science in China Series E-Technological Sciences, 50(1), pp. 97-102.
10. Krishnamurthy S. 2006, Prestressed Advanced Fibre Reinforced Composites: Fabrication and Mechanical Performance, PhD thesis, Defence College of Management and Technology, CranfieldUniversity, Beds., p. 49-56.
11. Гусева Р. И. Особенности изготовления тонкостенных обшивок из углепластика в самолетостроении. Изменение технологических параметров в процессе формования / Гусева Р. И., ШаМингун // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, № II-1 (18), 2014. С. 4-12.
12. Kumar S., T. D. Dang, F. E. Arnold, A. R. Bhattacharyya, B. G. Min, X. Zhang, R. A. Vaia, C. Park, W. W. Adams, R. H. Hauge, R. E. Smalley, S. Ramesh, and P.A. Willis. ‘Synthesis, Structure, and Properties of PBO/SWNT Composites,’ Macromolecules, vol 35, 2002, pp 9039-9043.
13. Savage, G., 1993, Carbon-carbon Composites, Chapman&Hall, USA, pp.178-237.
14. Ajayan, P. M., L. S. Schandler, C. Giannaris, and A. Rubio, ‘Single-Walled Carbon Nanotube Composites: Strength and Weakness,’ Advanced Materials, vol. 12, 2000, pp. 750-753.
15. Архангельский Ю.С. Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник / Ю. С. Архангельский – Саратов: Научная книга, 2011. - 560 с.
16. L. Estel, Ph. Lebaudy, A. Ledoux, C. Bonnet, M. Delmotte // Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications. – 2004. – № 11. – P. 33.
17. Калганова С.Г. Электротехнология нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле. Дис...доктора тех.н. Саратов: Саратов. гос. тех. ун-т,

2009.

18. Zlobina I.V. The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials/Zlobina I.V., Bekrenev N.V. *Научные технологии*. 2016. Т. 17. № 2.С. 25-30.
19. Zlobina I.V. The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural / Zlobina, I.V., Bekrenev, N.V. // *Solid State Phenomena*. 2016. V. 870, p.p. 101-106.
20. Zlobina I.V. Increasing of the endurance of polymeric construction materials with the multilevel hierarchical structure in the microwave electromagnetic field/Zlobina, I.V., Bekrenev, N.V. Muldasheva, G.K., // *International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2016*, Tomsk, Russia, SEP 19-26, AIP Conference Proceedings, AIP Publishing, Tom 1783, p.p. 020236-1 – 020236-4.

References:

1. Koshkin R.P. Osnovnye napravleniya razvitiya i sovershenstvovaniya bespilotnykh aviatsionnykh sistem: <http://spmagazine.ru/420>, data obrashcheniya 28.01.2017 g. [Koshkin R.P. The main directions of development and improvement of unmanned aerial systems: <http://spmagazine.ru/420>, access date January 28, 2017. (In Russ.)]
2. <http://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-rynok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>, data obrashcheniyasentyabr' 2016 g.[<http://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-rynok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>, access date September 2016 (In Russ.)]
3. Kablov E.N. Innovatsionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNTs RF porealizatsii — Strategicheskihnpravleniirazvitiyamaterialov i tekhnologiiikh pererabotkina period do 2030 goda”. *Aviatsionnyematerialy i tekhnologii*. 2015; 1(34):3–33. [Kablov E.N. Innovative developments FGUP «VIAM» GNTs RF on the implementation of "Strategic directions of materials development and processing technologies for the period until 2030". *Aviation materials and technologies* 2015;1 (34):3–33.(In Russ.)]
4. Kablov E.N. Materialy i khimicheskie tekhnologii dlya aviatsionnoi tekhniki. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*. 2012; 82(6):520–530. [Kablov E.N. Materials and chemical technologies for aviation equipment. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2012; 82(6):520–530. (In Russ.)]
5. Rand B., Appleyard S.,Yardim M. Proceedings of the NATO advanced Study Instituteon Designand Control of Structure of Advanced Carbon Materials for Enhanced Performance.1998. P.177-193.
6. Thomas G. Composites come of age on 787. *The Australian*, 18 May 2007. P. 2830.
7. Werfelman L. The Composite Evolution. *AeroSafetyWorld*. March 2007. P. 17-21.
8. Lobanov D.S. Eksperimental'nye issledovaniya deformatsionnykh i prochnostnykh svoystv polimernykh kompozitsionnykh materialov i panelei s zapolnitelem: dis. kand. tekhn. nauk: Perm', 2015. 130 s. [Lobanov D.S. Experimental studies of the deformation and strength properties of polymeric composite materials and panels with filler. Published summary of the candidate of technical sciences dissertation: Perm', 2015. 130 p. (In Russ.)]
9. Ling L.X., Jun L.H., Wen Feng X. and Zhi L.K. The effect of applied stress on damage mode of 3D C/C composites under bend-bend fatigue loading. *Science in China Series E-Technological Sciences*. 2007;50(1):97-102.
10. Krishnamurthy S. Prestressed Advanced Fibre Reinforced Composites: Fabrication and Mechanical Performance. PhD thesis, Defence College of Management and Technology, Cranfield University, Beds. 2006. P. 49-56.
11. Guseva R.I., ShaMingun. Osobennosti izgotovleniya tonkostennykh obshivok iz ugleplastika v samoletstroenii. *Izmeneniye tekhnologicheskikh parametrov v protsesse formovaniya. UchenyeyapiskiKomsomol'skogo-na-Amuregosudarstvennogotekhnicheskogouniversiteta*. 2014; II-1(18):4-12. [Guseva R.I., ShaMingun. Features of manufacturing thin-walled plating of carbon fiber in aircraft construction. Change of technological parameters in the process of moulding. *Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University*. 2014;II-1(18):4-12. (In Russ.)]
12. Kumar S., Dang T.D., Arnold F.E., Bhattacharyya A.R., Min B.G., Zhang X., Vaia R.A., Park C., Adams W.W., Hauge R.H., Smalley R.E., Ramesh S., Willis P.A. Synthesis, Structure, and Properties of PBO/SWNT Composites. *Macromolecules*. 2000;35:9039-9043.
13. Savage G. Carbon-carbon Composites. Chapman & Hall, USA. 1993. P.178-237.
14. Ajayan P.M., Schandler L.S., Giannaris C., Rubio A. Single-Walled Carbon Nanotube Composites: Strength and Weakness. *Advanced Materials*. 2000;12:750-753.
15. Arkhangel'skiiYu.S. SpravochnayaknigapoSVCh-elektrotermii: spravochnik. Saratov: Nauchnayakniga; 2011. 560 s. [Arkhangel'skiiYu.S. Reference book on microwave electrothermy: a reference book. Saratov: Nauchnayakniga; 2011. 560 p. (In Russ.)]
16. Estel L., Lebaudy Ph., Ledoux A., Bonnet C., Delmotte M. Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications. 2004;11:P. 33.
17. Kalganova S.G. Elektrotekhnologiya neteplovoi modifikatsii polimernykh materialov v SVChelektromagnitnom pole. Dis....doktoratekh.n. Saratov: Saratov.gos. tekhn. un-t, 2009. [Kalganova S.G. Electrotechnology of nonthermal modification of polymer in the microwave electromagnetic field. Dissertation of the Doctor of technical sciences. Saratov: Saratov State Technical University, 2009. (In Russ.)]
18. Zlobina I.V., Bekrenev N.V. The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials. *Научные технологии*. 2016;17(2):25-30.
19. Zlobina I.V., Bekrenev N.V. The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical char-

- acteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structure. *Solid State Phenomena*. 2016;870:101-106.
20. Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Muldasheva G.K. Increasing of the endurance of polymeric construction materials with the multilevel hierarchical structure in the microwave electromagnetic field. *Proceedings of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures*. Tomsk: AIP Publishing; 2016. Vol. 1783, P. 020236-1 – 020236-4.

Сведения об авторах:

Злобина Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент, кафедра «Техническая механика и детали машин».

Павлов Сергей Петрович – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра «Математика и моделирование».

Морозов Данила Вячеславович – студент, кафедра «Сварка и металлургия».

Information about the authors:

Irina V. Zlobina– Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Technical mechanics and machine parts.

Sergey P. Pavlov – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Department of Mathematics and Modeling.

Danila V. Morozov – Student, Department of Welding and Metallurgy.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 11.09.2017.

Принята в печать 20.11.2017.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 11.09.2017.

Accepted for publication 20.11.2017.