

INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS AND INTERNAL STRUCTURE ORGANIZATION ON FREE VIBRATIONS OF CM PLATES

Yu. S. Pervushin ^a, A. V. Akhmedyanov ^b, P. V. Soloviev ^c

Ufa State Aviation Technical University (UGATU)

^a pcomposit@mail.ru, ^b mr.versatile77@mail.ru, ^c paulnightingale@mail.ru

Submitted 2022, April 27

Abstract. Natural frequencies and vibration modes of solid bodies are the most important parameters when designing structural elements in order to take into account dynamic loading conditions. The article presents the results of studies of natural frequencies and vibration modes of composite plates as functions of their structures (number and thickness of layers, angles and laying sequence), volume fractions of reinforcing fibers, boundary conditions. Numerical results for analysis are obtained using finite element method software (ANSYS).

Keywords: free vibrations; plate; composite material; ANSYS; structure; bending.

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ И ВНУТРЕННЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ НА СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПЛАСТИН ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю. С. Первушин ^a, А. В. Ахмедьянов ^b, П. В. Соловьева ^b

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

^a pcomposit@mail.ru, ^b mr.versatile77@mail.ru, ^c paulnightingale@mail.ru

Поступила в редакцию 27.04.2022

Аннотация. Собственные частоты и формы колебаний твердых тел являются важнейшими параметрами, учитываемыми при проектировании элементов конструкций в целях учета условий динамического нагружения. Приведены результаты исследований собственных частот первой формы изгибных колебаний композитных многослойных пластин, как функций их структур (углов и последовательности их укладки), объемных долей армирующих волокон, граничных условий их закреплений. Пластины имеют девять слоев на основе эпоксидного связующего и армирующей компоненты в виде углеродных волокон, свойства которых представлены ниже. Структура пластин соответствовала условиям ортотропности. Возбуждаемые частоты, при которых определялись собственные частоты изгибных колебаний были в пределах нескольких килогерц, при которых длина волны превышала толщины пластин. При этом колебания слоев имели одинаковые направления. Граничные условия включали тринадцать способов за-

крепления. Рассмотрены колебания прямоугольных и квадратных пластин. Были выявлены зависимости свободных колебаний от соотношения сторон исследуемых пластин. Представлены графики зависимости свободных колебаний композитных пластин от объемной доли армирующей компоненты, различных граничных условий закрепления и структур. Значения частот первой формы свободных изгибных колебаний прямоугольных и квадратных пластин, с определенными геометрическими размерами представлены в табличном виде. Численные результаты для анализа получены с использованием программного обеспечения методом конечных элементов (ANSYS WORKBENCH 19.2) с использованием модуля ACP PrePost.

Ключевые слова: свободные колебания; пластина; композиционный материал; ANSYS; структура; изгиб.

ВВЕДЕНИЕ

Многослойные композитные пластины на основе полимерных матриц широко используются в авиационной и космической технике, энергетике, а также в современных инженерных конструкциях. Эффективное применение многослойных пластин из композитных материалов (КМ) при изгибе возможно лишь при четком представлении зависимости их напряженно-деформированного состояния и динамического поведения от внешних факторов [4, 5].

Основной особенностью композитных материалов является наличие четко выраженной неоднородной структуры, определяющей расположение разнородных компонентов. В качестве примера можно привести многослойный углепластик. Он состоит из нескольких слоев, каждый из которых армирован в определенном направлении, и каждый слой образован множеством нитей (волокон), помещенных в матрицу. Для данного композита можно выделить два уровня структурной неоднородности: на уровне слоев и на уровне волокон.

Если рассмотреть колебания слоистого углепластика, вызванные вибрационной нагрузкой, то можно отметить следующее: если возбуждаемые частоты колебаний на уровне нескольких килогерц, то длины волн будут на уровне десятков сантиметров. В этом случае композит будет колебаться как однородный, и колебания слоев будут происходить в одном направлении. Поэтому на макроуровне основные особенности колебаний слоистого композита можно исследовать путем замены всего объема однородным материалом с известными осредненными характеристиками.

Если частоты возмущающих движений находятся в диапазоне нескольких десятков килогерц и миллиметровых длин волн, соизмеримых с толщинами слоев пластины из КМ, то их колебания будут происходить по-разному. Для изучения особенностей колебаний такой пластины каждый ее слой следует заменять однородным эквивалентным материалом.

Ниже рассматриваются свободные изгибные колебания композитных пластин различных структур при разных граничных условиях и коэффициентах армирования. Колебания пластин рассматриваются на макроуровне.

Количество работ, посвященных исследованиям частот свободных колебаний (ЧСК) композитных пластин, оставляет желать большего. Это объясняется тем, что частоты свободных колебаний композитных пластин являются функциями значительного количества как внешних, так и внутренних, присущих композитным многослойным материалам, параметров. К внешним параметрам относятся граничные условия закрепления элементов конструкций, их формы, условия эксплуатации и др.

К внутренним факторам композитного материала относятся механические свойства матричного и армирующего компонентов КМ, внутренняя организация структуры по толщине проектируемого элемента (число и толщины слоев, последовательность и направление их укладки, относительные доли армирующего компонента).

В статье [9] рассмотрено влияние углов укладки внутренних слоев конкретной прямоугольной пластины из углепластика с заданными частотами собственных колебаний. Оценивается влияние углов ориентации слоев пластины из многослойного волокнистого композита, а также соотношения между толщиной и длиной сторон пластины на ее частоты собственных колебаний. В статье [10] производится анализ влияния последовательности укладки слоев слоистой композитной балки и их ориентации на частоты ее собственных колебаний. Проведенное сравнение с экспериментом показало, что прогнозирование собственных частот с помощью программного продукта ANSYS дает результаты, очень близкие к реальным. В работе [11] произведен анализ влияния трех типов граничных условий и угла ориентации армирующих слоев слоистой композитной прямоугольной пластины с соотношением сторон 1:4 на частоты и формы собственных колебаний. Предложенный авторами метод позволяет проводить оптимизацию по углу укладки и толщине слоев для получения заданных частот собственных колебаний. В статье [12] произведена оценка влияния углов укладки слоев и последовательности их укладки в многослойной композитной балке на собственные частоты крутильных ее колебаний в случае консольного закрепления. На основе проведенных исследований авторы делают вывод о том, что ANSYS является мощным инструментом для прогнозирования влияния различных факторов на ЧСК композитных элементов конструкций. В работе [13, 14] исследуется влияние схемы укладки и шести видов граничных условий на ЧСК углепластиковой балки, получены выводы о совместном влиянии изгибных и растягивающих колебаний при определенной укладке композитной балки. Из всего вышесказанного можно сделать вывод о том, что вследствие многообразия физико-механических характеристик КМ, вариантов структур композитных элементов конструкции, их геометрических параметров и граничных условий каждая композитная конструкция при приложенных эксплуатационных нагрузках будет иметь индивидуальные параметры механического поведения и ЧСК. В излагаемой статье в расширенной форме приводятся результаты исследований влияния на ЧСК пластин из КМ различных структур, разных долей армирующей компоненты, граничных условиях закрепления и разных соотношений сторон пластин.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являются девятислойные композитные пластины на основе эпоксидных связующих и наполнителей в виде углеродных волокон. Механические характеристики указанных компонент представлены в табл. 1.

Таблица 1. Механические характеристики компонент

Эпоксидное связующее	Наполнитель на основе углеродных волокон
1. Плотность, г/см ³ – 1,2	1. Плотность, г/см ³ – 1,8
2. Модуль упругости, ГПа – 4	2. Модуль упругости при растяжении, ГПа – 230
3. Модуль сдвига, ГПа – 1,4	3. Модуль сдвига, ГПа – 12
4. Коэффициент Пуассона – 0,35	4. Коэффициент Пуассона – 0,35

Для изучения влияния изменения объемной доли армирующей компоненты на собственные частоты колебаний исследуемых пластин были использованы методики микромеханики [1–3] для определения упругих свойств однонаправленного слоя.

В табл. 2 представлены упругие характеристики однонаправленного слоя при объемных долях армирующего компонента $\psi = 0,5; 0,6; 0,7$.

Таблица 2. Механические свойства однонаправленного слоя при различных объемных долях ψ армирующего компонента

Механические свойства	$\psi = 0,5$	$\psi = 0,6$	$\psi = 0,7$
Плотность, г/см ³	1,5	1,56	1,62
E_1 – модуль упругости вдоль армирования, ГПа	121	139,72	162,29
E_2 – модуль упругости в поперечном направлении, ГПа	8,6	10,75	14,3
E_3 – модуль упругости в перпендикулярном направлении, ГПа	8,6	10,75	14,3
Коэффициент Пуассона γ_{12}	0,27	0,256	0,242
Коэффициент Пуассона γ_{23}	0,34	0,34	0,34
Коэффициент Пуассона γ_{13}	0,27	0,256	0,242
Модуль сдвига G_{12} , ГПа	4,7	7,78	10,26
Модуль сдвига G_{13} , ГПа	4,7	7,78	10,26
Модуль сдвига G_{23} , ГПа	3,1	3,1	3,1

Структуры исследуемых ортотропных пластин состоят из 9 однонаправленных слоев, уложенных под разными углами и удовлетворяющие условиям ортотропности [6, 7].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСЛЕДОВАНИЙ

Влияние объемной доли армирования и граничных условий на частоты изгибных (1-я форма) свободных колебаний представлены в табл. 3. В приведенной структуре подстрочный индекс T у квадратных скобок означает полную сборку, а подстрочный индекс S – половину сборки, имеющую симметрию. Центральный слой в симметричной сборке с нечетным числом слоев подчеркивается сверху.

Таблица 3. Влияние структурных и геометрических параметров и граничных условий на частоты собственных изгибных колебаний композитных пластин

№	Вид закрепления	Геометрические размеры, мм	Структура	Собственные частоты первых форм изгибных колебаний при разных коэффициентов армирования, Гц		
				$\Psi = 0,5$	$\Psi = 0,6$	$\Psi = 0,7$
1		(1,8×75×180)	$[0_9]_T$	80,961	85,27	90,03
2		(1,8×75×180)	$[90/0/90/0/\overline{90}]_S$	400,36	426,11	452,75
3		(1,8×75×180)	$[90/0/90/0/\overline{90}]_S$	386,71	410,11	433,19
4		(1,8×75×180)	$[90/0/90/0/\overline{90}]_S$	524,82	564,8	603,78
5		(1,8×75×180)	$[90/0/90/0/\overline{90}]_S$	2442,9	2583,18	2731,2
6		(1,8×75×180)	$[90/0/90/0/\overline{90}]_S$	2405,1	2537,318	2679,45
7		(1,8×75×180)	$[90/0/90/0/\overline{90}]_S$	318	336,54	358,59
8		(1,8×180×180)	$[(\pm 45)_2 \overline{0}]_S$	109,95	118,06	126,02
9		(1,8×180×180)	$[90/\pm 45/90/\overline{0}]_S$	103,38	110,52	118,9
10		(1,8×180×180)	$[(\pm 45)_2 \overline{0}]_S$	272,66	298,91	322,02
11		(1,8×180×180)	$[90/\pm 45/90/\overline{0}]_S$	425,5	452,52	479,5
12		(1,8×180×180)	$[(\pm 45)_2 \overline{0}]_S$	273,36	299,74	322,95
13		(1,8×180×180)	$[90/\pm 45/90/\overline{0}]_S$	213,15	232,25	252,68

На рис. 1 представлен график зависимости собственных частот от коэффициента армирования ψ для различных структур.

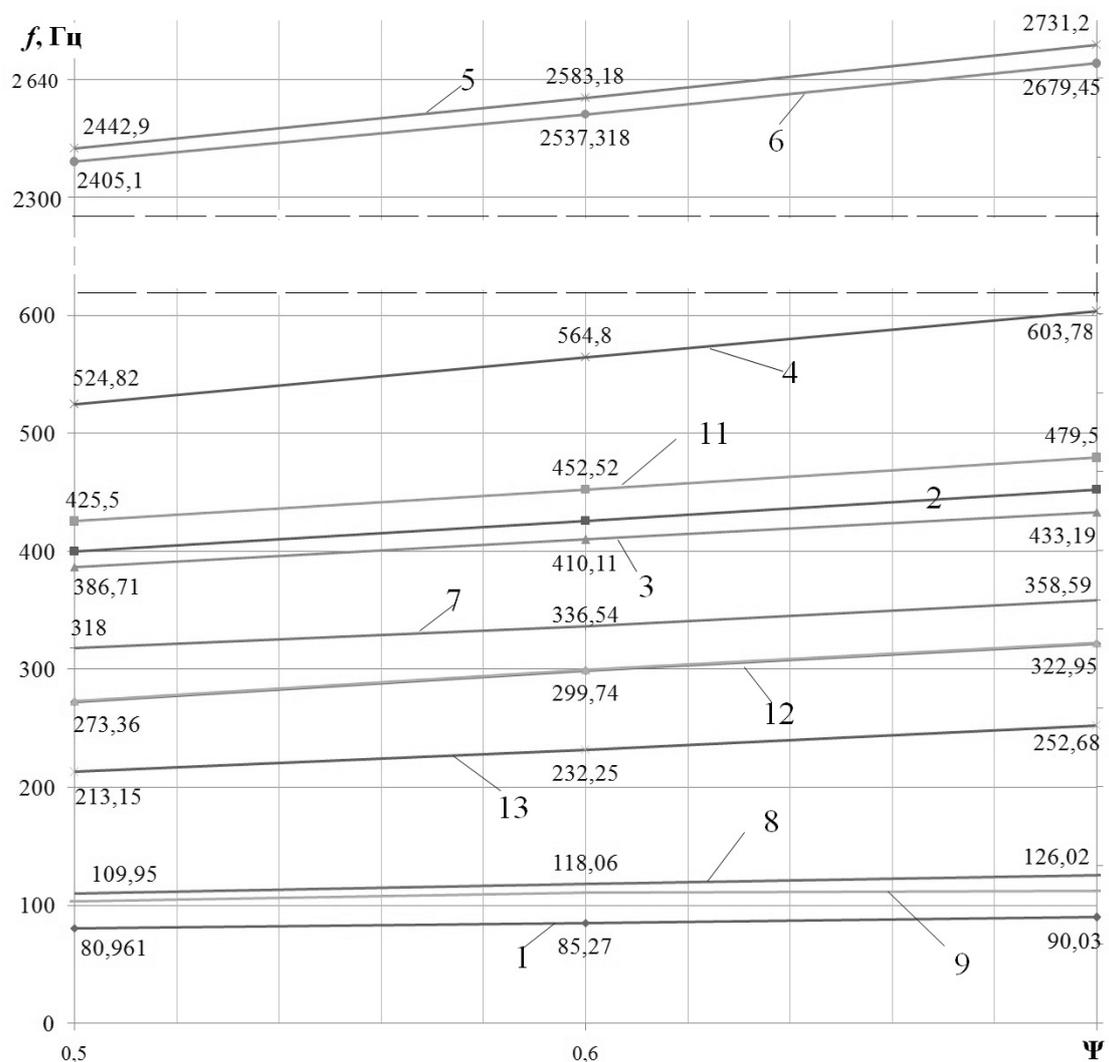


Рис. 1. Графики зависимости ЧСК от коэффициента армирования ψ для различных структур 1–13, соответствующие номерам граничных условий и структур, указанных в табл. 3

Из этого рисунка видно, что для пластины № 2 с размерами, указанными в табл. 3 с увеличением ψ от 0,5 до 0,7 частота собственных колебаний увеличивается на 13 %, а для квадратных пластин со структурой и граничными условиями № 8, 9 – на 14–15 %.

Из табл. 3 видно, что для продолговатых пластин с размерами (1,8×75×180) увеличение закрепленных сторон ведет к увеличению частоты собственных колебаний. Так, для пластины под номерами 2, имеющей закрепление двух ортогональных сторон при $\psi = 0,6$, ЧСК равна 426,11 Гц, а для пластины под № 4, имеющей закрепление трех сторон ЧСК, равна 564,8 Гц

ВЫВОДЫ

При проектировании пластин из композитных материалов следует учитывать, что собственные частоты изгибных колебаний композитных пластин являются функциями компонентов КМ, внутренней структуры, долей связующего и армирующего компонентов, граничных

условий. С увеличением доли армирующей компоненты для всех исследуемых пластин ЧСК увеличивается. Для квадратных пластин жестко закрепленных с двух смежных сторон наибольшие ЧСК наблюдаются при структуре $[(\pm 45)_2 \bar{0}]_s$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малмейстер А. К., Тамуж В. П., Тетерс Г. А. Сопrotивление полимерных и композитных материалов. Рига: Знание, 1980. 572 с. [A. K. Malmeister, V. P. Tamuzh, G. A. Teters, *Resistance of polymer and composite materials*, (in Russian). Riga: Znanie, 1980.]
2. Скудра А. М., Булавс Ф. Я. Прочность армированных пластиков. М.: Химия, 1982. 216 с. [A. M. Skudra, F. Ya. Bulavs, *Strength of reinforced plastics*, (in Russian). Moscow: Khimiya, 1982.]
3. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с. [V. V. Vasiliev, *Mechanics of constructions from composite materials*, (in Russian). M.: Mashinostroenie, 1988.]
4. Tsai S. W. Strength characteristics of composite materials. NASA Report: NASA CR 224, 1965. 83 p.
5. Цай С., Адзи В. Прочность слоистых составных материалов // Ракетная техника и космонавтика. 1966. № 2. С. 140–147. [S. Tsai, V. Aji, "Strength of layered composite materials", (in Russian), in *Raketnaya tehnika i kosmonavtika*, no. 2, pp. 140-147, 1966.]
6. Первушин Ю. С., Жернаков В. С. Основы механики, проектирования и технологии изготовления изделий из слоистых композиционных материалов. Уфа: УГАТУ, 2008. 303 с. [Yu. S. Pervushin, V. S. Zhernakov, *Fundamentals of mechanics, design and technology of manufacturing products from layered composite materials*, (in Russian). Ufa: UGATU, 2008.]
7. Тарнопольский Ю. М., Розе А. В. Особенности расчета деталей из армированных пластиков. Рига: Знание, 1966. 274 с. [Yu. M. Tarnopolsky, A. V. Roze, *Peculiarities of calculation of details from reinforced plastics*, (in Russian). Riga: Knowledge, 1966.]
8. Амбарцумян С. А. Теория анизотропных пластин. М.: Наука, 1967. 266 с. [S. A. Ambartsumyan, *Theory of anisotropic plates*, (in Russian). Moscow: Nauka, 1967.]
9. Modal Analysis Of Carbon/Epoxy Plate By Varying Fibre Orientation / Venkata Sushma Chinta, et al. // Turkish Journal of Computer and Mathematics Education. 2021. Vol. 10, No. 10. Pp. 7580-7586.
10. Attaf B., Bachene M. Effect of geometric ratios and fibre orientation on the natural frequencies of laminated composite plates // Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2010. Vol. 2, No. 2. Pp. 203-216.
11. Topcu M., Atlihan G. Stacking Sequence Effects on Natural Frequency of Laminated Composite Beams // Advanced Composites Letters. 2008. Vol. 17, No. 1. Pp. 7-13.
12. Мус А. Natural Frequencies of Rectangular Laminated Plates – Introduction to Optimal Design in Aeroelastic Problems // Aerospace. 2018. Vol. 5, No. 95. Pp. 2-18.
13. Hassan G. A., Fahmy M. A., Goda I. M. The Effect of Fiber Orientation and Laminate Stacking Sequences on the Torsional Natural Frequencies of Laminated Composite Beams // Journal of Mechanical Design and Vibration. 2013. Vol. 1, No. 1. Pp. 20-26.
14. Mahdi I.-E. M., Khayal O. M. E. S. Lamination Scheme and Boundary Conditions Effects on the Free Vibration of Laminated Composite Beams // International Journal of Engineering Research and Advanced Technology. 2010. Vol. 1, No. 3. Pp. 3-16.

ОБ АВТОРАХ

- ПЕРВУШИН Юрий Сергеевич**, проф. каф. сопр. материалов. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1958). Д-р техн. наук по динамике и прочности машин и аппаратов (Челяб. политехн. ин-т, 1991). Иссл. в обл. механ. и термомехан. композ. материалов.
- АХМЕДЬЯНОВ Алексей Венерович**, асп. каф. сопротвления материалов. Дипл. бакалавр (УГАТУ, 2018). Дипл. магистр (УГАТУ, 2020). Иссл. в обл. механ. и колебаний изд. из КМ.
- СОЛОВЬЕВ Павел Владимирович**, доц. каф. материаловедения и физики металлов, канд. техн. наук. Дипл. инж. (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. механ. и технологии изгот. изд. из композиц. материалов.
- PERVUSHIN, Yury Sergeevich**, Prof., Dept. of Strength of Materials. Dipl. Engineer (UAI, 1958). Dr. of Tech. Sci. (CPI, 1991). Researches in area of composite materials mechanics and thermomechanics.
- AKHMEDYANOV, Alexey Venerovich**, Postgrad. Student, Dept. of Strength of Materials. Dipl. Dipl. bachelor's degree (USATU, 2018). Dipl. master's degree (USATU, 2020). Research in the region. mechanics and vibrations of the product, made of composite materials.
- SOLOVIEV, Pavel Vladimirovich**, Assoc. Prof., Dept. of Materials Technology and Metals Physics, Cand. of Tech. Sci. Dipl. Engineer (USATU, 2009). Researches in area of mechanics and manufacturing technology of products made of composite materials.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 26, no. 2 (96), pp. 24-30, 2022. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).