

УДК 677.023

DOI 10.47367/0021-3497_2023_2_235

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ АРМИРОВАНИЯ
УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
МЕТОДОМ РАЗВЕРТОК НАМОТОК МОТАЛЬНЫХ ПАКОВОК
ЗАДАННОЙ СТРУКТУРЫ**

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR REINFORCEMENT
OF CARBON – CARBON COMPOSITE MATERIALS
BY THE METHOD OF UNWINDING WINDINGS
OF GIVEN STRUCTURE WINDING PACKAGES**

М.И. ПАНИН, А.Р. ГАРЕЕВ, Н.А. КОРЧИНСКИЙ, Д.А. РАДАЙКИН, А.А. СЛЮСАРЕВ

M.I. PANIN, A.R. GAREEV, N.A. KORCHINSKY, D.A. RADAYKIN, A.A. SLYUSAREV

(АО "НИИГрафит" им. С.Е. Вяткина)

(JSC NIgrafit)

MIPanin@rosatom.ru

В статье проведен сравнительный анализ процессов формирования армирующих тканых и намоточных структур для получения плоских армирующих компонентов углерод-углеродных композиционных материалов специального назначения.

Рассмотрены пути оптимизации процессов армирования углерод-углеродных композиционных материалов 2D и 2,5D с помощью разверток намоток заданной структуры.

Обоснованы способы формирования армирующих структур композитов с помощью разверток намоток заданных структур, а также возможности получения толстостенных композиционных материалов однопроцессным способом.

Показано, что развертки с заданной степенью замыкания намотки, выполняемые из углеродных нитей по предлагаемой технологии, позволяют варьировать области их применения. Сомкнутые намотки с большой степенью замыкания могут широко использоваться в качестве армирующих компонентов самых плотнеемких композиционных материалов с высоким коэффициентом заполнения.

The article presents a comparative analysis of the processes of forming reinforcing woven and winding structures to obtain flat reinforcing components of carbon - carbon composite materials for special purposes.

The ways of optimizing the processes of reinforcement of carbon-carbon composite materials 2D and 2.5D, using windings of a given structure, are considered.

The methods of forming reinforcing structures of composites with the help of windings of the specified structures, as well as the possibility of obtaining thick-walled composite materials in a single-process way, are substantiated.

It is shown that the reamers with a given degree of winding closure, made of carbon filaments according to the proposed technology, allow varying the scope of their application. Closed windings, with a high degree of closure, can be widely used as reinforcing components of the most dense composite materials, with a high filling coefficient.

Ключевые слова: намотка, паковка, нить, развертка, виток, слой, структура, композит, процесс, стадия, технология, оболочка, разрез, оправка, степень замыкания намотки.

Keywords: winding, packaging, thread, unwinding, coil, layer, structure, composite, process, stage, technology, shell, cutting, winding closure degree.

Введение

Способы армирования и изготовления 2D и 2,5D углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) методом намотки ("сухим" или "мокрым") с последующим заполнением межфиламентного пространства углеродной матрицей известны и применяются давно. В настоящее время они лежат в основе производств крупногабаритных цилиндрических элементов УУКМ и сводятся к обмоточным операциям формирования оболочек, имеющих ось вращения [1]. Кроме того, для производства толстостенных композиционных изделий часто используется послойная выкладка углеродных тканей с последующей их пропиткой, вакуумированием заготовок, прессованием и т.д. Однако в данном случае присутствует слабое скрепление слоев тканей между собой и, как следствие, низкие прочностные характеристики готовых изделий. Поэтому изыскание новых способов армирования плоских толстостенных элементов композиционных материалов является актуальной задачей, которую можно решать путем использования разверток намоток мотальных паковок различных структур.

Теоретические исследования и практические положения процессов формирования мотальных паковок различных структур намотки (сомкнутых, замкнутых, спиралевидных) разработаны и приведены в работе [2].

На рис. 1 показаны фотографии базовых структур намоток (а – замкнутая намотка; б – сомкнутая намотка; в – спиралевидная намотка). Как отмечается в данной работе, все приведенные виды структур намоток могут иметь свои производные в зависимости от выбранной и используемой при их формировании на мотальном оборудовании степени замыкания намотки p . Чем выше степень замыкания намотки p , тем меньше будут начальные размеры пор в структуре намотки.

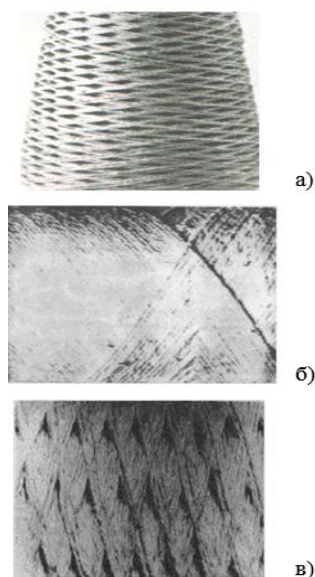


Рис. 1

Для формирования вышеуказанных структур приведена последовательность расчета величины передаточного отношения от нитераскладчика к мотальной па-

ковке, причем для нитей любого вида и линейной плотности (условного диаметра).

В данной работе также доказано, что только мотальные паковки сомкнутой структуры обладают самым высоким из всех текстильных структур коэффициентом заполнения объема композитов волокнистым армирующим материалом, равным

$$k_3 = \frac{\pi}{4} = 0,785. \quad (1)$$

Вполне очевидно, что иные структуры намоток (замкнутые и спиралевидные) за счет своей пористости будут обладать меньшим коэффициентом заполнения, что необходимо учитывать при проектировании армирующих структур разверток намотки. Проведенные ранее исследования прочностных характеристик различных структур намотки мотальных паковок и их разверток, приведенные в работе [6], показывают, что они зависят главным образом от заполнения объема композита наполнителем, а также от угла скрещивания витков β и степени замыкания намотки p .

В совокупности данные исследования позволяют не только проектировать и создавать различные композиционные изделия в виде тел вращения (оболочки, фильтры, сотовые наполнители и т.д.), но и разрабатывать новые способы армирования плоских изделий большой толщины. С этой целью могут использоваться армирующие заготовки в виде разверток намотки мотальных паковок различных структур, в том числе и для производства плоских изделий углерод-углеродных композиционных материалов значительной толщины.

В данном случае разработка технологии армирования заключается в выполнении ряда последовательных технологических операций, а именно:

- выбор и расчет параметров намоточной структуры армирования (вида намотки, ее пористости и требуемого коэффициента заполнения объема композита армирующим компонентом);

- расчет необходимых параметров настройки мотального оборудования, которые смогут обеспечить заданные парамет-

ры выбранной структуры армирования (расчет величины передаточного отношения от нитераскладчика к мотальной паковке);

- формирование "мокрым" или "сухим" способом требуемой структуры намотки армирующего материала (формирование "намоточного препрега");

- развертка намотки на плоскость путем разрезания паковки по заданной плоскости сечения, причем секущих плоскостей может быть одна или две в зависимости от требуемой формы раскроя плоской заготовки, при этом угол наклона секущих плоскостей к оси паковки может варьироваться;

- получение из плоской заготовки (раскроя) готового изделия композита традиционными способами (путем пропитки, вакуумирования на пресс-формах и т.д.).

Следует отметить, что для формирования мотальных паковок заданной структуры необходимо специальное, прецизионное мотальное оборудование, конструкция которого обеспечивала бы создание требуемой величины передаточного отношения от нитераскладчика к паковке, причем с учетом размеров как самой паковки, так и нитевидного материала, из которого формируется структура армирующей намотки (условного диаметра нити, жгута, ленты и т.д.).

Для формирования паковок сомкнутой структуры намотки между валом веретена (паковки) и валом кулачка нитераскладчика должна быть установлена величина передаточного отношения, определяемая выражением:

$$i_{oc} = \frac{p^2 k n_1 + p k z}{p^2 k^2 - \frac{d^2 k^2}{4H}} \pm \sqrt{\frac{(p^2 k n_1 + p k z)^2}{(p^2 k^2 - \frac{d^2 k^2}{4H})^2}}, \quad (2)$$

где H – высота намотки мотальной паковки; p – степень замыкания намотки; k – число оборотов кулачка нитеводителя за цикл движения нити; z – кратность замыкания намотки; d – условный диаметр нити; D – текущий диаметр намотки паковки; n_1 – числа k_{i_0} .

Из приведенной формулы следует, что при заданных параметрах p , k , n_1 , H , z и d

существует две величины передаточного отношения от нитераскладчика к паковке, при которых на паковке создается сомкнутая намотка. Первое из этих отношений соответствует "опережающей", а второе "отстающей" намотке.

Очевидно, что уравнение имеет два решения, в результате которых получим два значения величины i_{oc1} и i_{oc2} . При знаке "+" перед корнем получаем значения величины передаточного отношения для "опережающей" сомкнутой намотки, когда витки $p+1$ -й пары слоев намотки пойдут правее витков 1-й пары слоев, а при знаке "-", наоборот, витки $p+1$ -й пары слоев намотки пойдут левее витков 1-й и на паковке будет формироваться "отстающая" сомкнутая намотка. При решении уравнения (2) величиной $\frac{d^2}{\pi D^2}$ можно пренебречь без ущерба для точности расчетов, т.к. диаметр нити d много меньше диаметра намотки паковки D , однако при намотке на оправки композитов лент значительной ширины пренебрегать данным выражением нельзя.

Как известно [10], при развертывании на плоскость цилиндрических тел (паковок) наружная поверхность будет сжиматься, а внутренняя растягиваться. Это явление необходимо учитывать при проектировании толщины стенок создаваемых изделий УУКМ. Для снижения влияния этого фактора на прочностные свойства армируемого разверткой намоток композиционного материала рекомендуется использовать известные теоретические положения "О прочностных характеристиках намотки канатов на барабан", изложенные в курсе "Грузоподъемные машины" [11], предполагающие, что толщина стенки намотки S будет очень мала по сравнению с радиусом оправки, на которой формируется намотка, т.е. S должна быть меньше $1/20 R$, где R – радиус оправки. Данное положение следует учитывать при выборе типа мотального оборудования и его возможности формировать намотки на оправках увеличенных габаритов (большого диаметра).

Это положение подтверждают и рекомендации, приведенные в литературе [3...5].

Выполнение данного условия необходимо для снятия внутренних напряжений с нитей, лежащих во внутренних витках намотки (на меньшем радиусе), возникающих в формируемом полотне при его развертке на плоскость.

Методы исследования

Особый интерес в данном случае представляет метод создания многослойных и толстостенных армирующих заготовок как основ элементов конструкционных композиционных материалов путем развертки многослойных намоток заданных структур на плоскость. По сути, данные развертки могут выполнять роль многослойных тканых "препрегов", но формируемых более производительным и дешевым однопроцессным способом – намоткой неразрывной нити на оправку больших габаритов. Применение разверток намотки с использованием в послойной раскладке нитей различной структуры и сырьевого состава позволяет в широких пределах варьировать комбинации создаваемых конструкционных композитов, то есть создавать "слоеный пирог", но не отдельными слоями, а перевивкой нитей в смежных слоях намотки. При этом появляется возможность широко варьировать степень заполнения объема композиционного материала армирующим компонентом, что достигается использованием структур намотки с различной степенью замыкания p .

Технология армирования толстостенных композиционных материалов методом получения разверток намоток различных структур на плоскость имеет ряд ограничений, обусловленных, прежде всего, возможностями мотального оборудования, а именно ограничения линейных размеров разверток (в зависимости от возможной ширины раскладки нити вдоль образующей паковки и максимально возможного диаметра оправки). Поэтому данные ограничения в технологии формирования мотальных паковок не позволяют заменять многослойные ткани большой ширины. При этом для изготовления отдельных изделий данная технология может рассматриваться как альтернативная технологии 3D ткачества по следующим причинам:

1. Углеродное волокно трудно перерабатывается в ткачестве в связи с очень малым удлинением при разрыве – до 1% и ломкостью самих филамент при изгибной или знакопеременной нагрузке. Это приводит к тому, что остаточная прочность углеродного волокна в конечном изделии может снижаться до 50% от исходной.

2. В процессе формирования 3D тканей углеродные нити подвергаются многократному истирающему воздействию о направляющие рабочие органы ткацкого станка (глазки галев ремизок, бердо и т.д.) и друг о друга, что снижает их прочностные характеристики.

3. Процесс формирования тканых структур требует выполнения большого числа подготовительных операций (перемотка, сновка нитей), в течение которых углеродные волокна подвергаются многократному растяжению и истиранию о направляющие органы оборудования при подготовительного производства, в результате чего теряется их механическая прочность. При этом следует отметить, что если производителем ставится задача формирования прочных к разрыву по утку армирующих тканых структур, то этого можно добиться только выработывая ткани с натуральной (не закладной или обрезной) кромкой на механических челночных ткацких станках, а не на бесчелночных "рапирных". В этом случае подготовка уточных паков из углеродных нитей требует особого специфического оборудования и специальных знаний по их формированию. Однако до настоящего времени такого оборудования в нашей стране не выпускается.

4. Производительность ткацкого станка (с жаккардовой кареткой) значительно ниже производительности мотального оборудования ввиду однопроцессного способа формирования заготовок намоткой.

5. Жаккардовое ткачество при работе со шпулярника требует строгого сохранения постоянства натяжения всех нитей основы, что возможно только при работе с питающих паков увеличенных габаритов, причем одного диаметра, и идеальной настройки нитенатяжных приборов.

6. При использовании зарубежных ткацких станков с рапирным механизмом прокладки утка в зеве (бесчелночное ткачество) неизбежно обрезание уточных нитей у кромок тканей для формирования закладных кромок, что тоже снижает прочность к разрыву готовой ткани по утку.

7. Изготовление 3D тканей из углеродных нитей возможно только на специальных "тяжелых" ткацких станках с ЧПУ, которые машиностроительные предприятия страны пока серийно не выпускают. Импортное оборудование, применяемое для формирования изделий данного направления, очень дорогое, хотя оно в малом количестве в нашей стране имеется, но для указанных целей не адаптировано и не применяется [7]. К такому оборудованию относятся ткацкие станки специального назначения "ТЕХО" (Швеция).

Результаты и обсуждение

Все указанные выше аргументы позволяют обосновать эффективность применения для изготовления отдельных плоских композиционных изделий иной, отличающейся от ткацкой, технологии армирования УУКМ сложных толстостенных структур, а именно технологии формирования армирующих заготовок на базе разверток намоток на плоскость заданных структур мотальных паков.

Основания для этого мы видим в том, что:

1) до сих пор исследователи текстильных структур, применяемых в качестве армирующих компонентов УУКМ, не принимали во внимание возможности формирования одним процессом – намоткой углеродных нитей на оправки – **p**-сомкнутых структур, которые могут быть самыми различными по форме, габаритным размерам, а по коэффициенту заполнения и прочностным свойствам не уступать тканым;

2) структуры **p**-сомкнутых, **p**-замкнутых и **p**-спиралевидных намоток, а также их производные на полных основаниях могут отождествлять тканые переплетения, так как их такое же множество (при различных значениях степени замыкания намоток **p**), как и производных главных переплетений

тканей (полотняного, сатинового и саржевого).

Проверка описанных положений была проведена на примере сравнительного анализа и расчета коэффициента заполнения нитями образцов ткани полотняного переплетения и развертки двенадцатисомкнутой намотки тех же типоразмеров, полученных из углеродных нитей К6 [8].

Исходные данные:

а) углеродная ткань полотняного переплетения метровой длины с шириной заправки $B_3=0,3$ м;

б) намотка углеродной нити двенадцатисомкнутой структуры, выполненная на модернизированной мотальной машине "FOSTER" (США) на специальную оправку диаметром $D_0 = 33,5$ см, разрезанная вдоль образующей паковки с формированием развертки заданных размеров, то есть намоточное, плоское (нетканое) полотно длиной 1 метр.

Заправочный расчет ткани полотняного переплетения с заданной шириной заправки ($B_3=0,3$ м) показал, что:

а) поверхностная плотность ткани из углеродной нити К6 с характеристиками $\gamma = 1,75$ г/см³, $T=380$ текс составляет

$$M_1 = \frac{G}{L \cdot B_3} \text{ (г/см}^2\text{)}, \quad (3)$$

где $B_3=0,3$ м – ширина тканого "препрега"; $L=1$ м – длина "препрега"; $G = 136,6$ г – масса образца тканого "препрега";

б) объемная плотность тканого "препрега" составит:

$$\delta_T = M_1 / \delta \quad \text{или} \\ \delta_T = \frac{G}{B_3 \cdot L \cdot \delta} = \frac{136,6}{30 \cdot 100 \cdot 0,06} = 0,75 \text{ г/см}^3; \quad (4)$$

где $\delta = 0,06$ см – толщина ткани;

в) коэффициент заполнения "препрега" из углеродной ткани (объемное заполнение ткани углеродной нитью) E_v (%)

$$E_v = \frac{\delta_T}{\gamma}, \quad (5) \\ E_v = \frac{0,75}{1,75} = 0,43;$$

г) вес образца, сформированного разверткой сомкнутой намотки того же объема, составил $G_H = 211,5$ г;

д) фактический коэффициент заполнения армирующим компонентом нетканого полотна, сформированного разверткой сомкнутой намотки на оправку заданного размера, составил $E_H=0,67$, что значительно превышает значение коэффициента заполнения ткани углеродными нитями – $E_v=0,43$. Следует отметить, что полученное в ходе эксперимента фактическое значение коэффициента заполнения намотки нитью не достигает максимально возможного значения 0,785, очевидно, по причине неполного смыкания витков в структуре сомкнутой намотки при формировании опытного образца, наличия ошибки в настройке мотального оборудования и неровноты углеродной нити, то есть на паковке формировалась "квазисомкнутая" намотка.

На рис. 2 показан пример развертки сомкнутой намотки значительной толщины (до 45 мм).



Рис. 2

На рис. 3 представлено фото крупногабаритной, толстостенной цилиндрической оболочки, сформированной сомкнутой намоткой из углеродных нитей, развертка которой может быть использована для получения плоских заготовок толщиной до 30 мм.

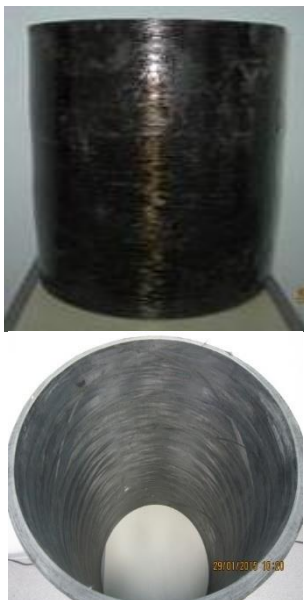


Рис. 3

Параметры намотки:

волокно:

- углеродный ровинг – Toho tenax 12K, HTS40;

- количество филаментов – 12 000;
- линейная плотность (текс) – 800;
- количество кручений (круч/м) – 0;
- плотность нити (г/см³) – 1,79;

габариты оболочки:

- Н (высота) = 530 мм;
- D диаметр наружный = 380 мм;
- D диаметр внутренний = 350 мм.

Проведенные исследования показали, что намоточное полотно, полученное в виде развертки намотки, как и ткань полотняного переплетения, имеет плотную структуру переплетающихся между собой нитей, но коэффициент заполнения его объема армирующим компонентом значительно выше. Данный способ армирования применим при создании цельных отдельных композиционных деталей сложной формы.

При выборе технологии получения композиционного материала на базе разверток намоток мотальных паковок специального назначения стоимость изготовления изделия ввиду его одностадийности будет минимальной. При разработке и реализации новой технологии армирования толстостенных У-У композиционных материалов методом разверток намоток мо-

тальных паковок специального назначения необходимо учитывать:

1) толщину намотки базовой мотальной паковки и структуру расположения в ней нитей;

2) технологические требования процессов, посредством которых предполагается придать заготовке – развертке намотки – новую плоскостную или пространственную форму (раскрой развертки), и последовательные технологические операции до стадии получения конечного продукта;

3) вопросы, связанные с экономией материала, выкладкой развертки на раскрой, ее разметкой и далее укладкой на пропитку или в пресс-форму;

4) толщину намотки базовой мотальной паковки требуемой (формируемой) структуры при выборе способа пропитки и технологических параметров производства УУКМ.

ВЫВОДЫ

1. Технологии армирования 2D и 2,5D углерод-углеродных композиционных материалов методом разверток намоток мотальных паковок могут успешно использоваться для получения изделий значительной толщины, при этом обеспечивается максимальное заполнение объема композита волокнистым армирующим компонентом и углеродной матрицей, т.е. с максимальным коэффициентом заполнения.

2. Использование сомкнутых структур намоток с различной степенью замыкания, применяемых в качестве базы для получения разверток, значительно расширяет гамму создаваемых изделий и расширяет области их использования.

3. Однопроцессный способ формирования армирующих композиционных материалы структур и при этом минимальное механическое воздействие на углеродные нити обеспечивают сохранение целостности волокон нити и их механическую прочность в готовом изделии.

4. Использование разверток намоток мотальных паковок при армировании композиционных материалов позволяет значи-

тельно снизить трудозатраты на их производство.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробей В.В., Маркин В.Б. Основы технологии и проектирование корпусов ракетных двигателей. Новосибирск: Наука, 2003.
2. Панин М.И. Разработка композиционных материалов на базе мотальных паковок специального назначения: дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТА им. А.Н. Косыгина, 2012.
3. Палочкин С.В., Рудовский П.Н., Нуриев М.Н. Методы и средства контроля основных параметров текстильных паковок. М.: МГТУ имени А.Н. Косыгина, 2006.
4. Рудовский П.Н., Киприна Л.Ю., Нуриев М.Н. Методика количественной оценки параметров структуры намотки // Вестник Костромского государственного технологического университета. 2005. № 11. С. 27...30.
5. Рудовский П.Н. Анализ структуры намотки при фрикционном наматывании // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 1995. № 4. С. 56...59.
6. Рудовский П.Н. Управление сборкой пакета при случайной намотке // Melliand Textil berichte. 1997. № 3. С. 138...141
7. Панин М.И. Исследование прочностных характеристик мотальных паковок специального назначения с помощью разверток // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2010. №8. С. 40...44.
8. McHugh C. Fiber-reinforced composites [Electronic resource] / C. McHugh. - 2015. - Access mode: <https://ru.scribd.com/document/268004901/Fiber-reinforced-Composites-Textinfo>. (access date 22.05.2021)
9. Hull D., Clyne T.W. An introduction to composite materials. Cambridge, 1981.
10. Высоцкая Н.Н., Иерусалимский А.М., Невельсон Р.А., Федоренко В.А. Технические развертки изделий из листового материала. М.: Машиностроение, 1968.
11. Александров М.П., Колобов Л.Н., Лоб Н.А. Грузоподъемные машины. М.: Машиностроение, 1986.

REFERENCES

1. Vorobey V.V., Markin V.B. Fundamentals of technology and design of rocket engine housings. Novosibirsk: Nauka, 2003.
2. Panin M.I. Development of composite materials based on special purpose winding packs: Dissertation of Candidate of Technical Sciences of the Moscow State Technical University named after A.N. Kosygin, 2012.
3. Palochkin S.V., Rudovskij P.N., Nuriev M.N. Methods and means of control of the main parameters of textile packages. M.: Moskovskij gosudarstvennyj tekstil'noj universitet im. A.N. Kosygina, 2006. 240 p. (In Russ.)
4. Rudovsky P.N., Kiprina L.YU., Nuriev M.N. The method of quantitative evaluation of the parameters of the winding structure // Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. 2005; 11:27-30. (In Russ.)
5. Rudovsky P.N. Analysis of the winding structure during friction winding // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 1995; 4(226):56-59. (In Russ.)
6. Rudovsky P.N. Control of package build in random winding // Melliand Textil berichte, 1997;3:138-141.
7. Panin M.I. Investigation of the strength characteristics of special-purpose winding packs with the help of scans // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2010. N 8 (329). – Pp. 40...44.
8. McHugh C. Fiber-reinforced composites [Electronic resource] / C. McHugh. - 2015. - Access mode: <https://ru.scribd.com/document/268004901/Fiber-reinforced-Composites-Textinfo>. (access date 22.05.2021)
9. Hull D. An introduction to composite materials / D. Hull, T.W. Clyne. Cambridge, 1981. 326 p.
10. Vysotskaya N.N., Jerusalem A.M., Nevelson R.A., Fedorenko V.A. Technical scans of products made of sheet material. M.: Mashinostroenie, 1968. 272 p.
11. Cargo lifting machines: Textbook for universities in the specialty "Lifting and transport machines and equipment" / M.P. Aleksandrov, L.N. Kolobov, N.A. Lob. M.: Mechanical Engineering, 1986.

Рекомендована АО "НИИГрафит". Поступила 13.09.22.