

Расчет трехслойных конструкций из композиционного материала

К.З. Хайрнасов

Московский государственный строительный университет

Аннотация: Целью статьи является разработка методики моделирования расчета и анализа трехслойных конструкций. Рассматриваются конструкции из многослойных композиционных материалов. Приведены соотношения, позволяющие определять характеристики многослойного материала при различной ориентации основы слоев композита. Приведен метод моделирования конструкции из трёхслойного материала: внешних несущих слоев из многослойного композиционного материала и слоя заполнителя между несущих слоев. Проведен расчет конструкции из однородного однослойного материала – магниевого сплава с целью определения траекторий максимальных напряжений конструкции при действии эксплуатационной инерционной нагрузки при вращении стенда вокруг вертикальной оси. Траектории максимальных напряжений необходимы для задания углов наклона основы слоев, многослойного композиционного материала в конструкции. Проведен расчет конструкции при различной ориентации слоев восьмислойного композиционного материала несущих слоев. Выявлена структура, при которой конструкция имеет максимальную жесткость и прочность.

Ключевые слова: характеристики материала, многослойный композиционный материал, методы моделирования, трехслойные конструкции, расчет, анализ.

Введение

Роботизированные системы получают все большее распространение во многих областях народного хозяйства: в системах работы человека и работа [1], для подземных поисково-спасательных операций [2], в управлении колебаниями конструкций [3]. Применение таких систем позволяет значительно повысить производительность, снизить процент брака по вине исполнителя и травмоопасность производства. Возрастает применение многослойных композиционных материалов. Методам моделирования и расчета конструкций из композиционного материала посвящено значительное число работ, в которых рассматриваются различные аспекты, связанные с расчетом: в самолетостроении, строительстве [4-6], в том числе, при динамических воздействиях: в стендах динамического нагружения, трехслойных конструкциях [7-9]. Важным при рассмотрении многослойных

композиционных конструкций является применение критериев разрушения многослойных материалов [10-12]. В основном, при решении задач определения несущей способности конструкций при статических и динамических нагрузках применяется метод конечных элементов [13,14]. Для получения прочных и жестких конструкций, позволяющих создавать точное позиционирование в динамических системах, наиболее подходящим является использование трехслойных конструкций, состоящих из внешних несущих слоев и слоя заполнителя, между ними представляющего собой материал с малым удельным весом - типа полистирола, выполняющего в основном восприятие сдвиговых напряжений и препятствующего сближению несущих слоев. Несущие слои, принимающие основные нагрузки, будем выполнять из многослойного композиционного материала.

Методы

В качестве метода решения применения композиционных материалов в строительных материалах и конструкциях используем метод конечных элементов. Для решения задачи используем уравнения Лагранжа:

$$\frac{\partial U}{\partial q_k} = Q_k,$$

где U - потенциальная энергия деформации системы; Q_k – вектор внешних сил; q – обобщенные перемещения, k – число степеней свободы системы.

Рассмотрим процедуру определения приведенных характеристик многослойного композиционного материала.

Соотношения между напряжениями и деформациями для плосконапряженного состояния запишем в виде:

$$\{\sigma\} = [E] \{\varepsilon\}, \quad (1)$$

где

$$[E] = \begin{Bmatrix} Q_1 & Q_2 & 0 \\ Q_2 & Q_2 & 0 \\ 0 & 0 & Q_6 \end{Bmatrix},$$



Поворот осей координат на угол θ приводит матрицу упругих коэффициентов к виду:

$$[\bar{E}] = \begin{Bmatrix} \bar{Q}_1 & \bar{Q}_2 & \bar{Q}_6 \\ \bar{Q}_2 & \bar{Q}_2 & \bar{Q}_6 \\ \bar{Q}_6 & \bar{Q}_6 & \bar{Q}_6 \end{Bmatrix},$$

здесь:

$$\begin{aligned} \bar{Q}_1 &= c^4 Q_1 - s^4 Q_2 + 2(Q_2 + 2Q_6) s^2 c^2, \\ \bar{Q}_2 &= (Q_1 + Q_2 - 4Q_6) s^2 c^2 + (s^2 + c^2) Q_2, \\ \bar{Q}_6 &= (c^2 Q_1 - s^2 Q_2 + (Q_2 + 2Q_6)(s^2 - c^2)) sc, \\ \bar{Q}_2 &= s^4 Q_1 - c^4 Q_2 + 2(Q_2 + 2Q_6) s^2 c^2, \\ \bar{Q}_6 &= (s^2 Q_1 - c^2 Q_2 - (Q_2 + 2Q_6)(s^2 - c^2)) sc, \\ \bar{Q}_6 &= (Q_1 - 2Q_2 + Q_2) s^2 c^2 + (s^2 - c^2) Q_6, \\ s &= \sin \theta, c = \cos \theta \end{aligned}$$

Деформация слоя расположенного на расстоянии z от срединной поверхности представляется в виде:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^o\} + z \{\chi^o\}$$

где $\{\varepsilon^o\}$, деформация срединной поверхности, $\{\chi^o\}$, изменение кривизны срединной поверхности:

$$\{\varepsilon\} = [E] \{\varepsilon\} + [E] \{\varepsilon\}$$

После подстановке этих соотношений в уравнение (1) получим, учитывая, что:



где N – мембранные силы, M – изгибающие моменты.

Соотношения между усилиями и деформацией срединной поверхности многослойного композиционного материала:

$$\begin{pmatrix} N \\ M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ B & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon \\ \chi \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A & B & D \end{pmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{ij}(z) z^j dz \quad (i,j=1,2,3)$$

$$\begin{pmatrix} A & B & D \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^n \begin{pmatrix} A_k & B_k \\ B_k & D_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon \\ \chi \end{pmatrix}$$

(2)

Обозначения, приведенные в формуле (2) даны на рис. 1.

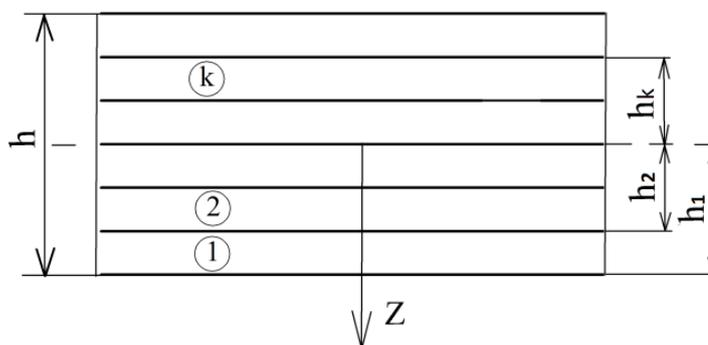


Рис. 1. - Многослойная структура материала

Рассмотрим конструкцию стенда полунатурного моделирования из трехслойного композиционного материала несущих слоев (рис. 2) и опишем алгоритм определения напряженно деформированного состояния такой конструкции при динамическом нагружении: инерционной нагрузкой вращения вокруг вертикальной оси.

Создание прочных и жестких конструкций – одно из основных требований, предъявляемых динамическим конструкциям, поскольку жесткость конструкции влияет на точность позиционирования – одной из основных характеристик динамических конструкций. Трехслойные конструкции являются наиболее прочными и легкими конструкциями, благодаря разнесенности прочных несущих слоев, увеличивающих момент сопротивления и тем самым увеличивающих изгибающую нагрузку по сравнению с конструкциями из однослойного материала. В настоящей работе используются трехслойные конструкции, состоящие из внешних несущих слоев и заполнителя между ними, состоящего из легкого материала (пенопласта, пробки, пеноплекса) главным образом воспринимающего сдвиговые напряжения и препятствующего сближению несущих слоев. Несущие слои выполняются из прочных материалов, одним из которых является композиционный материал, обладающий высокой удельной прочностью. Рассмотрим метод создания трехслойных конструкций. Алгоритм создания трехслойной конструкции робототехнической системы: стенда с несущими слоями из многослойного несущего слоя из композиционного материала и заполнителя между ними с применением инструментария программ состоит в следующем:

- Создание в системе автоматизированного проектирования методами модуля CAD модели роботизированной системы на примере многостепенного динамического стенда полунатурного моделирования (рис. 2);
- Задание материалу модели характеристик, например, магниевого сплава.
- Задание граничных условий.
- Задание действующих нагрузок.
- Расчет и анализ полученных результатов.

- Определение траекторий максимальных напряжений.
- Присвоение модели характеристик заполнителя.
- Создание на поверхности модели поверхностей.
- Присвоение поверхностям характеристик многослойного композиционного материала.
- Проведение расчета и анализ получаемых результатов.
- Послойное определение характеристик многослойного композиционного материала, при которых получаются наиболее прочные и жесткие параметры: основываясь на теориях разрушения многослойных материалов утверждающих, что разрушение одного слоя ведет к разрушению многослойного материала в целом. То есть выбирая структуру ориентации основы слоев композиционного материала при которых напряжения минимальны.
- Проведение расчета и анализ конструкции при найденной структуре многослойного композиционного материала.

Результаты

Проведен расчет конструкции из трехслойного композиционного материала при различной ориентации слоев (рис.2). Результаты расчетов приведены в таблице №1.

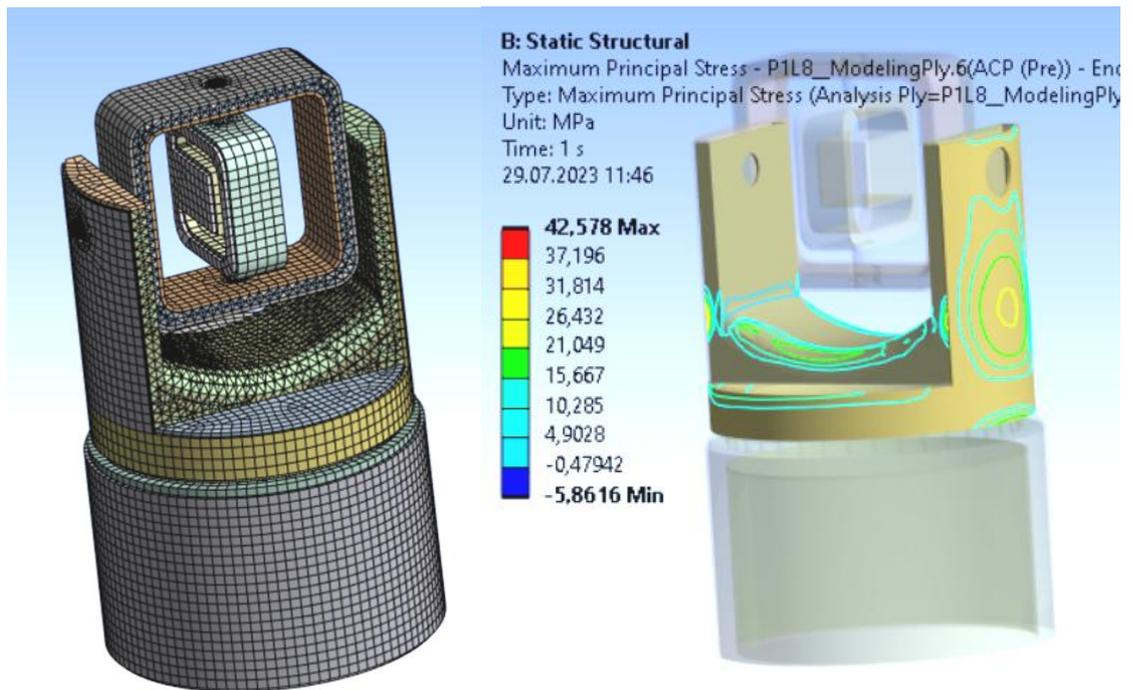


Рис. 2. - а) Модель и конечно-элементная аппроксимация станда., б – траектории максимальных напряжений в стенде при эксплуатационных динамических нагрузках

В настоящем исследовании рассматривались несущие слои, состоящие из восьми композиционных слоев.

Для получения наиболее жесткой и прочной ориентации основы слоев композиционного материала, проведено исследование напряженно-деформированного состояния станда, с различной ориентацией слоев, приведенное в таблице №1.

Таблица № 1

Напряженное состояние несущих слоев восьмислойного композиционного материала трехслойной конструкции станда

Ориентация слоев, градусы	Слой							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0/0/0/90/90/90/0/0	60,04	50,09	40,33	117,8	106,8	96,91	20,24	20,50

0/0/90/90/90/0/0/0	68,54	57,77	116,6	106,5	97,54	22,22	20,84	19,45
45/0/-45/0/0/-45/0/45	108,2	57,21	96,89	45,40	41,07	59,90	32,91	79,40
45/-45/90/45/0/-45/-45/45	69,05	82,86	130,5	43,73	87,99	38,98	51,75	65,67
0/0/0/45/-45/0/0/0	57,91	47,37	37,15	100,5	99,54	31,64	34,43	77,41
45/-45/3/45/-45/-3/-45/45	86,97	98,38	82,98	58,91	50,78	69,40	55,96	68,62
45/-45/5/45/-45/-5/-45/45	86,89	98,54	82,24	58,64	50,79	68,96	55,56	68,79
45/-45/10/-45/45/10/-45/45	86,27	98,82	79,39	57,58	50,45	67,17	54,73	68,02
0/15/30/-45/90/45/-30/0	64,02	43,07	51,63	78,34	155,9	73,85	45,62	42,58
45/-45/10/-45/45/-10/-45/45	91,25	90,84	78,75	58,49	40,98	66,02	58,00	64,30

Примечание: Здесь в первом столбце обозначена ориентация основы слоев в градусах, относительно траектории максимальных напряжений, косая черта - переход к следующему слою

В результате расчетов выявлена структура композиционного материала, при которой слои имеют наименьшие значения напряжений и деформаций и, следовательно, конструкция, имеющая такую структуру композиционного материала, является наиболее прочной и жесткой, поскольку критерии разрушения многослойных материалов основаны на том, что разрушение одного слоя происходит разрушения многослойного материала в целом. Кроме того, жесткость конструкции является одной из составляющих композиционного материала, влияющих на точность позиционирования, это одна из главных характеристик работоспособности конструкции. Чем выше жесткость, тем лучше позиционирование.

Выводы

Проведено моделирование трехслойного многостепенного стенда полунатурного моделирования, предназначенного для имитации полетных характеристик летательных аппаратов в лабораторных условиях. Исследование аппаратуры в лабораторных условиях на динамических стендах позволяет значительно снизить расходы на испытания аппаратуры. Проведен расчет и анализ стендов при динамической нагрузке при различной

ориентации основы слоев восьмислойного композиционного материала несущих слоев. Выявлена структура, при которой многослойный композиционный материал имеет максимальную жесткость и прочность, основываясь на критериях разрушения многослойных материалов, утверждающих, что разрушения одного слоя многослойного материала приводит к разрушению многослойного материала в целом. Структура восьмислойного композиционного материала, при которой материал стэнда имеет максимальную жесткость и прочность, имеет вид 45/-45/10/-45/45/10/-45/45, поскольку при таком расположении слоев напряжения в слоях минимальны (см. таблицу №1). Ориентация слоев откладывалась от траекторий максимальных напряжений, полученных при расчете стэнда из однородного материала – магниевое сплава. В результате проведенных расчетов разработана модель конструкция трехслойного многостепенного стэнда полунатурного моделирования максимальной жесткости и прочности. Получено напряженно-деформированное состояние стэнда при эксплуатационных нагрузках. Проведен расчет несущей способности стэнда по теориям разрушения многослойного трехслойного композиционного материала. Достоверность полученных результатов основывается на сходимости результатов при сгущении сетки конечных элементов, применением апробированных систем автоматизированного проектирования, проверенных на множестве тестовых примерах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ по научному проекту No22-29-20299 (получатель К.З. Хайрмасов)

Литература

1. Boschetti G., Faccio M., Minto R. 3D collision avoidance strategy and performance evaluation for human–robot collaborative systems // Computers &

- Industrial Engineering. 2023. Vol. 179: 109225. DOI: 10.1016/j.cie.2023.109225.
2. Lindqvist B., Karlsson S., Koval A., Tevetzidis I., Haluška J., Kanellakis C., A.-a. Agha-mohammadi, Nikolakopoulos G. Integrated combined legged-aerial mobility for subterranean search-and-rescue // Robotics and Autonomous Systems. 2022. Vol. 154: 104134. DOI: 10.1016/j.robot.2022.104134.
 3. Бобылева Т.Н., Шамаев А.С. О задаче управления колебаниями плоской мембраны, распределенными силовыми воздействиями // Инженерный вестник Дона, 2023, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8125
 4. Vasiliev V.V., Morozov E. V. Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures. - 4th Edition. Elsevier, - 2018, 882 p.
 5. Бохоева Л. А., Балданов А. Б., Чермошенцева А. С. Разработка оптимальной конструкции многослойной консоли крыла беспилотного летательного аппарата с экспериментальным подтверждением // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 1. С. 65-75. DOI: 10.34759/vst-2020-1-65-75.
 6. Георгиев С.В., Меретуков З.А., Соловьёва А.И. К определению прочности бетона, обжатого композитными материалами, расположенными в поперечном направлении // Инженерный вестник Дона. 2021. № 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7225
 7. Латышев О.Г., Веремейчик А.Б., Жуков Е.А. Применение композиционных материалов в стендах динамического нагружения // М.: Издательство МГТУ им. Н.Е. Баумана. 2011. – 233 с.
 8. Kim H.-G., Wiebe R. Numerical investigation of stress states in buckled laminated composite plates under dynamic loading // Composite Structures. 2020. Vol. 235: 111743. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111743.
-

9. Lin J.-P., Liu X., Wang Y. et al. Static and dynamic analysis of three-layered partial-interaction composite structures //Engineering Structures. 2022. Vol. 252: 1 13581. DOI: 10. 1016/j. engstruct.2021.113581.
10. Zhang B., Ge J., Cheng F., Huang J., Liu S., Liang J. Failure prediction for fiber reinforced polymer composites based on virtual experimental tests // Journal of Materials Research and Technology. 2023. Vol. 24, pp. 8924-8939. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.05.123.
11. Gu J., Chen P., Su L., Li K. A theoretical and experimental assessment of 3D macroscopic failure criteria for predicting pure inter-fiber fracture of transversely isotropic UD composites//Composite Structures. 2021. Vol. 259, No. 20-21: 113466. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113466.
12. Sun Q., Zhou G., Meng Z., Guo H., Chen., Liu H., Kang, Keten S., Su X. Failure criteria of unidirectional carbon fiber reinforced polymer composites informed by a computational micromechanics model//Composites Science and Technology. 2019. Vol. 172, No. 3-4, pp. 81125. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.01, 012.
13. Zienkiewicz O.C., Taylor .R.L., Zhu JL. The finite element method: its basis and fundamentals. 7th ed. Butter worth Heinemann, Oxford, 2013 - 756 p.
14. Bathe K.-J. Finite element procedures. 2nd ed. Prentice Halt, New Jersey, 2014. - 1043 p.

References

1. Boschetti G., Faccio M., Minto R. Computers & Industrial Engineering. 2023. Vol. 179: 109225. DOI: 10.1016/j.cie.2023.109225.
 2. Lindqvist B., Karlsson S., Koval A., Tevetzidis I., Haluška J., Kanellakis C., A.-a. Agha-mohammadi, Nikolakopoulos G. Robotics and Autonomous Systems. 2022. Vol. 154: 104134. DOI: 10.1016/j.robot.2022.104134.
-



3. Bobyleva T.N., Shamayev A.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8125
 4. Vasiliev V.V., Morozov E. V. Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures. - 4th Edition. Elsevier, 2018, 882 p.
 5. Bokhoyeva L. A., Baldanov A. B., Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta. 2020. T. 27. № 1. pp. 65-75. DOI: 10.34759/vst-2020-1-65-75.
 6. Georgiyev S.V., Meretukov Z.A., Solov'yova A.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021. № 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7225
 7. Latyshev O.G., Veremeychik A.B., Zhukov Ye.A. Primeneniye kompozitsionnykh materialov v stendakh dinamicheskogo nagruzheniya [Application of composite materials in dynamic loading stands] M.: Izdatel'stvo MGTU im. N.Ye. Baumana. 2011. 233 p.
 8. Kim H.-G., Wiebe R. Composite Structures. 2020. Vol. 235: 111743. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111743.
 9. Lin J.-P., Liu X., Wang Y. et al. Engineering Structures. 2022. Vol. 252: 113581. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113581.
 10. Zhang B., Ge J., Cheng F., Huang J., Liu S., Liang J. Journal of Materials Research and Technology. 2023. Vol. 24, pp. 8924-8939. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.05.123.
 11. Gu J., Chen P., Su L., Li K. Composite Structures. 2021. Vol. 259, № 20-21: 113466. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113466.
 12. Sun Q., Zhou G., Meng Z., Guo H., Chen., Liu H., Kang, Keten S., Su X. Composites Science and Technology. 2019. Vol. 172, № 3-4, pp. 81125. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.01, 012.
 13. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.L. The finite element method: its basis and fundamentals. 7th ed. Butter worth Heinemann, Oxford, 2013. 756 p.
-



14. Bathe K.-J. Finite element procedures. 2nd ed. Prentice Hall, New Jersey, 2014.
1043 p.

Дата поступления: 2.04.2024

Дата публикации: 12.05.2024