

УДК 677.023  
DOI 10.47367/0021-3497\_2021\_6\_98

**ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУР АРМИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**WAYS TO OPTIMIZE THE STRUCTURES OF REINFORCING COMPONENTS  
OF SPECIAL PURPOSE COMPOSITE MATERIALS**

*И.Н. ПАНИН, А.И. ПАНИН, А.Н. СЕЛЕЗНЕВ*  
*I.N. PANIN, A.I. PANIN, A.N. SELEZNEV*

**(ООО "Нефтегазовые технологии МИФИ",  
ПАО "АК Рубин")**  
**(LLC "Oil and Gas Technologies MIFI",  
PSC "AK Rubin")**

E-mail: inpanin@maul.ru; selesnev1955@mail.ru; panteks@yandex.ru

*В статье рассмотрены пути оптимизации процессов армирования композиционных материалов специального назначения, к которым относятся изделия, подвергаемые высоким нагрузкам при их эксплуатации.*

*Теоретически обоснованы способы упрочнения армирующих структур композитов с помощью намоток сомкнутой структуры, а также возможности получения облегченных конструкций без потери прочности изделий из них.*

*Показано, что сомкнутые намотки с расчетной степенью замыкания намотки, выполняемые из термостойких нитей по предлагаемой технологии, позволяют расширить области их применения.*

*Полученные теоретические положения позволили, на основе проведения предварительных расчетов, сформировать новые, высокопрочные структуры армирующих композиционных материалов.*

*The article discusses ways to optimize the processes of reinforcement of composite materials for special purposes, which include products subjected to high loads during their operation.*

*The methods of strengthening the reinforcing structures of composites using windings of a closed structure, as well as the possibility of obtaining the "lightest"*

*and strongest products from them, are theoretically substantiated.*

*It is shown that closed windings with a calculated degree of winding closure, made of heat-resistant filaments according to the proposed technology, make it possible to vary the areas of their application.*

*The obtained theoretical provisions allowed to form new, high-strength structures of reinforcing composite materials on the basis of preliminary calculations.*

**Ключевые слова:** композит, структура, прочность, армирование, углеродное волокно, авиация, нить, намотка.

**Keywords:** composite, structure, strength, reinforcement, carbon fiber, aviation, thread, winding.

Создание и разработка новых высокопрочных и максимально "легких" полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1] основываются на применении текстильно-армированных композитов. В настоящее время в качестве армирующих компонентов (наполнителей) ПКМ применяются текстильные структуры в виде тканей, нетканых полотен, намотки, кулирного трикотажа и др.

Такое разнообразие текстильных структур армирования ПКМ [2] определяется областями и условиями использования конечного продукта. Наряду со свойствами нитевидных материалов, из которых формируются наполнители (их термостойкость, устойчивость к воздействию агрессивных сред, прочностные характеристики и т.д.), конечные эксплуатационные характеристики создаваемых изделий во многом определяются выбранной структурой армирования. От избранного способа армирования зависят не только физико-механические свойства ПКМ, но и вес конечного продукта, что особенно важно для аэрокосмической отрасли [3]. Оценка весовой доли армирующего компонента в ПКМ приведена в работе [4], которая разделяет их на три группы:

- "сильнонаполненные", с долей наполнителя по весу более 70%;
- "средненаполненные", с долей наполнителя по весу от 30...70%;
- "слабонаполненные", с наполнением по весу менее 30%.

Однако данное разделение не позволяет определять конкретные границы весовых

характеристик проектируемых конечных изделий.

Теоретические и экспериментальные исследования процесса формирования мотальных паковок "сомкнутой структуры", "замкнутых" и "спиралевидных" намоток показали, что, изменяя структуру намотки нитей на формируемом изделии, можно управлять и коэффициентом заполнения объема матриц ПКМ армирующим компонентом.

Следует также отметить, что многослойные текстильные структуры [5] армирования ПКМ (формируемых на базе послойной укладки тканей в пакеты, намоткой из многониточных жгутов, многослойные нетканые) при приложении к ним значительных внешних нагрузок подвержены расслоению и разрушению композиционного материала вследствие малой внутренней связанности отдельных слоев.

Для решения этой проблемы при создании высокопрочных и максимально легких ПКМ специального назначения нами предлагаются новые способы упрочнения конструкции изделий специального назначения, на поверхности которых может быть сформирован упрочняющий слой в виде ПКМ, армированного сомкнутой намоткой с заданной степенью замыкания  $p$ .

Под степенью замыкания намотки  $p$  понимают двойное число ходов нитеводителя вдоль образующей паковки (слева-направо и обратно), по истечении которого витки  $p+1^{\text{й}}$  пары слоев намотки пойдут рядом (слева или справа) с первым витком, то есть цикл намотки замкнется, после чего характер намотки нитей будет повторяться.

Сомкнутые намотки с различной степенью замыкания могут широко применяться в качестве армирующих компонентов композиционных материалов, в том числе при упрочнении тел вращения специального назначения. При этом коэффициент заполнения будет составлять  $k_3 = 0,785$  [6]. Это максимально возможное значение наполнения матрицы ПКМ армирующим компонентом среди всех возможных текстильных структур, что позволяет получать самые легкие конечные продукты.

Различают "опережающие" и "отстающие" сомкнутые намотки [7], у которых витки нити после совершения одного цикла движения нитеводителя ложатся соответственно правее или левее первой пары слоев намотки. На торце паковки это будет обусловлено тем, в каком направлении от первого витка будет откладываться угол сдвига витков  $\psi_c$ . У "опережающих" сомкнутых намоток он будет откладываться по ходу часовой стрелки, а у "отстающих" – против хода часовой стрелки. На рис. 1-а и 1-б соответственно показаны развертки и круговые диаграммы односомкнутой "отстающей" и односомкнутой "опережающей" намоток.

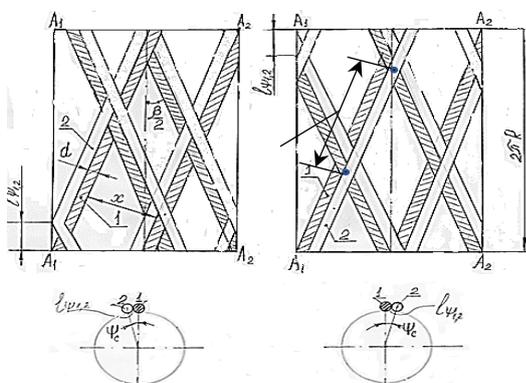


Рис. 1

Данные отличия и особенности формирования структур сомкнутых намоток необходимо учитывать при использовании их в качестве упрочняющих оболочек ПКМ, а именно такие изделия имеют "верх" и "низ". При приложении к ним внешних осевых усилий витки нити, идущие в одну сторону, будут опираться на витки ранее сформированного слоя, а витки, идущие в противоположную сторону, опираться на

нити ранее сформированного слоя не будут и, следовательно, могут смещаться (слетать) с паковки, снижая ее прочность [8].

Очевидно, что чем выше степень замыкания намотки  $p$ , тем меньше будут размеры ромбовидных пор у замкнутых намоток, которые будут являться граничными для "опережающей" и "отстающей" сомкнутых намоток с той же степенью замыкания [9]. Главное отличие  $p$ -сомкнутых намоток от односомкнутых заключается лишь в длине "настилов", нити между взаимно-пересекающимися витками  $l_{ab}$  – в одном объемном слое намотки толщиной  $\delta=2d$ , где  $d$  – условный диаметр нити. Это очень важно для прочностных характеристик создаваемого армирующего компонента ПКМ.

Все вышеприведенные положения свидетельствуют о том, что они влияют на прочность создаваемого (ПКМ) – конечного изделия, так как расположение нитей в структуре смежных слоев армирующего компонента влияет на их подвижность относительно друг друга.

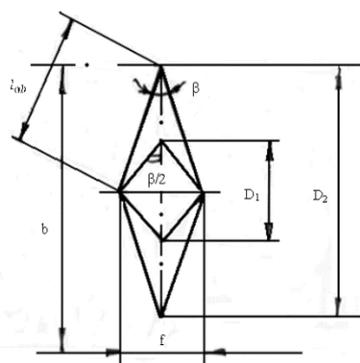


Рис. 2

Так, анализ рис. 2 показывает, что длина "настилов" нити между пересечениями их в одном объемном слое  $l_{ab}$  определяется степенью замыкания  $p$ . Точки пересечения витков нити образуют ромбы, у которых малые диагонали  $f$  будут оставаться неизменными с ростом диаметра намотки, а большие диагонали  $l_{ab}$  будут расти пропорционально диаметру намотки паковки (упрочняющей оболочки) –  $D$ . При этом угол подъема витков  $\beta/2$  будет уменьшаться.

Для расчета требуемых параметров армирующих структур ПКМ и определения

длины "настилов" нити у сомкнутых намоток различной степени замыкания  $p$  необходимо определить, прежде всего число витков в слое намотки:

$$W_c = \frac{H}{h}, \quad (1)$$

где  $h = \frac{h_k}{i_0} = \frac{2H}{ki_0}$  – шаг витков намотки;  $h_k$  – шаг кулачка нитеводителя;  $H$  – высота намотки паковки;  $i_0$  – общее передаточное отношение от веретена к кулачку нитеводителя.

Тогда число витков в одном объемном слое намотки будет:

$$W_c = \frac{Hki_0}{2H} = \frac{ki_0}{2}. \quad (2)$$

В этом случае размеры пор и длина "настилов"  $\ell$  нити могут быть определены из соотношений:

$$\ell_{\psi} = \ell = \frac{\pi D}{P}. \quad (3)$$

$$f = \frac{H}{PW_c} = \frac{2H}{W_c P} = \frac{2H}{ki_0 P}, \quad (4)$$

где  $n_1 = [ki_0]$  – целая часть числа;  $k$  – число оборотов кулачка нитеводителя за цикл движения нити.

Длина "настилов"  $\ell$  для  $p$ -сомкнутых намоток может быть определена по формуле:

$$\ell_{ab} = \frac{\ell_{\psi_{1,2}}}{\cos \beta/2}. \quad (5)$$

Так как

$$\ell_{\psi_{1,2}} = \frac{\pi D}{P},$$

то

$$\ell_{ab} = \frac{\pi D \cos \beta/2}{P}. \quad (6)$$

Анализ формулы 8 показывает, что чем больше степень замыкания намотки  $p$ , тем меньше длина "настилов"  $\ell_{ab}$  нити, а следовательно, ниже и подвижность витков нити относительно друг друга, что следует учитывать при определении областей применения создаваемых (ПКМ).

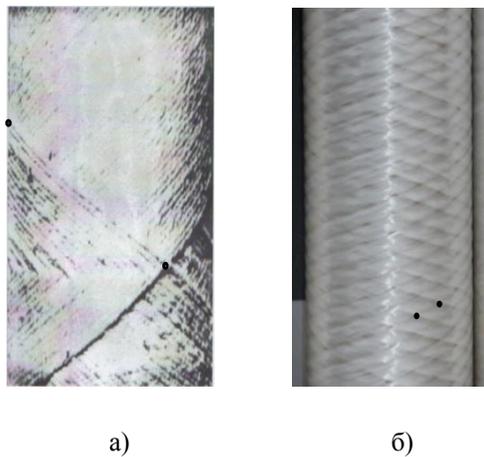


Рис. 3

На рис. 3 показаны структуры одно- (а) и двенадцатисомкнутых (б) намоток.

Из рис. 3 видно, что чем выше степень замыкания намотки  $p$ , короче будут "настилы", а следовательно, и прочнее связь витков нити друг с другом в смежных слоях армирующего компонента.

Постоянная и максимальная, по сравнению с любыми иными текстильными наполнителями (ПКМ), объемная плотность данных структур намотки, а также высокая прочность закрепления малых "настилов" витков обеспечивают легкость и высокую прочность (ПКМ) выходного продукта.

Полученные теоретические положения позволили, на основе проведения предварительных расчетов, сформировать новые, высокопрочные структуры армирующих композиционных материалов (формируемых на базе тел вращения). На рис. 4 представлены: а) – изделия специального назначения, армированные 23-сомкнутыми "опережающими" намотками; и б) – композиционные теплоизоляционные оболочки из углеродных нитей [10].

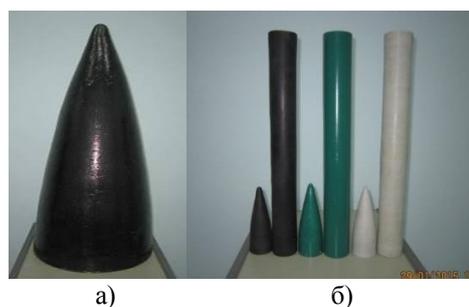


Рис. 4

## ВЫВОДЫ

1. Прочность полимерных композиционных материалов и изделий специального назначения, в виде тел вращения, можно повышать за счет формирования на их поверхности армирующих структур в виде сомкнутой намотки, с заданной степенью замыкания намотки  $p$ .

2. Чем выше степень замыкания сомкнутой намотки  $p$ , тем мельче будут настилы нитей в смежных слоях, размеры пор в структуре армирующего компонента полимерного композиционного материала, а следовательно, и меньше масса связующего компонента в выходном продукте (что позволит снизить вес конечного изделия).

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Cyrus J.R., Kosztownya Anthony, M.Waas.* Postbuckling response of unitized stiffened textile composite panels: Experiments // *International Journal of Non-Linear Mechanics.* –2021, September.

2. *Hao Li, Yang Wei, Libin Wang.* A general model for predicting the off-axis performance of fiber reinforced composite materials // *Structures.* – V. 34, 2021, December. P. 2087...2097.

3. *G. Kastratović, A. Grbović, A. Sedmak, Ž. Božić, S. Sedmak.* Composite material selection for aircraft structures based on experimental and numerical evaluation of mechanical properties // *Procedia Structural Integrity.* – V. 31, 2021. P. 127...133.

4. *Труевцев А.В., Цобкалло Е.С., Москалюк О.А., Молоснов К.А.* Полимерные композиты с кулирным трикотажным наполнителем. – СПб.: СПбГУПТД, 2020.

5. *Jin Huang, Philippe Boisse, Nahiène Hamila.* Simulation of the forming of tufted multilayer composite preform // *Composites Part B: Engineering.* – V. 220, 2021, September. 108981.

6. *Панин М.И.* Разработка композиционных материалов на базе мотальных паковок специального назначения: Дис.... канд. техн. наук. – МГТА им. А.Н. Косыгина, 2012.

7. *Гордеев В.А., Зайцев В.П., Панин И.Н.* О замкнутых и сомкнутых крестовых намотках // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* – 1987, №2.

8. *Щербаков В.П., Заваруев В.А., Поляков В.И.* Теория и критерии устойчивости нити при вязании // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* – 2013, № 6. С. 35...36.

9. *Панин А.И., Сухотерин Л.Я., Калмыков А.А., Цимбалюк А. Е.* Исследование структур сомкнутых

намоток, применяемых в качестве паковок специального назначения // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* – 2012, № 1. С. 131...134.

10. *Фитцер Э., Дифендорф Р., Калнин И., Ягер Х., Хейес Б., Стензенбергер К., Адаме Д., Брунш К., Бергман Х., Гастингс Г., Нагабхушанам Т., Зенг Х., Ким С., Ри Б.* Углеродные волокна и углекомпозиаты / Пер. с англ./ под ред. Фитцера. –М.: Мир, 1988.

## REFERENCES

1. *Cyrus J.R., Kosztownya Anthony, M.Waas.* Postbuckling response of unitized stiffened textile composite panels: Experiments // *International Journal of Non-Linear Mechanics.* –2021, September.

2. *Hao Li, Yang Wei, Libin Wang.* A general model for predicting the off-axis performance of fiber reinforced composite materials // *Structures.* – V. 34, 2021, December. P. 2087...2097.

3. *G. Kastratović, A. Grbović, A. Sedmak, Ž. Božić, S. Sedmak.* Composite material selection for aircraft structures based on experimental and numerical evaluation of mechanical properties // *Procedia Structural Integrity.* – V. 31, 2021. P. 127...133.

4. *Truevtsev A.V., Tsobkallo E.S., Moskaljuk O.A., Molosnov K.A.* Polymer composites with knitted filler. - St. Petersburg: SPbGUPTD, 2020.

5. *Jin Huang, Philippe Boisse, Nahiène Hamila.* Simulation of the formation of tufted multilayer composite preform // *Composites Part B: Engineering.* – V. 220, 2021, September. 108981.

6. *Panin M.I.* Development of composite materials based on winding packages for special purposes: Dis.... cand. tech. Sciences. - MGTA them. A.N. Kosygin, 2012.

7. *Gordeev V.A., Zaitsev V.P., Panin I.N.* On closed and closed cross windings // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 1987, No. 2.

8. *Shcherbakov V.P., Zavaruev V.A., Polyakov V.I.* Theory and criteria for thread stability during knitting // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2013, No. 6. S. 35...36.

9. *Panin A.I., Sukhoterin L.Ya., Kalmykov A.A., Tsymbalyuk A. E.* Investigation of the structures of closed windings used as special purpose packages // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2012, No. 1. pp. 131...134.

10. *Fitzer E., Diefendorf R., Kalnin I., Jager X., Hayes B., Stensenberger K., Adams D., Brunsch K., Bergman X., Hastings G., Nagabhusanam T., Zeng X., Kim S., Ri B.* Carbon fibers and carbon composites / *Trans. from English/ ed. Fitzer.* –М.: Mir, 1988.

Рекомендована заседанием научно-технического совета ООО "Нефтегазовые технологии МИФИ". Поступила 11.10.21.