

Научная статья

УДК 677

EDN QTBOVE

doi 10.34216/2587-6147-2022-3-57-24-29

Михаил Иванович Панин¹

Артур Радикович Гареев²

Андрей Павлович Карпов³

Никита Андреевич Корчинский⁴

Ксения Евгеньевна Калугина⁵

^{1,2,3,4,5} «НИИГрафит», г. Москва, Россия

¹ MIPanin@rosatom.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6513-6767>

² ARGareev@rosatom.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5934-8456>

³ AnPKarpov@rosatom.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2105-4588>

⁴ NAKorchinsky@rosatom.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2774-6358>

⁵ KEKalugina@rosatom.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6809-0151>

О СТРУКТУРАХ НАМОТКИ МОТАЛЬНЫХ ПАКОВОК, ИХ НАЗВАНИЯХ И ОБЛАСТЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ АРМИРОВАНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Статья раскрывает содержание понятия степени замыкания намотки. Намоточные структуры различной степени замыкания обладают рядом исключительных свойств по прочностным характеристикам и по структурным показателям. Одним из наиболее перспективных направлений применения поддающихся строгому расчету структур является армирование заготовок углерод-углеродного композиционного материала. Возможность максимального наполнения углеродным волокном общего объема заготовок углерод-углеродного композита позволяет значительно повысить прочность и физико-механические свойства. В результате проведенного исследования угол сдвига между витками различных пар слоёв намотки является главным критерием, определяющим структуру намоток нитей на паковки. Использование мотальных паковок с заданной степенью замыкания намотки значительно расширяет варианты решений по формированию конструкционных материалов с требуемыми свойствами. Авторы приходят к выводу, что замкнутые структуры намотки, обладающие сотовой структурой, целесообразно использовать для армирования композитов с требуемой пористостью и проницаемостью.

Ключевые слова: паковка, армирование, композит, намотка, структура, ячейка, слой намотки

Для цитирования: Панин М. И., Гареев А. Р., Карпов А. П., Корчинский Н. А., Калугина К. Е. О структурах намотки мотальных паковок, их названиях и областях применения при армировании композиционных материалов // Технологии и качество. 2022. № 3(57). С. 24–29. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2022-3-57-24-29>.

Original article

Mikhail I. Panin¹

Artur R. Gareev²

Andrey P. Karpov³

Nikita A. Korchinsky⁴

Ksenia E. Kalugina⁵

^{1,2,3,4,5} NII Grafit, Moscow, Russia

ABOUT THE WINDING STRUCTURES OF WINDING PACKAGES, THEIR NAMES AND THEIR APPLICATIONS IN THE REINFORCEMENT OF COMPOSITE MATERIALS

Abstract. The article reveals the content of the concept of the degree of winding closure. Winding structures of various degrees of closure have a number of exceptional properties in terms of strength characteristics and structural indicators. One of the most promising areas of application of structures amenable to strict

© Панин М. И., Гареев А. Р., Карпов А. П., Корчинский Н. А., Калугина К. Е., 2022

calculation is the reinforcement of carbon-carbon composite material blanks. The possibility of maximum filling with carbon fibre of the total volume of carbon-carbon composite blanks can significantly increase the strength and physic-mechanical properties. As a result of the study, the angle of shift between the turns of different pairs of winding layers is the main criterion determining the structure of the winding threads for packing. The use of winding packages with a given degree of winding closure significantly expands the options for solutions for the formation of structural materials with the required properties. The authors come to the conclusion that closed winding structures with a honeycomb structure should be used for reinforcing composites with the required porosity and permeability.

Keywords: *packing, reinforcement, composite, winding, structure, cell, winding layer*

For citation: Panin M. I., Gareev A. R., Karpov A. P., Korchinsky N. A., Kalugina K. E. About the winding structures of winding packages, their names and their applications in the reinforcement of composite materials. *Technologies & Quality*. 2022. No 3(57). P. 24–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2022-3-57-24-29>.

Намотка мотальных паковок специального назначения является одним из самых эффективных процессов армирования композиционных материалов, широко применяемых в различных отраслях жизнедеятельности человека.

Несмотря на кажущуюся простоту процесса, прецизионная (точная) намотка обладает очень тонкими нюансами, которые до сих пор не используют в своей работе не только производственники, но и проектировщики новых материалов [1]. Это обусловлено большим многообразием структур намоток и их производных, о которых не знают или не принимают их во внимание многие исследователи.

В связи с этим следует отметить, что исследованиями и разработкой новых структур намотки мотальных паковок занимаются не только текстильщики [2, 3], непосредственно работающие с текстильными волокнами и нитями, но и специалисты-механики, материаловеды, химики, разработчики композиционных материалов. Каждая группа ученых по-своему решает общую задачу – создания оптимальных систем армирования композиционных материалов, при этом вводя «свои» понятия и обозначения параметров структур намотки мотальных паковок [4, 5]. Отсутствие междисциплинарного взаимодействия исследователей приводит к тому, что возникают не только различные толкования одних и тех же положений теории наматывания, но, самое главное, ограничивает и обедняет развитие новых направлений в создании материалов специального назначения, в том числе и возможности формирования новых структур армирования композиционных материалов. Здесь следует назвать такой параметр, характеризующий многообразие структур намоток, как степень замыкания намотки p , которым не пользуются или неопределенно называют «многозаходной» намоткой.

Несмотря на то что все виды структур намоток мотальных паковок уже давно классифицированы по главным их параметрам – углу сдвига витков ψ между различными парами слоев намотки и углу скрещивания витков (углу подъема витков $\beta/2$) [1], исследователи структур намоток, мотальных паковок, кроме общепринятых в теории наматывания и текстильном производстве, вводят «новые», зачастую необоснованные теоретическими положениями термины. Например, «гексагональная укладка», которой оперируют авторы работы [6], где показаны схемы расположения витков волокон или нитей в одной паре слоев намотки, когда угол подъема витков $\beta/2$, или угол скрещивания витков β равен нулю. Такое расположение нитей (волокон) возможно только в одном (первом) слое намотки жгутом, при параллельной укладке их на оправке в жгуте, включающем группу нитей. Жгуты, в свою очередь, при их намотке на оправки можно представить как «мононить». Ширина жгута принимается как условный диаметр наматываемой «мононити». Формирование последующих слоев намотки жгутами связано с изменением взаимной ориентации волокон в жгуте, а следовательно, появляется угол скрещивания витков (жгутов) намотки и структура расположения витков перейдет в крестовую [6, с. 16, рис. 1.7] Фактически добиться «гексагональной» укладки одиночной нити в объеме структуры всей мотальной паковки не представляется возможным, так как каждый последующий объемный слой намотки из-за приращения диаметра намотки приводит к раздвижке витков нити в жгуте на величину «дельта». Это видно из рис. 1а, где изображена круговая диаграмма расположения витков на торце паковки при сомкнутой намотке. Смещение витков нити в смежных слоях переводит структуру намотки в разряд крестовых намоток. При этом «гексагональная» структура укладки

нитей сохранится только для одного объемного слоя толщиной намотки не более двух диаметров нити. Она также подходит под вышеуказанную классификацию, так как имеет вполне определенное значение угла сдвига витков ψ_r , который при любых значениях условного диаметра наматываемой нити будет равен половине угла сдвига витков, соответствующего сомкнутой структуре намотки из той же нити $\psi_c/2$. Это наглядно видно из рис. 1, где изображены круговые диаграммы сомкнутой (а) и замкнутой намоток (б).

Необходимо отметить, что намотка жгутами, с уложенными в них нитями «гексагональной» структурой, при намотке на оправки их «встык» является сомкнутой намоткой, характеризующейся конкретным значением угла

сдвига витков ψ_c . Очевидно, что такая намотка позволяет увеличить коэффициент заполнения композита армирующим компонентом, однако, значение высокого коэффициента заполнения «гексагональной укладки» волокон или нитей, которое равно 0,901, возможно только теоретически. В реальности происходит уменьшение объема, занимаемого нитями, только в пределах первого объемного слоя намотки, по отношению к объему, занимаемому теми же нитями при сомкнутой структуре намотки.

Очевидно, что D_H^r меньше, чем D_H^c . Разница объемов соответствует теоретическому значению разности коэффициентов заполнения сомкнутой намотки и «гексагональной» укладки нитей. Это наглядно видно из рис. 1.

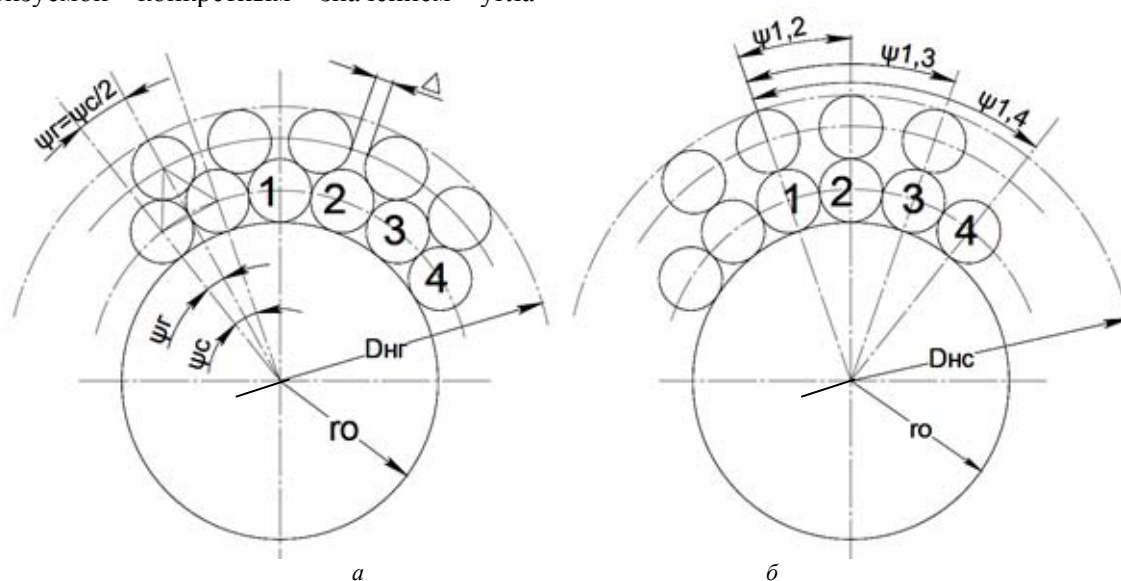


Рис. 1. Круговые диаграммы сомкнутой (а) и замкнутой намоток (б):

D_H^r – диаметр намотки одного объемного слоя при «гексагональной» укладке нитей в жгуте;

D_H^c – диаметр намотки одного объемного слоя при сомкнутой структуре;

ψ_r – угол сдвига витков при «гексагональной» укладке нити в жгуте;

ψ_c – угол сдвига витков при сомкнутой структуре намотки; r_0 – радиус оправки

На практике это подтверждается данными, приведенными в работе [2, с. 33, рис. 1.22], где на графике показаны прочностные параметры композиций, полученные теоретическим и практическим путем.

В работе [7] вводятся такие понятия, как: «мультиструктурная», «ступенчатая» и «полиструктурная» намотки. При этом оснований для присвоения названия той или иной структуре намотки, базирующихся на конкретных расчетных технологических параметрах, которые могли бы идентифицировать и воспроизводить именно данный вид структуры намотки нитей на паковки, нет. Чаще всего исследователями за отличительные параметры «новых» структур

намоток, позволяющие присваивать им «свои» названия, принимаются только шаг намотки и угол подъема витков. Иногда число раскладчиков нити (два и более), причем все отличительные особенности расположения нити в объеме мотальных паковок рассматриваются в пределах только одного объемного слоя намотки, ошибочно считая, что последующие слои намотки будут формироваться аналогично первому, что не соответствует действительности. Покажем это ниже на конкретных примерах.

Отсутствие теоретических, расчетных обоснований параметров «новых» структур намотки нитей приводит к тому, что для пояснения своих названий исследователи вводят уточ-

няющие термины: «с нахлестом», «встык», «ступенями» и т. д., что не дает полного представления о всей структуре намотки нитевидного материала на паковки в завершённом виде и путях ее воспроизведения.

Для устранения указанных неопределенностей и более глубокого изучения структур намотки мотальных паковок по всему их объему (как в осевом, так и в радиальном направлениях паковки) следует уточнить понятия, предложенные и используемые в работе [8]:

- «слой намотки» – это расположение витков нити в структуре намотки при движении нитераскладчика вдоль образующей паковки только в одну сторону (слева направо или обратно);
- «пара слоев намотки» – расположение витков нитей в структуре намотки за один цикл движения нитераскладчика (при завершении его движения слева направо и обратно);
- «объемный слой намотки» – объем, заполненный витками нити, при увеличении диаметра паковки на два диаметра нити;
- $\psi_{1,2}$ – угол сдвига между витками первой (на рис. 1, где первая нить слоя заштрихована) и второй парами слоев намотки нити, уложенными на цилиндрическую оправку;
- ψ_c – угол сдвига витков при формировании сомкнутой структуры намотки;
- $\psi_{2,3}$ – угол сдвига между витками второй и третьей пар слоев намотки;
- $\psi_{3,1}$ – угол сдвига между витками третьей и первой пар слоев намотки;
- $l\psi_{1,2}$ – длина дуги круговой диаграммы, на которую опирается угол сдвига между витками первой и второй пар слоев намотки;
- $\psi_{m,m+p}$ – угол сдвига между витками m и $m+p$ пар слоев намотки;
- 1, 2, 3, 4 и т. д. – соответственно витки первой, второй и т. д. пар слоев намотки.

В общем виде для формирования сомкнутой структуры намотки заданной степени замыкания будет справедливо выражение [8]:

$$\psi_{m,m+p} = 360Z \pm \psi_c, \quad (1)$$

$$\psi_{m,m+p} = 2\pi p(ki_{oc} - n_1), \quad (2)$$

где $Z = 1...3$ – кратность замыкания намотки (целое число оборотов паковки, после которого виток $m+p$ укладывается рядом с витком m);

$p = 1, 2, 3... -$ степень замыкания намотки (число двойных ходов нитеводителя, после которого виток $m+p$ укладывается рядом с витком m);

$$i_{oc} = \frac{n_B}{n_k} - \text{общее передаточное отношение}$$

при передаче движения от паковки к нитеводителю;

$n_1 = [k i_o]$ – целая часть числа;

k – число оборотов кулачка нитераскладчика за цикл движения нитеводителя (время формирования одной пары слоев намотки).

Как показано в работе [5], для формирования сомкнутой структуры различной степени замыкания намотки, целое число оборотов паковки можно не учитывать, и (1) переписывается в виде:

$$\psi_{m,m+p} = \psi_c$$

или

$$2\pi D \sin \frac{\beta}{2} - 2\pi p n_1 D \sin \frac{\beta}{2} = 2\pi Z D \sin \frac{\beta}{2} \pm 2d. \quad (3)$$

Решая уравнение (2) относительно i_{oc} получим

$$i_{oc} = \frac{n_k}{k} + \frac{Z}{pk} \pm \frac{d}{\pi p k D \sin \frac{\beta}{2}}. \quad (4)$$

Найденная величина i_{oc} обеспечивает формирование сомкнутой структуры намотки нити на паковку с требуемой степенью замыкания p .

Знаки (+) или (–) соответствуют процессам формирования «опережающей» или «отстающей» сомкнутых намоток.

Данная методика расчета была разработана в исследовании [8], когда расчетным путем определялась величина передаточного отношения между нитераскладчиком и мотальной паковкой (необходимого для формирования требуемых структур заготовок композиционных материалов), а в дальнейшем использована в работе [9]. Она применима к мотальным машинам любых конструкций, что делает ее универсальной, и справедлива для формирования сомкнутых намоток из любого нитевидного материала с различным значением поперечника – условного диаметра нити.

Многообразие структур сомкнутых намоток заключается в том, что они могут иметь различную степень замыкания намотки p . Под степенью замыкания намотки понимаются двойное число ходов нитеводителя вдоль образующей паковки, по истечении которого витки $(p+1)$ -й пары слоев намотки пойдут рядом (слева или справа) от первого витка, то есть цикл намотки замкнется, после чего характер намотки нитей будет повторяться [4]. Значение степени замыкания p представляет «раппорт намотки». Кроме

того, p -сомкнутые намотки могут быть «опережающими» и «отстающими», в зависимости от того, с какой стороны от первого витка ляжет $(p + 1)$ -й виток сомкнутой намотки [8]. Чем выше значение p , тем больше будет пересечений витков в смежных слоях между нитями и прочнее к осевому сдвигу структура намотки. В отдельных случаях она будет подобна переплетению нитей в тканях. Так, например, при формировании трехсомкнутой намотки по виду пересечения нитей в объемном слое она будет подобна переплетению ткани саржа 1/3, так как после третьего цикла движения нитераскладчика витки 4-й пары слоев намотки нити на паковку лягут рядом с витками нити 1-й пары (слева при «отстающей» или справа при «опережающей» намотке), аналогично витки нити 5-й пары слоев лягут рядом с витками нити 2-й пары слоев, витки 6-й пары рядом с витками нити 3-й пары слоев намотки, и далее рисунок намотки, завершив цикл раскладки (раппорт намотки), будет повторяться. Места пересечения витков нити в смежных слоях намотки будут соответствовать отношению 1/3 (то есть нити в одном слое намотки ложатся рядом друг с другом, только через 2 предыдущие). На рис. 2, приведенном в работе [9], показаны структуры одно- и двенадцатисомкнутых намоток. Из фото видно, что чем выше степень замыкания намотки p , тем короче будут «настилы» (на фото обозначены черными точками), а следовательно, и прочнее связь нитей в смежных слоях друг с другом.

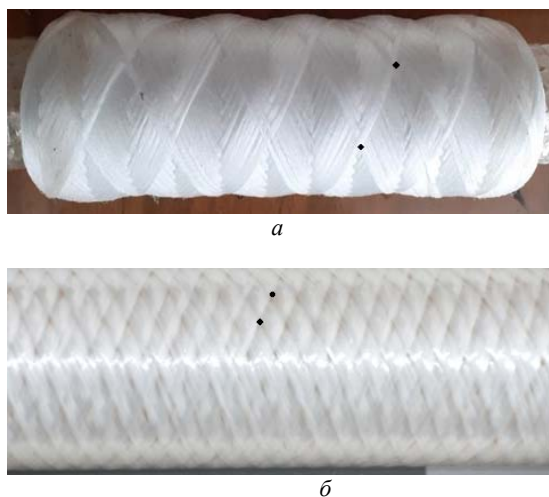


Рис. 2. Структуры одно- (а) и двенадцатисомкнутой (б) намоток

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Панин М. И. Разработка композиционных материалов на базе мотальных паковок специального назначения : дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 158 с.
2. Палочкин С. В., Рудовский П. Н., Нуриев М. Н. Методы и средства контроля основных параметров текстильных паковок : монография. М. : Московский гос. текст. ун-т им. А. Н. Косыгина, 2006. 240 с.

Намоточные структуры различной степени замыкания p обладают рядом исключительных свойств как по прочностным характеристикам, так и по структурным показателям (пористости, проницаемости, форме пор и их взаимному расположению). Причем все параметры данных структур поддаются строгому расчету и находят широкое применение в различных областях промышленности, например, при создании намоткой прочных оболочек или фильтровальных перегородок трубчатых текстильных фильтров различного назначения с использованием нитей различного сырьевого состава. Одним из наиболее перспективных направлений применения поддающихся строгому расчету структур является армирование заготовок углерод-углеродных композиционных материалов. Возможность максимального наполнения углеродным волокном общего объема заготовок углерод-углеродного композита позволяет значительно повысить его прочность при сохранении стабильной структуры расположения волокон. Это также позволяет получить конечные изделия способные выдерживать:

а) значительные осевые нагрузки при правильной ориентации витков намотки с учетом условия их «опережения» или «отставания»;

б) термические удары, за счет выбора требуемого направления (угла скрещивания) витков и т. д., что, безусловно, важно для развития авиационной и космической промышленности.

Проведенный анализ существующих структур намоток позволяет сделать следующие **ВЫВОДЫ**:

1. Главным критерием, определяющим структуру намотки нитей на паковки, является угол сдвига между витками различных пар слоев намотки.

2. Использование паковок с заданной степенью замыкания намотки расширяет варианты решений по формированию конструкционных материалов с требуемыми свойствами.

3. Замкнутые структуры намотки, обладающие сотовой (ячеистой) структурой, целесообразно использовать для армирования композитов с требуемой пористостью и проницаемостью.

3. 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.
4. Рудовский П. Н. Анализ структуры намотки при фрикционном наматывании // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 1995. № 4(226). С. 56–59.
5. Rudovsky P. N. Control of package build in random winding // Melliand Textilberichte. 1997. Т. 78, nr 3. С. 138–141.
6. Воробей В. В., Маркин В. Б. Основы технологии и проектирования корпусов ракетных двигателей: монография. Новосибирск : Наука, 2003. 164 с.
7. Колесников В. А. Анализ и разработка механизмов для формирования намоточных изделий заданной структуры : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2022. 121 с.
8. Сухотерин Л. Я. Разработка и исследование структур текстильных фильтров, применяемых при очистке воздуха и газов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 167 с.
9. Об использовании комплексных нитей для армирования волокнистых композиционных материалов, применяемых в нефтегазовой отрасли / М. И. Панин, В. М. Капустин, А. Е. Цимбалюк, Р. В. Хахимов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2021. № 6(396). С. 103–106.

REFERENCES

1. Panin M. I. Development of composite materials based on special purpose winding packs*. Dis. of a candidate of technical sciences. Moscow, 2012. 158 p. (In Russ.)
2. Palochkin S. V., Rudovskij P. N., Nuriev M. N. Methods and means of control of the main parameters of textile packages*. Moscow, Kosygin Russian St. Univ. Publ., 2006. 240 p. (In Russ.)
3. 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* [Bulletin of the Kostroma State Technological University]. 2005;11:27–30. (In Russ.)
4. Rudovsky P. N. Analysis of the winding structure during friction winding*. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Textile Industry Technology (Series Proceedings of Higher Educational Institutions)]. 1995;4(226):56–59. (In Russ.)
5. Rudovsky P. N. Control of package build in random winding. *Melliand Textilberichte*. 1997;78,3: 138–141.
6. Vorobej V. V., Markin V. B. Fundamentals of technology and design of rocket engine housings*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2003. 164 p. (In Russ.)
7. Kolesnikov V. A. Analysis and development of mechanisms for the formation of winding products of a given structure*. Dis. of a candidate of technical sciences. Saint Petersburg, 2022. 121 p. (In Russ.)
8. Sukhoterin L. Ya. Development and research of structures of textile filters used in the purification of air and gases*. Dis. of a candidate of technical sciences. Moscow, 2013. 167 p. (In Russ.)
9. Panin M. I., Kapustin V. M., Tsimbalyuk A. Ye., Khakimov R. V. The use of complex filaments for reinforcement of fibrous composite materials used in the oil and gas industry. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Textile Industry Technology (Series Proceedings of Higher Educational Institutions)]. 2021;6 (396):103–106. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 11.09.2022

Принята к публикации 7.10.2022

* Перевод названия источника выполнен авторами статьи / Translated by author's of the article.