

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**MODELING AND DETERMINATION
OF FREQUENCY CHARACTERISTICS
OF A ROBOTICS STRUCTURES
FROM COMPOSITE MATERIALS**

К.З. ХАЙРНАСОВ

K.Z. KHAYRNASOV

(Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет)

(National Research Moscow State University of Civil Engineering)

Email: kamilh@mail.ru

Рассматривается методика моделирования и определения собственных частот колебаний конструкции из композиционного материала, включающей в себя элементы, присущие роботизированным механизмам текстильной промышленности. Предложен метод оптимального расположения основы композиционного материала по линиям максимальных напряжений. Предложена методология аппроксимации элементов роботизированных систем в методе конечных элементов. Приведены формы колебаний роботизированной системы на примере многостепенного стенда полунатурного моделирования, определенных с применением метода конечных элементов. Разработанные методы позволяют изучать роботизированные системы из однородных и композиционных материалов.

The technique of modeling and determining the natural frequencies of the vibrations of a structure from a composite material that includes elements inherent in robotic mechanisms the textile industry is considered. A method is proposed for the optimal arrangement of the basis of the composite material along the lines of maximum stresses. A methodology for approximating elements of robotic systems in the finite element method is proposed. The oscillation modes of a robotic system on the example of a multi-stage stand for semi-natural modeling determined using the finite element method are presented. The developed methods allow the study of robotic systems of homogeneous and composite materials.

Ключевые слова: композиционные материалы, метод конечных элементов, собственные частоты, роботизированные конструкции.

Keywords: composite materials, finite element method, natural frequencies, robotic systems.

Последние годы характеризуются интенсивной разработкой и применением конструкций из конструкционных материалов. Особенности технологии разработки композиционных материалов для создания материалов с заданной ориентацией свойств, высокие удельные характеристики жесткости и прочности отличают композиты в семействе конструкционных материалов [1...3].

В то же время одним из факторов, определяющих работоспособность конструкций, является прочность и устойчивость ее динамических параметров. Превышение допустимых пределов прочности и катастрофические изменения в элементах конструкции приводят, как правило, к исчерпанию несущей способности конструкции.

В последнее время также большое внимание уделяется поведению конструкций при динамических воздействиях [4...10]. Учет динамики загрузки позволяет значительно снизить вес конструкции, увеличить его технико-экономические показатели.

Стремление максимизировать преимущества композиционных материалов по сравнению с другими конструкционными материалами и металлами требует совершенствования методов исследования.

Комплексное изучение несущей способности и динамического поведения роботизированных конструкций текстильной промышленности представляет собой сложную научно-техническую задачу, требующую осуществления большого объема теоретических и экспериментальных исследований в процессе разработки и изготовления [11...13]. Поэтому исследования в этой области являются важными и актуальными. Одним из способов, определяющих решение этой проблемы, является совершенствование методов исследования путем создания алгоритмов и программ и адаптации существующих разработок, которые позволяют в рамках единого методологического подхода про-

водить детальный анализ таких конструкций из однородных и композитных материалов.

Рассмотрим процедуру моделирования роботизированной системы на примере многоступенчатого динамического стенда для полунатурного моделирования, в дальнейшем называемого стендом. Рассмотрим методику расположения основы многослойного композиционного материала и определения собственных частот колебаний стенда. Использование композиционного материала еще не использовалось при проектировании стендов. Удельная прочность композиционного материала в 1,5 раза выше, чем у материалов, используемых в настоящее время при изготовлении стендов. Основным недостатком композиционного материала является его низкая жесткость в направлении, не совпадающем с основой композита. В то же время композитный материал является многослойным; поэтому, изменяя послойное направление основы композита, можно добиться достаточной структурной жесткости.

Задача решается методом конечных элементов, наиболее распространенным численным методом, который позволяет решать широкий класс задач, в том числе конструкций из композиционных материалов [14...17].

Стенд является сложной структурой, имеющей в своей конструкции зубчатые колеса, подшипники качения, редукторы, которые неадекватно аппроксимируются конечными элементами. Поэтому зубчатые колеса были заменены системой стержней с точки зрения жесткости, равной жесткости зубчатого колеса. Аналогичная процедура была использована для моделирования подшипников и редукторов.

Тело стенда было аппроксимировано трехслойными композитными оболочками с внешними несущими слоями и наполнителем между несущими слоями [5], [12].

Наполнитель из легкого материала, такого как пенопласт, воспринимает только сдвиговые напряжения и предотвращает схождение несущих слоев. Характеристики многослойного композиционного материала определялись исходя из заданных характеристик его составных слоев. Важным в расположении слоев композиционного материала является расположение его основы. Основа композита должна располагаться вдоль путей максимальных напряжений для получения наиболее жесткой структуры композита. Чтобы идентифицировать траектории максимальных напряжений в качестве первого приближения, в данной работе на первом этапе был рассчитан стенд из однородного материала и определены траектории максимальных напряжений.

На втором этапе основание из композитного материала располагалось вдоль полученных траекторий максимальных напряжений, а стенд уже был рассчитан из композита. Поскольку композитный материал имеет слабые характеристики сдвига, местоположение основания было скорректировано в соответствии с результатами второго расчета, чтобы получить оптимальное расположение многослойной композитной структуры. Таким образом, оптимальная конструкция стенда была смоделирована из композитного материала и определены частотные характеристики стенда.

Процедура определения собственных частот колебаний стенда была следующей. Уравнение движения стенда, полученное на уравнениях Лагранжа в конечно-элементной формулировке, можно записать в следующем виде [10]:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [K]\{q\} = \{Q\}. \quad (1)$$

Здесь $[M]$ – матрица масс; $[K]$ – матрица жесткости; $\{Q\}$ – вектор внешних сил, $\{q\}$ – обобщенное перемещение; точка над буквой означает производную по времени.

Зададим решения уравнения (1) в виде

$$q = C_1 \sin(\omega t + \varphi) + C_2 \cos(\omega t + \varphi),$$

где ω, t, φ – частота, время и фазовый сдвиг, и, приравнявая вектор внешних сил

к нулю, получаем уравнение для определения собственных частот и форм колебаний конструкции:

$$([M]\{\omega^2\} + [K])\{q\} = \{0\}.$$

Определение собственных частот и форм колебаний конструкции сводится к определению собственных значений и собственных векторов матрицы $[M]^{-1}[K]$.

На рис. 1 показана аппроксимация стенда конечными элементами и первая частота колебаний стенда из композиционного материала (вид спереди и вид сверху).



Рис. 1

ВЫВОДЫ

Разработана методика моделирования и аппроксимации конструкций из многослойного композиционного материала применительно к сложным конструкциям: стендам с элементами, присущими роботизированным системам. Разработана процедура оптимального размещения основы композитного материала вдоль линий максимальных напряжений для создания максимальной структурной жесткости. Проведен расчет собственных частот колебаний модели стенда из многослойного композиционного материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джонс Р.М. Механика композиционных материалов. – Лондон: Тейлор и Фрэнсис, 2014. С. 538.

2. Reddi J.N. Механика многослойных композитных пластин и оболочек: теория и анализ. – 2-е изд. – Taylor & Francis Inc., 2003. P. 858.

3. Grover H., Singh B.N., Maiti D.K. Аналитическое и конечноэлементное моделирование многослойных композитных и трехслойных плит: Оценка новой теории деформации сдвига для свободного отклика вибрации // Int. J. Mech. Sci. – 2013. V. 67. P.89...99.

4. Тамразян А.Г., Аветилян Л.А. Экспериментальные исследования внецентренно сжатых железобетонных элементов при кратковременных динамических нагрузениях в условиях огневых воздействий // Промышленное и гражданское строительство. – 2014, № 4. С. 24...28.

5. Тамразян А.Г. Оценка риска и надежности несущих конструкций и ключевых элементов – необходимое условие безопасности зданий и сооружений // Вестник ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко "Исследования по теории сооружений". – 2009, № 1. С.160...171.

6. Тамразян А.Г., Фаликман В.Р. Основные требования к проектированию железобетонных конструкций по модельному кодексу ФИБ // Строительство и реконструкция. – 2016, № 3 (65). С. 71...77.

7. Тамразян А.Г., Манаенков И.К. К расчету плоских железобетонных перекрытий с учетом фактической жесткости сечения // Научное обозрение. – 2015, № 8. С. 87...92.

8. Тамразян А.Г., Филимонова Е.А. О влиянии снижения жесткости железобетонных плит перекрытий на несущую способность при длительном действии нагрузки // Промышленное и гражданское строительство. – 2012, № 7. С. 30...32.

9. Тамразян А.Г., Филимонова Е.А. Метод поиска резерва несущей способности железобетонных плит перекрытий // Промышленное и гражданское строительство. – 2011, № 3. С. 23...25.

10. Образцов И.Ф., Вольмир А.С., Хайрнасоев К.З. Тороидальные оболочки: запаздывающие катастрофы при динамической нагрузке // Доклады Академии наук СССР. – 1982. № 6 (266). С. 1344...1346.

11. Каманю П., Ламберт Л. Методология проектирования механически связанных соединений в слоистых композиционных материалах // Compos. Sci. Technol. – 2006, № 66. P. 3004...3020.

12. Roos R., Kress G., Ermanni P. Метод постобработки для межслойных нормальных напряжений в двукратно изогнутых композитах // J. Compos. Struct. – 2007. V. 81. P. 463...470.

13. Хайрнасоев К.З. Методология оптимизации компоновки многоступенчатых динамических стендов для полунатурного моделирования // Вестник РУДН. – 2002, № 1. С. 37...41.

14. Zienkiewicz, O.C., Taylor R.L., Чжу J.Z. Метод конечных элементов: его основа и фундамент. – Оксфорд: Butterworth-Heinemann, 2013. P. 756.

15. Moaveni, S. Теория конечно-элементного анализа и применение с ANSYS (Pearson Education). – 2015. P. 929.

16. Кутроманос И. Прикладные основы анализа конечных элементов. Линейный конечно-элементный анализ. – N-Y: John Wiley & Sons, 2018. P. 731.

17. Бате К. Дж. Конечно-элементные процедуры. – США: Прентис Холл, Пирсон образование. Inc., 2006. P. 1037.

REFERENCES

1. Dzhons R.M. Mekhanika kompozitsionnykh materialov. – London: Teylor i Frensis, 2014. S. 538.

2. Reddi J.N. Mekhanika mnogoslounykh kompozitnykh plastin i obolochek: teoriya i analiz. – 2-e izd.. – Taylor & Francis Inc., 2003. P. 858.

3. Grover N., Singkh B.N., Maiti D.K. Analiticheskoe i konechnoelementnoe modelirovanie mnogoslounykh kompozitnykh i trekhsloynnykh plit: Otsenka novoy teorii deformatsii sdviga dlya svobodnogo otklika vibratsii // Int. J. Mech. Sci. – 2013. V. 67. P.89...99.

4. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Eksperimental'nye issledovaniya vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov pri kratkovremennykh dinamicheskikh nagruzheniyakh v usloviyakh ognevyykh vozdeystviy // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2014, № 4. S. 24...28.

5. Tamrazyan A.G. Otsenka riska i nadezhnosti nesushchikh konstruksiy i klyuchevykh elementov – neobkhodimoe uslovie bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy // Vestnik TsNIISK im. V.A. Kucherenko "Issledovaniya po teorii sooruzheniy". – 2009, № 1. S.160...171.

6. Tamrazyan A.G., Falikman V.R. Osnovnye trebovaniya k proektirovaniyu zhelezobetonnykh konstruksiy po model'nomu kodeksu FIB // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. – 2016, № 3 (65). S. 71...77.

7. Tamrazyan A.G., Manaenkov I.K. K raschetu ploskikh zhelezobetonnykh perekrytiy s uchetom fakticheskoy zhestkosti secheniya // Nauchnoe obozrenie. – 2015, № 8. S. 87...92.

8. Tamrazyan A.G., Filimonova E.A. O vliyaniy snizheniya zhestkosti zhelezobetonnykh plit perekrytiy na nesushchuyu sposobnost' pri dlitel'nom deystvii nagruzki // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2012, № 7. S. 30...32.

9. Tamrazyan A.G., Filimonova E.A. Metod poiska rezerva nesushchey sposobnosti zhelezobetonnykh plit perekrytiy // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2011, № 3. S. 23...25.

10. Obratsov I.F., Vol'mir A.S., Khayrnasov K.Z. Toroidal'nye obolochki: zapazdyvayushchie katastrofy pri dinamicheskoy nagruzke // Doklady Akademii nauk SSSR. – 1982. № 6 (266). S. 1344...1346.

11. Kamanyu P., Lambert L. Metodologiya proektirovaniya mekhanicheski svyazannykh soedineniy v sloistykh kompozitsionnykh materialakh // Compos. Sci. Technol. – 2006, № 66. P. 3004...3020.

12. Roos R., Kress G., Ermanni P. Metod postobrabotki dlya mezhsloynnykh normal'nykh napryazheniy v dvukratno izognutykh kompozitakh // J. Compos. Struct. – 2007. V. 81. P. 463...470.

13. Khayrnasov K.Z. Metodologiya optimizatsii komponovki mnogostupenchatykh dinamicheskikh stendov dlya polunaturnogo modelirovaniya // Vestnik RUDN. – 2002, № 1. S. 37...41.

14. Zienkiewicz, OC, Taylor R.L., Chzhu J.Z. Metod konechnykh elementov: ego osnova i fundament. – Oksford: Butterworth-Heinemann, 2013. P. 756.

15. Moaveni, S. Teoriya konechno-elementnogo analiza i primenenie s ANSYS (Pearson Education). – 2015. P. 929.

16. Kutromanos I. Prikladnye osnovy analiza konechnykh elementov. Lineynyy konechno-elementnyy analiz. – N-Y.:John Wiley & Sons, 2018. P. 731.

17. Bate K. Dzh. Konechno-elementnye protsedury. – SShA: Prentis Khol, Pirson obrazovanie. Inc., 2006. P. 1037.

Рекомендована кафедрой железобетонных и каменных конструкций. Поступила 28.08.19.
