

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
ПРИ ПРОСТЫХ НАПРЯЖЕННЫХ СОСТОЯНИЯХ,
НА ОСНОВЕ ПОНЯТИЯ ЖЕСТКОСТИ***

**DETERMINATION OF COMPOSITE MATERIAL EFFECTIVE
ELASTIC PROPERTIES IN SIMPLE STRESS STATES, BASED
ON THE CONCEPT OF STIFFNESS**

Д.А. ПИРОГОВ, Л.Б. МАСЛОВ, П.В. КОРОЛЕВ, К.В. КЛОПОВА

D.A. PIROGOV, L.B. MASLOV, P.V. KOROLEV, K.V. KLOPOVA

**(Ивановский государственный политехнический университет,
Ивановский государственный энергетический университет,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)**

**(Ivanovo State Polytechnical University,
Ivanovo State Power University,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University)**

E-mail: pirogov81@mail.ru

Изложен метод расчета эффективных упругих модулей композиционных материалов, используя понятие механической жесткости. Рассмотрена геометрическая модель композиционного материала на основе объемной тканой структуры с учетом геометрических характеристик нитей утка и нитей основы, и приведен пример определения модуля Юнга в одном из направлений ячейки периодичности композиционного материала. Определены численные значения модулей упругости на растяжение-сжатие и сдвиг на различных гранях ячейки периодичности. При решении поставленной задачи использовались методы прикладной механики и механики композитов.

A method for calculation of composite materials effective elastic moduli is presented, using the concept of mechanical stiffness. A geometrical model of composite material based on bulk woven structure with consideration for geometrical characteristics of weft and warp yarns is considered and an example of determining the Young modulus in one of the cell directions of composite material periodicity is given. Numerical values of tensile-compression and shear moduli on different faces of the periodicity cell are determined. The methods of applied mechanics and composite mechanics were used to solve the problem.

Ключевые слова: композиционный материал, объемная тканая структура, ячейка периодичности, эффективные упругие характеристики, прикладная механика.

Keywords: composite material, bulk woven structure, periodicity cell, effective elastic characteristics, applied mechanics.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Ивановской области в рамках научного проекта № 20-41-370002.

Введение

Композиционные материалы (КМ) активно используются в мировой промышленности, начиная с середины двадцатого века. Преимущество использования композитов [1] вместо металлических конструкций заключается в том, что они имеют малый вес, обладают большой прочностью и не подвержены коррозии.

В настоящее время перспективным направлением при разработке композитных материалов является использование в качестве основы объемного материала или преформы детали из различного вида технических нитей: углеродных, кремнеземных, кварцевых, стеклянных, синтетических, металлических, магнитных и др. [2]

Применение трехмерных тканых композитов в промышленности стремительно растет, например, в автомобилестроении [3], [4]; в строительстве [5]; авиастроении [6], органозамещающей медицине [7] и др.

Экономика России в настоящее время, как никогда, заинтересована в создании новых материалов (сырья и изделий) на основе химических материалов. Одним из сегментов рынка, где химическая и текстильная промышленности могут выгодно сотрудничать – это КМ. Это взаимодействие позволяет создавать новые материалы для многих отраслей промышленности РФ, сочетающие в себе свойства текстильных полотен и химических технологий [8].

Цель и задачи исследования

Учитывая, что большинство новых конструкционных материалов представляют собой композиты, основной задачей является исследование влияния армирования на конечные их физико-механические свойства.

В применяемых на сегодняшний день методах расчетов на прочность и жесткость (методы сопротивления материалов, строительной механики, теории упругости и др.) физические константы учитывают второй уровень неоднородности материала, то есть считается, что он состоит из совокупности квазиоднородных элементарных слоев, свойства которых известны [9].

Согласно ГОСТ композит (композиционный материал, композиционный материал) определяется как сплошной продукт, состоящий из двух или более материалов, отличных друг от друга по форме, и/или фазовому состоянию, и/или химическому составу, и/или свойствам, скрепленных, как правило, физической связью и имеющих границу раздела между обязательным материалом (матрицей) и ее наполнителями, включая армирующие наполнители [10].

Таким образом, композит – это конструкция, состоящая из двух или более компонентов, состоящих из однородных материалов.

Для проведения различных расчетов деталей и проектирования конструкций из КМ необходимо знать физические константы, характеризующие способность тела сопротивляться деформированию при приложении к нему различных усилий. Этими константами являются эффективные модули упругости на растяжение – сжатие, изгиб и сдвиг описывающих упругие свойства элементарной частицы КМ – ячейки периодичности (ЯП) в различных направлениях.

Существует ряд методов определения этих физических констант, в основе которых лежат различные модели [11] представления структуры и механики КМ: полуэмпирические модели; модели, основанные на подходе эластичности; модели гомогенизации; методы численного FE-моделирования и др. [12].

Таким образом, определение и оценка упругих свойств имеет решающее значение для использования такого типа КМ в передовых отраслях промышленности. А предприятиям, специализирующимся на производстве такого рода изделий, нужна вариативность в расширении ассортимента продукции, чтобы сохранять конкурентоспособность и прибыльность в условиях современной рыночной экономики.

В связи с этим, цель данного научного исследования – применить для определения эффективных модулей упругости ЯП КМ, приближенный метод, основанный на использовании понятия "жесткость" конструкции и конструктивного элемента.

Методика исследования

При деформировании композита происходит формоизменение его внутренней структуры. Это может происходить за счет упругих свойств матрицы, объемной тканой структуры или их совместной деформации. Процесс формоизменения объемной тканой структуры вызывается приращением внешней нагрузки, что характеризует возникновение упругой и/или необратимой деформации ее конструктивных элементов, который можно охарактеризовать коэффициентом жесткости.

Так как композитный материал на основе объемной тканой структуры состоит из нитей, то при моделировании деформации и прочности нити, целесообразно принимать ее в виде стержня. В такой постановке механику деформирования его структуры в зависимости от вида деформации, можно описать механикой деформирования отдельных структурных единиц материала (нитей утка, основы и матрицы) в ячейке периодичности.

В композитах на тканой основе эффективные модули упругости зависят от формы нитей, их материала, расположения и их объемного содержания [9], [13] в структуре ЯП КМ.

Объемные тканые текстильные материалы, применяемые для производства различных изделий, могут испытывать деформации разного вида и интенсивности. По величине коэффициентов жесткости можно судить о прочности и жесткости уже не материала, а элемента или конструкции в целом [14], [15]. При определении коэффициента жесткости объемной тканой структуры необходимо исследование напряжений и деформаций в нитях утка и основы, внутренних сил и моментов.

В работе [14] приводятся определения обобщенной жесткости для элементов и конструкций в целом. Первое значение термина жесткость – это способность тела или конструкции сопротивляться изменению формы или размеров, то есть сопротивление образованию деформации.

Из прикладной механики известны следующие выражения [14], [16]:

- жесткость (коэффициент жесткости) стержня на растяжение-сжатие имеет вид:

$$c^p = \frac{EF}{L}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости первого рода материала стержня (модуль Юнга); F – площадь поперечного сечения стержня; L – длина стержня;

- жесткость (коэффициент жесткости) стержня на кручение имеет вид:

$$c^k = \frac{GJ_p}{L}, \quad (2)$$

где G – модуль упругости второго рода материала стержня (модуль упругости при кручении); J_p – полярный момент инерции поперечного сечения тела;

- жесткость (коэффициент жесткости) стержня на изгиб имеет вид:

$$c^и = \frac{EJ}{L}, \quad (3)$$

где J – момент инерции поперечного сечения тела.

Второе значение этого термина определяет жесткость как характеристику сечения элемента деформируемого тела, это общепринятые выражения EF , GJ_p , EJ , в (1), (2), (3).

Компонент ЯП объемной тканой структуры – нити, которые моделируются в нашем случае в виде упругих стержней. Стержень – это тело объемное, и длина L вместе с геометрическими характеристиками его поперечного сечения F , J_p , J в формулах (1), (2), (3) это показывают.

Если композитный материал – это конструкция, состоящая из нескольких элементов, соединенных параллельно [10], то

$$c^p = \sum_i c^p_i; c^k = \sum_i c^k_i; c^и = \sum_i c^и_i. \quad (4)$$

Если элементы соединены последовательно [10], то

$$c^p = \sum_i \frac{1}{c^p_i}; c^k = \sum_i \frac{1}{c^k_i}; c^и = \sum_i \frac{1}{c^и_i}, \quad (5)$$

где i – количество элементов составляющих композитную конструкцию.

Обратная величина к коэффициенту жесткости называется механической податливостью. Для случая упругих деформаций в записи закона Гука рассматривается как физико-геометрическая характеристика сечения элемента конструкции и равна произведению модуля упругости материала и соответствующей геометрической характеристики сечения [15].

Модули упругости и коэффициенты жесткости связывают соотношения (1), (2), (3). Таким образом, зная коэффициенты жесткости ЯП и упругие характеристики матрицы в интересующем направлении, можно определить, из соотношений (6), (8), (10), интересующие модули упругости на растяжение-сжатие, изгиб и кручение (сдвиг) для ЯП КМ.

Модуль упругости ЯП КМ на растяжение-сжатие:

$$E^p_{\text{яп}} = E^p_{\text{арм. яп}} + E^p_{\text{матр. яп}}, \quad (6)$$

$$E^p_{\text{арм. яп}} = c^p_{\text{арм. яп}} \frac{L_{\text{яп}}}{F_{\text{яп}}}, \quad c \quad (7)$$

где $E^p_{\text{арм. яп}}$ – модуль упругости армирования ЯП на растяжение-сжатие; $E^p_{\text{матр. яп}}$ – модуль упругости матрицы ЯП на растяжение-сжатие; $c^p_{\text{арм. яп}}$ – коэффициент жесткости армирования на растяжение-сжатие ЯП; $L_{\text{яп}}$ – длина ЯП КМ; $F_{\text{яп}}$ – площадь поперечного сечения ЯП КМ.

Модуль упругости ЯП КМ на кручение (сдвиг):

$$G_{\text{яп}} = G^k_{\text{арм. яп}} + G^k_{\text{матр. яп}}, \quad (8)$$

$$G^k_{\text{арм. яп}} = c^k_{\text{арм. яп}} \frac{L_{\text{яп}}}{J_{p_{\text{яп}}}}, \quad (9)$$

где $G^k_{\text{арм. яп}}$ – модуль упругости армирования ЯП на кручение (сдвиг); $G^k_{\text{матр. яп}}$ – модуль упругости матрицы ЯП на растяжение-сжатие; $c^k_{\text{арм. яп}}$ – коэффициент жесткости армирования на кручение ЯП; $J_{p_{\text{яп}}}$ – полярный момент инерции поперечного сечения ЯП КМ.

Модуль упругости ЯП КМ на изгиб:

$$E^i_{\text{яп}} = E^i_{\text{арм. яп}} + E^i_{\text{матр. яп}}, \quad (10)$$

$$E^i_{\text{арм. яп}} = c^i_{\text{арм. яп}} \frac{L_{\text{яп}}}{J_{\text{яп}}}, \quad (11)$$

где $E^i_{\text{арм. яп}}$ – модуль упругости армирования ЯП на изгиб; $E^i_{\text{матр. яп}}$ – модуль упругости матрицы ЯП на изгиб; $c^i_{\text{арм. яп}}$ – коэффициент жесткости армирования ЯП на изгиб; $J_{\text{яп}}$ – момент инерции поперечного сечения ЯП КМ.

В формулах (7), (9), (11), умножая полученный коэффициент жесткости для армирования ЯП на отношение длины $L_{\text{яп}}$ к характеристике поперечного сечения ЯП композита F, J_p или J , мы освобождаемся от влияния размеров и формы ячейки периодичности композита и будем иметь только ее упругие характеристики, что и требуется определить.

Коэффициенты жесткости стержней можно определить экспериментально, если позволяют размеры, форма образцов и оборудование, или теоретически, например, методами сопротивления материалов.

$$c^p = \frac{\Delta P}{\Delta L}, \quad (12)$$

$$c^k = \frac{\Delta T}{\Delta \phi}, \quad (13)$$

$$c^i = \frac{\Delta M}{\Delta \chi}, \quad (14)$$

где $\Delta P, \Delta T, \Delta M$ – приращения соответствующих силовых факторов, растягивающего усилия, крутящего и изгибающего моментов, вызывающих деформации растяжения-сжатия, кручения и изгиба стержня, соответственно; $\Delta L, \Delta \phi, \Delta \chi$ – приращения удлинения, угла закручивания, кривизны стержня, соответственно.

Возникает вопрос, как выбрать размер ЯП композита? Так как композит – это конструкция, и в то же время материал, где множество раз повторяются и соединены между собой конструктивные элементы, то ячейка периодичности должна включать все повторяющиеся компоненты.

В качестве примера применения изложенного выше метода, некоторые моменты которого отражены также в [17], определим

модуль упругости E_{xx} , ЯП КМ на основе тканой структуры (рис. 1:– а) – геометрическая модель объемной тканой структуры; б) – трехмерная модель объемной тканой структуры; в) – геометрическая модель элемента утка в среднем слое: d_y – диаметр нити утка; d_o – диаметр нити основы; H – высота волны осевой линии нити утка; l_n – геометрическая плотность по основе в одном слое; L_n – расстояние между центрами основных нитей в крайних точках высот волн изгиба нитей утка; S – ширина ячейки объемной тканой структуры вдоль утка; D – ширина объемной тканой структуры; L – длина объемной тканой структуры; k – толщина объемной тканой структуры) из [2].

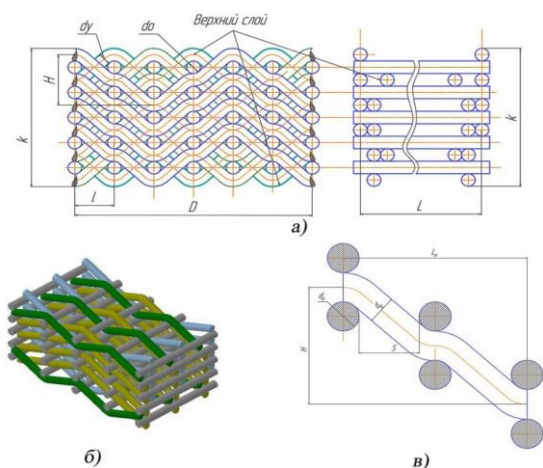


Рис. 1

Чтобы приступить к определению эффективных упругих характеристик ЯП КМ, необходимо указать некоторые основные положения и допущения, касающиеся объемной тканой структуры и матрицы:

- при получении результатов будем базироваться на механике жестких нитей, опирающуюся на основные гипотезы и допущения теории деформации стержней [18];

- вне зоны контакта с уточинами нити основы прямолинейны, смятие и взаимное перемещение нитей в зоне контакта несущественно, нити линейно упругие и абсолютно жесткие;

- элемент утка и основы – заземленная балка, в концевых сечениях;

- однородность деформации, то есть деформации структурных элементов (нитей

основы и утка) пропорциональны деформации всей ЯП КМ;

- при моделировании деформирования элемента трехмерной тканой структуры усилия приложены к области, которая существенно больше ее структурного элемента – ЯП;

- в исследовании рассматриваются только упругие деформации армирования и матрицы, вязкоупругие и пластические деформации во внимание не принимаются.

Вырежем элементарную ячейку периодичности (рис. 2 – структурная схема ячейки периодичности композиционного материала и его упругие характеристики) из середины КМ (не будем учитывать верхний или нижний слой, имеющий в структуре особенности нити утка), разработанного на основе объемной тканой структуры [2].

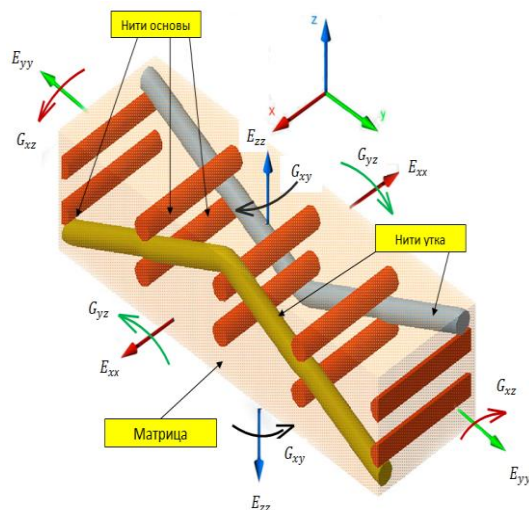


Рис. 2

Для определения E_{xx} необходимо знать модули упругости на растяжение-сжатие для армирования $E_{арм. яп}^p$ и матрицы $E_{матр. яп}^p$. Модули упругости для материала матрицы и нитей – это справочные величины, которые заранее известны. Для определения $E_{арм. яп}^p$ необходимо определить жесткость $s_{арм. яп}^p$ в направлении нитей основы. Очевидно, что в этом направлении жесткость ЯП при деформации растяжения-сжатия будут определять элементы нитей основы и их жесткость. Эту величину определяет зависимость (15):

$$c_{\text{арм. яп}}^p = \sum_i c_i^p, \quad (15)$$

где c_i^p – жесткость одного элемента нити основы на растяжение-сжатие; i – количество нитей основы в структуре ЯП.

Жесткость одиночного элемента нити основы (стержня) при деформации растяжения-сжатия определяется формулами (1 или (12). Используя полученный результат, из (7) определяется $E_{\text{арм. яп}}^p$ – модуль упругости армирования ЯП на растяжение-сжатие. Затем, используя $E_{\text{арм. яп}}^p$ и $E_{\text{матр. яп}}^p$, по (6) определим искомый модуль упругости ЯП представленного КМ $E_{xx} = E_{\text{яп}}^p$.

По вышеизложенной методике могут быть определены: эффективные модули упругости на сдвиг G_{yz} , G_{xy} , G_{xz} эффективные модули упругости на растяжение-сжатие E_{xx} , E_{zz} , E_{yy} .

В соответствии с исходными данными (табл. 1 – геометрические, качественные и количественные характеристики ячейки периодичности композита) определены эффективные модули упругости для ЯП КМ в различных направлениях (табл. 2).

Т а б л и ц а 1

Геометрические и качественные характеристики ячейки периодичности композита						
$L_{\text{яп}}$, мм	$b_{\text{яп}}$, мм	$h_{\text{яп}}$, мм	d_o , мм	d_y , мм	материал нитей	материал матрицы
43,8	12,77	10	2	2	СТ-3	эпоксидная смола
Физико-механические характеристики материалов композита						
Материал	E, ГПа		G, ГПа		μ	
Ст3	200		74		0,3	
Эпоксидная смола	3		1,3		0,4	

Т а б л и ц а 2

Упругие характеристики композита					
E_{xx} , ГПа	E_{yy} , ГПа	E_{zz} , ГПа	G_{yz} , Па	G_{xy} , Па	G_{xz} , Па
17,06	10,41	8,60	$2,2 \cdot 10^5$	$5,15 \cdot 10^4$	$2,85 \cdot 10^4$

Обсуждение результатов

В результате определены упругие характеристики периодической ячейки композита. Как и следовало ожидать, наибольшее значение модуля упругости на растяжение-сжатие в направлении нитей основы E_{xx} , так как в этом направлении присутствует группа нитей основы, которые и определяют упругость в этом направлении. Модуль E_{yy} в направлении оси "у" определяют 2 нити и матрица, но ее вклад в упругость в этом направлении наравне с нитями утка. В трансверсальном направлении упругость E_{zz} определяется нитями утка, которые связывают между собой нити основы двух слоев и матрицей, объем которой в этом направлении максимален. В формировании упругости в направлениях осей "у" и "z" существенную роль играют нити основы, добавляющие жесткости ячейке в данных направлениях. В формировании мо-

дулей упругости на кручение (сдвиг) основную роль играет матрица композита, так как нитей, сопротивляющихся кручению, мало и они очень малы (в направлении оси "х") либо они отсутствуют.

Коэффициент Пуассона – μ , в направлении оси "х" во многом будет определяться свойствами материала матрицы, то есть $\mu_{\text{яп}} = \mu_{\text{матр}}$. В направлении оси "у" он будет несколько ниже, так как усиленное армирование в направлении оси "х" будет препятствовать поперечной деформации ЯП. Также это армирование будет препятствовать сжатию ЯП вдоль оси "z", и поэтому коэффициент Пуассона здесь тоже будет несколько ниже.

В Ы В О Д Ы

1. Рассмотрена геометрическая модель ЯП КМ на основе многослойной тканой

структуры с учетом геометрических характеристик нитей утка и нитей основы.

2. Применен приближенный метод определения эффективных упругих характеристик КМ, в основе которого лежит понятие механической жесткости конструкции и конструктивного элемента.

3. Определены эффективные модули упругости ЯП КМ.

4. Основную роль в таком виде КМ играют его структура, форма и материал нитей.

5. При решении поставленной задачи использовались методы прикладной механики и механики композитов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *El-Dessouky H.M., Snape A.E., Turner J.L., Saleh M.N., Tew H., Scaife R.J.* 3D weaving for advanced composite manufacturing: From research to reality. SAMPE Conf; 2017.

2. *Пирогов Д.А., Евграфова К.И.* Математическое моделирование квазистатического процесса деформирования нити утка при формировании многослойной тканой структуры // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности – 2019, №3. С.87...92.

3. *Bayraktar H., Ehrlich D., Goering J., Mcclain M., Composites A.E., Hampshire N., et al.* 3D Woven Composites for Energy Absorbing. 20th Int. Conf. Compos. Mater., – Copenhagen, 2015. P. 19...24.

4. *EL-Dessouky H., Snape A., Tew H., Scaife R., Modi D.K., Kendall K. et al.* Design, weaving and manufacture of a large 3d composite structure for automotive applications. 7th World Conf. 3D Fabr. their Appl. 3D Fabr. their Appl; 2016.

5. *Redman C., Bayraktar H., Mcclain M.* Curved Beam Test Behavior of 3D Woven Composites. SAMPE Conf; 2014.

6. *Jewell J., Kennedy R., Menard A.* Full-scale LEAP Fan Blade-Out Rig Test Yields Outstanding Results; Advanced LEAP Fan Endurance Test Complete. CFM Power Flight; 2011.

7. *Chan K. S., Liang W., Francis W. L., Nicoletta D. P.* A multiscale modeling approach to scaffold design and property prediction // J. Mech. Behav. Biomed. Materials. – Vol. 3, № 8, 2010. P. 584...593.

8. *Барабанищикова И.С., Смирнова Т.В., Карева Т.Ю.* Композиционные материалы на тканой основе // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). – 2019, № 1-1. С. 28...30.

9. *Скворцов Ю.В.* Механика композиционных материалов. – Самара, 2013.

10. ГОСТ 32794-2014. Композиты полимерные. Термины и определения. – М., 2015.

11. *Younes R., Hallal A., Fardoun F., Chehade F.H.* Comparative Review Study on Elastic Properties Modeling for Unidirectional Composite Materials // Composite Materials Book 1 Chapter August. – 2012. DOI: 10.5772/50362 <http://dx.doi.org/10.5772/50362>.

12. *Муйземнек А.Ю., Иванова Т.Н., Карташова Е.Д.* Сопоставление результатов экспериментального и расчетного определения эффективных характеристик упругих свойств полимерных слоистых композитов из угле- и стеклотканей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2021, №2. С. 88...105. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.2.09

13. *Белинис П.Г., Донецкий К.И., Лукьяненко Ю.В., Рогожников В.Н., Майер Ю., Быстрикова Д.В.* Объемно-армирующие цельнотканые преформы для изготовления полимерных композиционных материалов (ОБЗОР) // Авиационные материалы и технологии. – 2019, №4 (57). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obemno-armiruyuschie-tselnotkanye-preformy-dlya-izgotovleniya-polimernyh-kompozitsionnyh-materialov-obzor> (дата обращения: 24.09.2021)

14. *Чаюн И.М.* Жесткость конструкций и их элементов // Труды Одесского политехнического университета. – 2010, № 1-2. С. 11...16.

15. Информационный электронный ресурс "Станки и инструменты". [Электронный ресурс]. – Электрон.текстовые, граф., зв. дан.; URL: <https://instanko.ru/drugoe/modul-uprugosti-stali.html> (дата обращения: 27.09.2021).

16. *Вульфсон И.И.* Краткий курс теории механических колебаний. – Библиотека ВНТР. – М.: ВНТР, 2017.

17. *Тимошенко С.П. Гере Дж.* Механика материалов. – М.: Мир, 1976.

18. *Беляев Н.М.* Соппротивление материалов. – М.: Наука, 1976.

REFERENCES

1. *El-Dessouky HM, Snape AE, Turner JL, Saleh MN, Tew H, Scaife RJ.* 3D weaving for advanced composite manufacturing: From research to reality. SAMPE Conf; 2017;

2. *Pirogov, D.A., Evgrafova, K.I.* Mathematical modeling of quasi-static process of weft yarn deformation during formation of multilayer woven structure / D.A. Pirogov, K.I. Evgrafova // *Izvestiya vuzov. Technology of textile industry* - 2019, № 3(381). С.87-92.

3. *Bayraktar H, Ehrlich D, Goering J, Mcclain M, Composites AE, Hampshire N, et al.* 3D Woven Composites for Energy Absorbing. 20th Int. Conf. Compos. Mater., Copenhagen; 2015. pp. 19-24;

4. *EL-Dessouky H, Snape A, Tew H, Scaife R, Modi DK, Kendall K, et al.* Design, weaving and fabrication of a large 3d composite structure for automotive applications. 7th World Conf. 3D Fabr. their Appl. 3D Fabr. their Appl; 2016;

5. *Redman C, Bayraktar H, Mcclain M.* Curved Beam Test Behavior of 3D Woven Composites. SAMPE Conf; 2014;

6. Jewell J, Kennedy R, Menard A. Full-scale LEAP Fan Blade-Out Rig Test Yields Outstanding Results; Advanced LEAP Fan Endurance Test Complete. CFM Power Flight; 2011;
7. Chan K. S., Liang W., Francis W. L., Nicoletta D. P. A multiscale modeling approach to scaffold design and property prediction // *J. Mech. Behav. Biomed. Materials.* - 2010. - Vol. 3. - No. 8. - P. 584-593.]
8. Barabanshchikova I. S. Composite materials on a woven base / I. S. Barabanshchikova, T. V. Smirnova, T. Yu. Kareva // *Young Scientists - development of the National Technological Initiative (POISK).* - 2019. - № 1-1. - С. 28-30.
9. Skvortsov Y.V. Mechanics of composite materials: tutorial-methodical complex of the discipline / Y.V. Skvortsov - Samara. 2013. 94 с.
10. GOST 32794-2014 Polymer composites. Terms and definitions: M., 2015. 98 с.
11. Comparative Review Study on Elastic Properties Modeling for Unidirectional Composite Materials / R. Younes, A. Hallal, F. Fardoun, F.H. Chehade // *Composite Materials Book 1 Chapter August.* - 2012. DOI: 10.5772/50362 <http://dx.doi.org/10.5772/50362>.
12. Muizemnek A., Ivanova T.N., Kartashova E.D. Comparison of the results of experimental and calculated determination of the effective characteristics of elastic properties of polymer layered composites of carbon and glass fabrics // *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics.* - 2021. - № 2. С. 88-105. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.2.09
13. Belinis P.G., Donetsk K.I., Lukyanenko Yu.V., Rogozhnikov V.N., Mayer Yu, Bystrikova D.V. Volumetric reinforcing all-woven preforms for the manufacture of polymer composites (OBSERVER) // *Aviation Materials and Technology.* 2019. №4 (57). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obemno-armiruyuschie-tselnotkanye-preformy-dlya-izgotovleniya-polimernyh-kompozitsionnyh-materialov-obzor> (date of reference: 24.09.2021)
14. Chayun I. M. Stiffness of structures and their elements // *Proceedings of Odessa Polytechnic University.* - 2010. - № 1-2. - С. 11-16.
15. Informational electronic resource "Machines and tools". [Electronic resource].- Electron.text, graph, link data; URL: <https://instanko.ru/drugoe/modul-uprugosti-stali.html> (date of reference: 27.09.2021).
16. Wolfson I. I. A brief course in the theory of mechanical vibrations / I. I. Wolfson - VNTR Library. - М.: ENTR, 2017. - 241 с.
17. Timoshenko, S.P. Mechanics of materials / S.P. Timoshenko, J. Gere. - Moscow: Mir, 1976. - 670с.
Belyaev, N.M. Resistance of Materials [Text]/N.M. Belyaev.-М.: Nauka, 1976.

Рекомендована кафедрой мехатроники и радиоэлектроники ИВГПУ. Поступила 20.12.21.