

УДК 629.7.023

А.В. Кондратьев, канд. техн. наук,
В.В. Кириченко, канд. техн. наук,
М.Е. Харченко

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФОРМОРАЗМЕРОСТАБИЛЬНЫХ СТРУКТУР ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

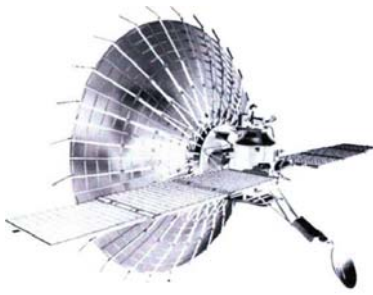
Одним из основных требований к специальному классу конструкций орбитальных космических летательных аппаратов (ЛА), определяющих их работоспособность и эксплуатационную эффективность, является сохранение заданных размеров (форморазмеростабильность) при изменении температуры окружающей среды и других факторов космического пространства [1]. К таким конструкциям относятся крупногабаритные космические антенны, платформы и другие несущие конструкции для размещения высокоточной аппаратуры, корпуса спутниковых телескопов и фотоаппаратов [1 – 3]. Основные силовые воздействия на конструкции данного класса имеют место в процессе вывода их на орбиту. В связи с этим их предварительное проектирование при ограничениях по прочности, жесткости и другим свойствам материала, как правило, проводится в соответствии с критерием минимальной массы после решения задачи их максимальной форморазмеростабильности.

Опыт создания конструкций данного класса [1, 4 – 6] показывает, что в наибольшей степени удовлетворение всем эксплуатационным требованиям к ним реализуется применением полимерных композиционных материалов (ПКМ), среди которых их наибольшая форморазмеростабильность обеспечивается углепластиковыми и конструктивными элементами на их основе – углесотопластами [4, 5]. Размеростабильность композитных структур в пределах эксплуатационного интервала изменения температур связана с такими структурными параметрами ПКМ, которые обеспечивают близость к нулю тех или иных компонент деформаций. Эта задача сводится к задаче управления коэффициентами линейного термического расширения (КЛТР) [7 – 9].

В соответствии с таким подходом задачи проектирования размеростабильных конструкций ЛА из ПКМ включают в себя три основных типа [8, 9]:

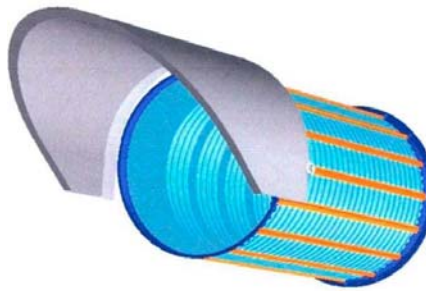
- одноосные задачи размеростабильности;
- двухосные задачи размеростабильности;
- особые концепции размеростабильности.

В первом случае для обеспечения необходимых эксплуатационных характеристик конструкции достаточно добиться отсутствия термических деформаций в одном заданном направлении. Примерами таких конструкций являются размеростабильные стержни (рис. 1, а и б) [10, 11], тубус объектива оптического модуля (рис. 2) [12] и другие изделия.



а

Рисунок 1 – Размеростабильные стержни космического радиотелескопа



б

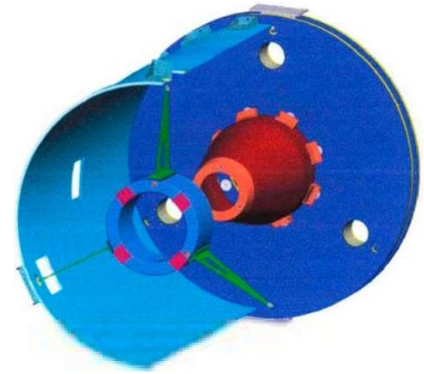


Рисунок 2 – Тубус объектива оптического модуля

Во втором случае необходимо стремиться к полному отсутствию термических деформаций в плоскости многослойного материала. Таковы спутниковые платформы для размещения приборов и аппаратуры; одним из примеров является плита, из которой вырезается показанная на рис. 3 рама [11].

Наконец, особые концепции находят применение при проектировании конструкций, в которых важно не управление свойствами материала во всем объеме конструкции, а обеспечение согласованного деформирования двух или нескольких заданных точек. В качестве примеров таких конструкций можно указать трехслойную платформу, входящую в состав объектива оптического модуля (рис. 2) и раму детектора переходного излучения (рис. 4) [11].

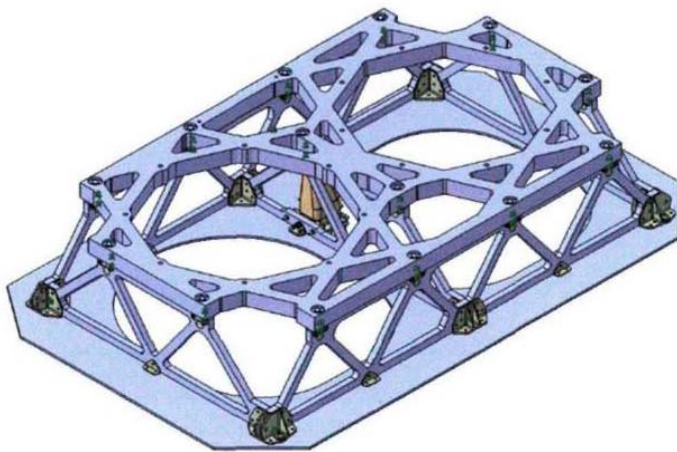


Рисунок 3 – Рама спутниковой платформы



Рисунок 4 – Рама детектора переходного излучения (проект ATLAS)

Ниже рассматривается задача поиска такой структуры пакета ПКМ толщиной Δ , которая обеспечивает минимальный приведенный КЛТР $\alpha_{прив}$.

Предполагаются уже известными физико-механические характеристики однонаправленного монослоя: модули упругости вдоль и поперек армирующих волокон E_1 и E_2 , модуль сдвига G_{12} , коэффициент Пуассона μ_{12} и КЛТР α_1, α_2 .

В общем случае каждый монослой имеет толщину δ_i , угол армирования волокон относительно их ориентации ϕ_i . Пакет состоит из j числа групп монослоев различной ориентации. Каждая группа содержит определенное число монослоев n_j и имеет относительную толщину $n_j\delta_i/\Delta$.

Схема алгоритма определения оптимальной структуры пакета, обеспечивающей минимальные КЛТР α_x и α_y в системе координат XOY , показана на рис. 5. Алгоритм реализует итерационный процесс.

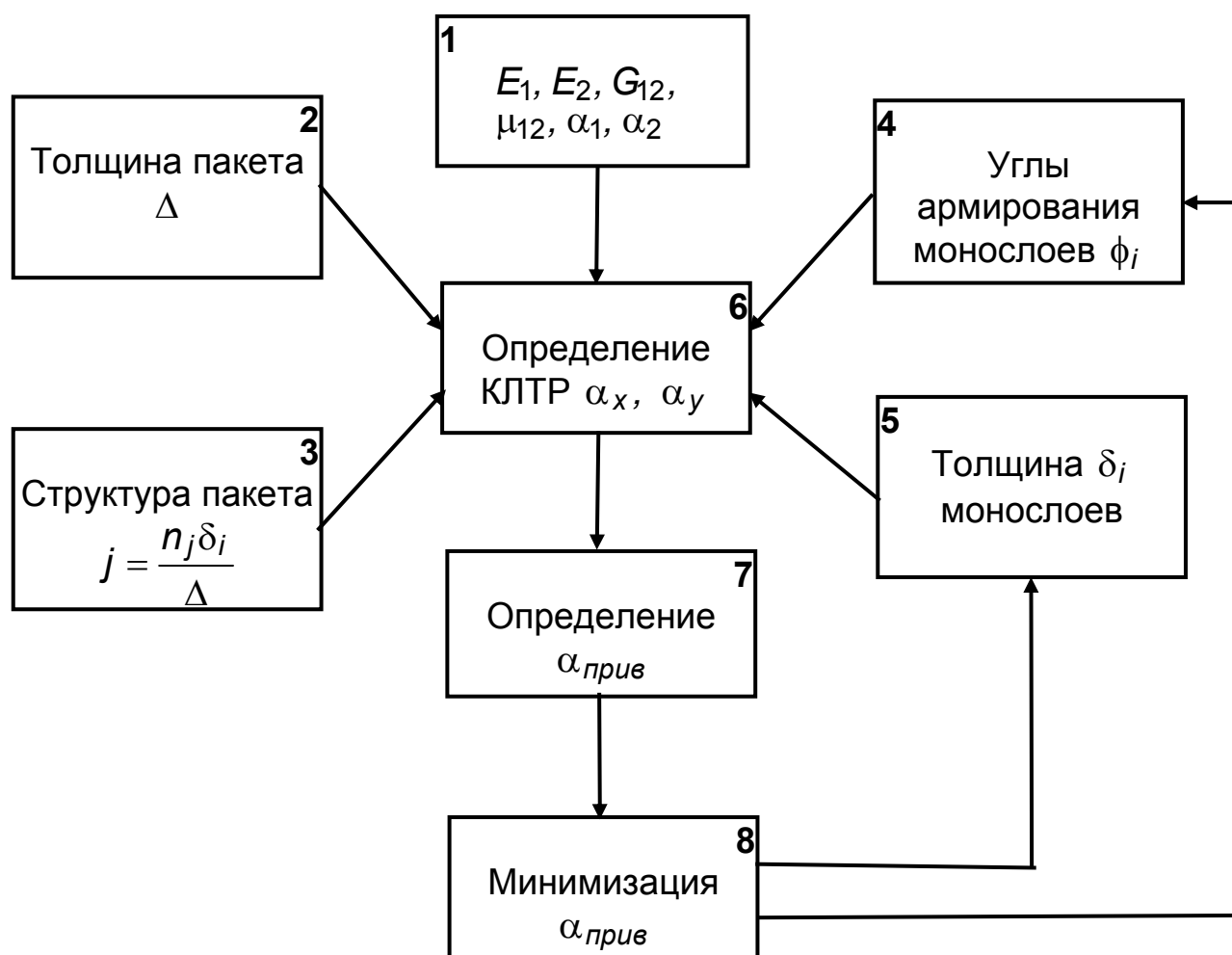


Рисунок 5 – Схема алгоритма определения структуры пакета ПКМ, обеспечивающего максимальную форморазмеростабильность

Значения α_x и α_y определялись в соответствии с известными зависимостями механики ортотропных ПКМ [13]:

$$\alpha_x = \frac{A_{T1}B_{22} - A_{T2}B_{12}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2}; \quad \alpha_y = \frac{A_{T2}B_{11} - A_{T1}B_{12}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2}; \quad (1)$$

$$E_x = \frac{1}{\delta_\Sigma} \left(B_{11} - \frac{B_{12}^2}{B_{22}} \right); \quad E_y = \frac{1}{\delta_\Sigma} \left(B_{22} - \frac{B_{12}^2}{B_{11}} \right); \quad G_{xy} = \frac{B_{33}}{\delta_\Sigma}; \quad \mu_{xy} = \frac{B_{12}}{B_{22}}; \quad \mu_{yx} = \frac{B_{12}}{B_{11}}; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} A_{T1} &= \sum_{i=1}^n \delta_i \left[\alpha_{1i} \bar{E}_{1i} \left(\cos^2 \phi_i + \mu_{21i} \sin^2 \phi_i \right) + \alpha_{2i} \bar{E}_{2i} \left(\sin^2 \phi_i + \mu_{12i} \cos^2 \phi_i \right) \right]; \\ A_{T2} &= \sum_{i=1}^n \delta_i \left[\alpha_{1i} \bar{E}_{1i} \left(\sin^2 \phi_i + \mu_{21i} \cos^2 \phi_i \right) + \alpha_{2i} \bar{E}_{2i} \left(\cos^2 \phi_i + \mu_{12i} \sin^2 \phi_i \right) \right]; \\ B_{11} &= \sum_{i=1}^n \delta_i \left(\bar{E}_{1i} \cos^4 \phi_i + 2\bar{E}_{1i}\mu_{21i} \sin^2 \phi_i \cos^2 \phi_i + \bar{E}_{2i} \sin^4 \phi_i + G_{12i} \sin^2 2\phi_i \right); \quad (3) \\ B_{12} &= \sum_{i=1}^n \delta_i \left[\left(\bar{E}_{1i} + \bar{E}_{2i} \right) \sin^2 \phi_i \cos^2 \phi_i + 2\bar{E}_{1i}\mu_{21i} \left(\sin^4 \phi_i + \cos^4 \phi_i \right) - \right. \\ &\quad \left. - G_{12i} \sin^2 2\phi_i \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{22} &= \sum_{i=1}^n \delta_i \left(\bar{E}_{1i} \sin^4 \phi_i + 2\bar{E}_{1i}\mu_{21i} \sin^2 \phi_i \cos^2 \phi_i + \bar{E}_{2i} \cos^4 \phi_i + G_{12i} \sin^2 2\phi_i \right); \quad (4) \\ B_{33} &= \sum_{i=1}^n \delta_i \left[\left(\bar{E}_{1i} + \bar{E}_{2i} - 2\bar{E}_{1i}\mu_{21i} \right) \sin^2 \phi_i \cos^2 \phi_i + G_{12i} \cos^2 2\phi_i \right]; \end{aligned}$$

$$\bar{E}_{1i} = \frac{E_{1i}}{1 - \mu_{12i}\mu_{21i}}; \quad \bar{E}_{2i} = \frac{E_{2i}}{1 - \mu_{12i}\mu_{21i}}. \quad (5)$$

Исходными данными для определения α_x и α_y блока 6 на каждой итерации является информация, содержащаяся в блоках 1 – 3.

Определение приведенного КЛТР $\alpha_{прив}$ на каждой итерации требует обоснования. Исходным постулатом этого обоснования является само определение форморазмеростабильности структуры, имеющей нулевые значения α_x и α_y , или вследствие невозможности обеспечения этого требования в рамках существующих классов ПКМ стремление получить их минимальное значение. Однако противоречивость такого критерия сопряжена с двумя важными условиями.

Первое заключается в том, что конкретная форморазмеростабильная конструкция может иметь различную степень приоритетности (важности) по условиям ее эксплуатации с данной структурой, обладающей отклонениями $|\alpha_x|$ и $|\alpha_y|$ от нулевого значения. Тогда представляется правомерным критерий выбора $\alpha_{прив}$ записать в виде двух целевых функций:

$$\alpha_{прив1} = (|\alpha_x|\psi + |\alpha_y|\xi) \rightarrow \min; \quad (6)$$

$$\alpha_{прив2} = \sqrt{(|\alpha_x|\psi)^2 + (|\alpha_y|\xi)^2} \rightarrow \min, \quad (7)$$

где ψ , ξ - коэффициенты приоритетности, определяемые условиями эксплуатации конструкции:

$$(\psi + \xi) = 1. \quad (8)$$

Очевидно, что функция (6) соответствует требованию минимального среднего изменения формы конструкции в ее плоскости, определяемого значениями α_x и α_y , а функция (7) – требованию минимального среднеквадратичного (диагонального) искажения ее формы.

Второе условие заключается в том, что заведомо установить предпочтительность (6) или (7) представляется затруднительным.

В блоке 7 алгоритма проводится определение $\alpha_{прив}$ по критерию (6) или (7) i -й итерации с последующей минимизацией их значений путем варьирования параметров ϕ_i и δ_i в блоках 4 и 5. Остановка процесса осуществляется по общепринятым правилам выбора отклонений двух последних итераций.

Отметим, что Δ предопределяет значения ФМХ и прочностных характеристик E_x , E_y , G_{xy} , μ_{xy} , σ_{ex} , σ_{ey} , τ_{exy} пакета. Это позволяет при заданном спектре внешних нагрузок определить несущую способность структуры конструкции по выбранному критерию, например Мизеса – Хилла [13].

Неудовлетворение заданной толщины Δ потребной несущей способности структуры приведет к ее изменению с пересчетом ФМХ и прочностных характеристик и соответствующему изменению несущей способности по выбранному критерию.

В качестве примера был проведен расчет по приведенному алгоритму для симметричного пакета из однонаправленного углепластика с характеристиками: $E_1 = 150$ ГПа; $E_2 = 8$ ГПа; $G_{12} = 4$ ГПа; $\mu_{12} = 0,3$; $\alpha_1 = -2 \cdot 10^{-6}$ 1/град; $\alpha_2 = 2 \cdot 10^{-5}$ 1/град. Результаты расчета пакета с суммарной толщиной $\Delta = 9$ мм при толщине монослоя $\delta_i = 0,1$ мм при минимальной технологической толщине реализации группы слоя различной ориентации $\eta_{min} = 0,9$ мм для приведенного среднего арифметического КЛТР в виде (6) представлены в табл. 1, а для приведенного КЛТР в виде (7) – в табл. 2.

В целевых функциях $\alpha_{прив1}$ и $\alpha_{прив2}$ в обоих случаях принимались коэффициенты приоритетности ψ и ξ , равные 0,5.

Таблица 1 – Результаты оптимизации структуры ПКМ
по критерию $\alpha_{прив1}$

| Ориентация группы слоев ϕ_j в структуре пакета | Исходная толщина группы слоев δ_j , мм, и их относительная толщина | Рациональная толщина группы слоев δ_j , мм, и их относительная толщина |
|---|---|---|
| 0 | 1,5 (0,167) | 0,9 (0,1) |
| ± 45 | 6 (0,666) | 7,2 (0,8) |
| 90 | 1,5 (0,167) | 0,9 (0,1) |
| α_x | $-1,4 \cdot 10^{-6}$ 1/град | $-1,24 \cdot 10^{-6}$ 1/град |
| α_y | $0,803 \cdot 10^{-6}$ 1/град | $0,641 \cdot 10^{-6}$ 1/град |
| $\alpha_{прив1}$ | $1,140 \cdot 10^{-6}$ 1/град | $0,984 \cdot 10^{-6}$ 1/град |

Таблица 2 – Результаты оптимизации структуры ПКМ
по критерию $\alpha_{прив2}$

| Ориентация группы слоев ϕ_j в структуре пакета | Исходная толщина группы слоев δ_j , мм, и их относительная толщина | Рациональная толщина группы слоев δ_j , мм, и их относительная толщина |
|---|---|---|
| 0 | 1,5 (0,167) | 0,9 (0,1) |
| ± 45 | 6 (0,666) | 7,2 (0,8) |
| 90 | 1,5 (0,167) | 0,9 (0,1) |
| α_x | $-1,4 \cdot 10^{-6}$ 1/град | $-1,24 \cdot 10^{-6}$ 1/град |
| α_y | $0,803 \cdot 10^{-6}$ 1/град | $0,641 \cdot 10^{-6}$ 1/град |
| $\alpha_{прив1}$ | $1,10 \cdot 10^{-6}$ 1/град | $0,938 \cdot 10^{-6}$ 1/град |

Выводы

1. Предложен алгоритм поиска двухосных форморазмеростабильных структур из полимерных композиционных материалов для конструкций космического назначения и приближенные критерии, определяющие максимальный уровень их форморазмеростабильности, основанные на минимизации приведенных коэффициентов линейного термического расширения структуры в форме средних значений суммы модулей этих параметров в плоскости структуры и их квадратичного отклонения.

2. Реализация алгоритма позволяет достаточно эффективно осуществлять поиск форморазмеростабильных структур из ПКМ на предварительных этапах проектирования конструкций космического назначения, эксплуатируемых на околоземных орбитах в приборах для ведения прецизионных измерений.

3. Приведенные примеры проектирования оптимальной структуры ПКМ по критериям $\alpha_{прив1}$ и $\alpha_{прив2}$ показали, что оба критерия приводят как к одинаковым рациональным толщинам групп слоев, так и к близким значениям $\alpha_{прив1}$ и $\alpha_{прив2}$, отличающимся на величину, не превышающую точность проведенных вычислений, что свидетельствует о практической равнозначности этих критериев.

4. В случаях, если критерии $\alpha_{прив1}$ и $\alpha_{прив2}$ приводят к существенно различным результатам, вопрос о предпочтении одного из них представляется оправданным ставить в плоскости максимизации несущей способности структуры по принятому критерию прочности.

Список использованных источников

1. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов [Текст] / Г.А. Молодцов, В.Е. Биткин, В.Ф. Симонов и др. – М.: Машиностроение, 2000. – 357 с.

2. Халиманович, В.И. Сотовые конструкции для космических аппаратов связи и навигации: опыт проектирования и изготовления [Текст] / В.И. Халиманович, Ф.К. Синьковский, Н.Н. Ишенина // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов III междунар. науч-практ. конф., Днепропетровск 27 – 29 мая 2009 г. Укр. НИИ технологии машиностроения. – Днепропетровск, 2009. – С. 161 – 171.

3. Конструктивно-технологические решения создания корпусных элементов из композиционных материалов блока оптико-электронного модуля автоматического космического аппарата [Текст] / И.Л. Аккуратов, А.И. Алямовский, Д.Я. Давыдов и др. // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов V междунар. науч-практ. конф. – Днепропетровск 5 – 7 июня 2013 г. Укр. НИИ технологии машиностроения. – Днепропетровск, 2013. – С. 28 – 33.

4. Гайдачук, В.Е. Предпосылки создания формостабильных композитных конструкций для эксплуатации в космосе [Текст] / В.Е. Гайдачук, М.Е. Харченко // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов V междунар. науч-практ. конф. – Днепропетровск 5 – 7 июня 2013 г. Укр. НИИ технологии машиностроения. – Днепропетровск, 2013. – С. 64 – 70.

5. Харченко, М.Е. Обзор и анализ состояния разработки формостабильных композитных конструкций космического назначения [Текст] / М.Е. Харченко // Системні технології. Регіональний міжвуз. зб. наук. праць. – Вип. 4(87). – Дніпропетровськ, 2013. – С. 180 – 186.

6. Перспективы создания размеростабильных прецизионных конструкций космического назначения [Текст] / В.А. Коваленко, А.М. Потапов, Л.М. Потапович и др. // Перспективы космических исследований

Украины: сб. статей. – К.: Академперіодика, 2011. – С. 202 – 205.

7. Зиновьев, П.А. Термостабильные структуры многослойных композитов [Текст] / П.А. Зиновьев // Механика конструкций из композиционных материалов: сб. науч. статей под ред. В.Д. Протасова. – М.: Машиностроение, 1992. – С. 193 – 207.

8. Зиновьев, П.А. Предельные возможности многослойных композитных структур [Текст] / П.А. Зиновьев, А.А. Смердов // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1994. – № 1. – С. 7 – 17.

9. Зиновьев, П.А. Предельные возможности композитных структур [Текст] / П.А. Зиновьев, А.А. Смердов // Вестник МВТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. – 2005. – Спец. выпуск. – С. 106 – 128.

10. Повышение размерной стабильности корпуса космического телескопа [Текст] / П.А. Зиновьев, К.П. Баслик // Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы: тр. 2-й междунар. конф. – В 4 ч. – М., 2005. – Ч. 2. – С. 58.

11. Dimensionally Stable Carbon Fiber Reinforced Plastic Tubes for Space Constructions. Theory and Production [Текст] / A. Romashin, O. Komissar, A. Smerdov et al. // Progress Through Innovation and Cost Effectiveness. Proc. Of the 19th Intern. SAMPE Europe Conference. – Paris, 1988. – P. 529 – 539.

12. Проектирование многослойных размеростабильных конструкций объектива оптического модуля из композиционных материалов [Текст] / А.А. Смердов, К.П. Баслык, О.Н. Комиссар и др. // Новые перспективные материалы и технологии их получения: сб. науч. тр. междунар. конф. – Волгоград, 2004. – Т. 2. – С. 210 – 212.

13. Гайдачук, В.Е. Механика волокнистых композиционных материалов [Текст] / В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов, М.Ю. Русин. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1991. – 98 с.

Поступила в редакцию 13.01.2014.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Е. Гайдачук,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*