

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗДЕЛИЙ ТЕКСТИЛЬНОЙ И ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Научная статья

УДК 677.024

EDN LHNQNK

<https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-3-69-27-32>

Михаил Иванович Панин

АО «НИИГрафит», г. Москва, Россия

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

О ПОРИСТОСТИ АРМИРУЮЩИХ СТРУКТУР КОНСТРУКЦИОННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ФОРМИРУЕМЫХ НАМОТКАМИ НИТЕЙ НА ОПРАВКИ

Аннотация. На физико-механические свойства композиционных материалов оказывают влияние не только состав и структура, но и различные дефекты, возникающие при производстве и эксплуатации элементов конструкций, изготовленных из них. Одним из основных дефектов, значительно влияющих на снижение прочности композиционных материалов, является пористость. Пористость армирующих структур композиционных материалов определяется степенью заполнения волокнистым наполнителем общего объема композита, что в свою очередь влияет на различные свойства материалов. Целью проводимых исследований является анализ свойств новых структур конструктивных композиционных материалов, формируемых различными видами намоток и нитей на оправки, расчет их пористости, а также исследование их свойств.

Ключевые слова: намотка, пористость, 3D-намотка, композит, текстильные структуры, прочность, связующее, армирование

Для цитирования. Панин М. И. О пористости армирующих структур конструктивных композиционных материалов, формируемых намотками нитей на оправки // Технологии и качество. 2025. № 3(69). С. 27–32. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-3-69-27-32>.

Original article

Mikhail I. Panin

NII Grafit, Moscow, Russia

ON THE POROSITY OF REINFORCING STRUCTURES OF STRUCTURAL COMPOSITE MATERIALS FORMED BY WINDING THREADS ON MANDRELS

Abstract. The physical and mechanical properties of composite materials are affected not only by their composition and structure, but also by various defects that arise during the production and operation of structural elements made from them. One of the main defects that significantly affects the reduction in the strength of composite materials is porosity. Porosity of the reinforcing structures of composite materials is determined by the degree of filling the total volume of the composite with fibrous filler, which in turn affects various properties of the materials. The purpose of the research is to analyse the properties of new structures of structural composite materials, formed by various types of windings and threads on mandrels, calculate their porosity and study their properties.

Keywords: winding, porosity, 3D winding, composite, textile structures, strength, binder, reinforcement

For citation: Panin M. I. On the porosity of reinforcing structures of structural composite materials formed by winding threads on mandrels. Technologies & Quality. 2025. No 3(69). P. 27–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-3-69-27-32>.

© Панин М. И., 2025

В настоящее время разработка новых конструктивных композиционных материалов, с предварительно задаваемыми свойствами (плотностью, пористостью, проницаемостью), является крайне важной для различных отраслей в жизнедеятельности людей задач.

Развитие теории наматывания нитей в мотальные паковки [1–3] позволило создать новые виды прецизионных структур намотки, которые положены в основу создания новых полимерных композиционных материалов с требуемыми свойствами по прочности и пористости. В текстильном материаловедении пористость определяет степень заполнения объема волокнистого состава материала порами, она влияет на такие свойства материала, как прочность, теплопроводность, коэффициент фильтрации, морозостойкость, звукопроницаемость и т. д.

Проникновение жидкостей и газов сквозь текстильную структуру изучено достаточно подробно, что и отмечалось в работах [4–6]. При точечной пропитке связующим нитей, армирующих композиты, или при использовании комплексных, или бикомпонентных, нитей создается не монолитная, а пористая структура, проникновение через которую жидкостей и газов может происходить как между несклеенными нитями, так и между волокнами нитей других систем, из которых изготовлены нити (т. е. по порам структуры армирующих материалов) [7–9]. В общем случае проницаемость формируемых текстильных перегородок определяется их структурой и зависит от ее пористости, которая, в свою очередь, определяется объемом пор в единице объема волокнистого состава материалов, армирующих композит (клеевого нетканого материала, намотки, многослойной ткани), которая может быть вычислена по формуле

$$P = \frac{V_{\text{пор}}}{V}, \quad (1)$$

где $V_{\text{пор}}$ – объем, занимаемый порами в общем объеме волокнистого армирующего компонента композиционного материала;

V – объем волокнистого состава материалов, армирующих композит, с учетом объема связующего, затраченного на точечную пропитку нитей.

Большой интерес для создания новых видов конструктивных композиционных материалов различного назначения представляют пористые текстильные армирующие структуры, формируемые намотками на оправки. При этом данные структуры могут формироваться как из

одиночных нитей (комплексных, или бикомпонентных), так и помощью 3D-намоток, в которых одновременно используются несколько систем нитей различного сырьевого состава, обладающих своими специфичными свойствами. Учитывая вышеизложенное, отметим, что пористость армирующих композиты текстильных материалов, формируемых намоткой одиночной нити на оправку (например, фильтровальной перегородки специального назначения), следует выражать через плотность намотки формируемой структуры и объемную плотность наматываемой нити. В этом случае пористость структур, формируемых одиночной нитью, определяется по формуле

$$P = 1 - \frac{\gamma}{\gamma_n}, \quad (2)$$

где γ – плотность намотки пористой перегородки, г/см³;

γ_n – плотность наматываемой нити, г/см³.

Из формулы (2) следует, что для увеличения или уменьшения пористости (а значит, и проницаемости) создаваемого конструкционного материала наполнителя композита, представляющего собой намотку нити (нитей) на оправку, необходимо уменьшать или увеличивать удельную плотность указанной намотки. Сделать это можно, изменяя коэффициент заполнения структуры намотки k_3 волокнистым материалом, который определяется по формуле

$$k_3 = \frac{\gamma}{\gamma_n}. \quad (3)$$

При этом следует отметить, что максимально возможное заполнение структуры композитов текстильным армирующим компонентом (минимальную пористость) обеспечивает намотка сомкнутой структуры, которая составляет постоянную величину коэффициента заполнения $k_3 = 0,785$, пористость такой структуры составит $P = 0,215$, независимо от вида используемых нитей [10].

Так, если в качестве пористой перегородки используется сомкнутая структура, то удельная плотность намотки будет иметь максимальное значение и определяться по формуле

$$\gamma = \frac{1}{c^2}, \quad (4)$$

где c – коэффициент, характеризующий объемную плотность (рыхлость) нити.

Для вязких нитей этот коэффициент определяют по формуле

$$c = \sqrt{\frac{4}{\pi \gamma_n}} = \sqrt{\frac{4}{3,14 \cdot 1,52}} = 0,91. \quad (5)$$

Тогда удельная плотность сомкнутой намотки из вязких нитей составит

$$\gamma_c = \frac{1}{c^2} = \frac{1}{0,91^2} = 1,2. \quad (6)$$

Коэффициент заполнения сомкнутой намотки:

$$k_3 = \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = \frac{1,2}{1,52} = 0,784. \quad (7)$$

Пористость сомкнутой намотки:

$$P = 1 - k_3 = 1 - 0,784 = 0,216. \quad (8)$$

Фактическое значение удельной плотности сомкнутой намотки из вязких нитей составило $\gamma_c = 1,2 \text{ г/см}^3$. Пористость структуры такой намотки, определяемая по формуле (2), очень мала и составляет $P \approx 0,2\%$. Очевидно, что такая низкая пористость препятствует проникновению в толщу намотки связующих смол и, следовательно, возникает вопрос, возможно ли увеличить пористость такой структуры при сохранении характера взаимного расположения витков в объеме паковки? Проведенные исследования структур сомкнутых намоток показали, что и при сомкнутой (высокоплотной) структуре намотки можно варьировать значение пористости путем частичного «размыкания» витков намотки, формируя «квазисомкнутые» (приближенно сомкнутые) структуры намоток. К таким структурам намоток следует отнести те сомкнутые намотки, в которых размеры пор не превышают значения условного диаметра нитей, из которых они формируются. На рисунке 1 показана фотография «квазисомкнутой» структуры намотки, сформированной из вязких мультифиламентных нитей линейной плотностью $T = 184 \text{ текс}$.

На рисунке 1 видны минимальные размеры пор между витками нитей, тем не менее удельная плотность данной структуры намотки составляет $\gamma = 1,04 \text{ г/см}^3$, коэффициент заполнения квазисомкнутой намотки $k_3 = 0,68$, а пористость данной структуры $P = 0,32$, т. е. она возросла, по сравнению с сомкнутой намоткой, до $5,3\%$.



Рис. 1. «Квазисомкнутая» структура намотки

Степень «размыкания» витков в структуре сомкнутой намотки можно регулировать изменением величины передаточного отношения между нитераскладчиком и мотальной паковкой с помощью коноидного вариатора. Однако для сохранения стабильных размеров пор в структуре намотки требуется жесткая передача. К мотальным паковкам с постоянными размерами пор относятся такие структуры намоток, как замкнутые, с различной степенью замыкания, спиралевидные и их производные. Данные структуры имеют меньшую удельную плотность намотки γ , по сравнению с сомкнутой намоткой, поэтому они имеют большую пористость и проницаемость. Плотность намоток замкнутой и спиралевидной структур зависит от степени замыкания намотки p . Таким образом, выбирая требуемую степень замыкания намотки p , можно задавать расчетным путем размеры пор в армирующей структуре, т. е. проектировать ее пористость, а следовательно, и требуемое значение коэффициента заполнения композита армирующим компонентом, т. е. пористость и прочностные параметры. Чем выше коэффициент заполнения армирующих композиционных материалы структур намотки (чем больше число нитей в шаге намотки), тем выше их прочность [11].

Наиболее наглядно пористость намоточных структур демонстрируют замкнутые намотки. В данном случае форма и размеры пор представляют собой параллелограммы, причем малая диагональ параллелограмма f остается неизменной, а большая b увеличивается с ростом диаметра намотки мотальной паковки D . На рисунке 2 показана фотография 23-замкнутой намотки.



Рис. 2. Структура 23-замкнутой намотки полипропиленовых нитей

Исследование различных структур замкнутых намоток показывает, что с возрастанием p число пор (сот) в структуре намотки возрастает, а их базовые размеры уменьшаются. Для определения размеров пор (сот) в структуре намоток рассмотрим рисунок 3.

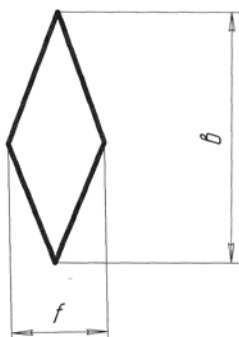


Рис. 3. Размеры пор (ячеек) в замкнутой (сотовой) структуре намоток

Размеры пор в структуре замкнутых намоток, показанные на рисунке 3, определяются по формуле

$$b = \frac{\pi D}{p}, \quad (9)$$

где D – диаметр намотки мотальной паковки;
 p – степень замыкания намотки.

Ширина ячейки, измеренная в меридианном (осевом) направлении:

$$f = \frac{2H}{k_{i_0} p}, \quad (10)$$

где i_0 – общее передаточное отношение между веретеном и кулачком раскладчика нити.

Для подтверждения сделанных заключений были проведены исследования и расчеты пористости структур замкнутых намоток с различной степенью замыкания. Результаты проведенных исследований (табл.) выявили зависимость пористости Π структур замкнутых намоток от степени замыкания p и коэффициента

заполнения структур волокнистым материалом k_z из вискозных (п/п) нитей линейной плотностью $T = 184$ текс.

Т а б л и ц а

Результаты исследования

p	$\gamma, \text{г/см}^3$	k_z	Π
3	0,28	0,184	0,816
6	0,30	0,197	0,8
9	0,32	0,21	0,79
12	0,45	0,3	0,7
18	0,6	0,4	0,6
23	1,08	0,71	0,29
Квазисомкнутая намотка	1,2	0,68	0,32
Сомкнутая намотка	1,04	0,784	0,216

На рисунке 4 приведен график зависимости пористости Π замкнутых намоток от их степени замыкания p .

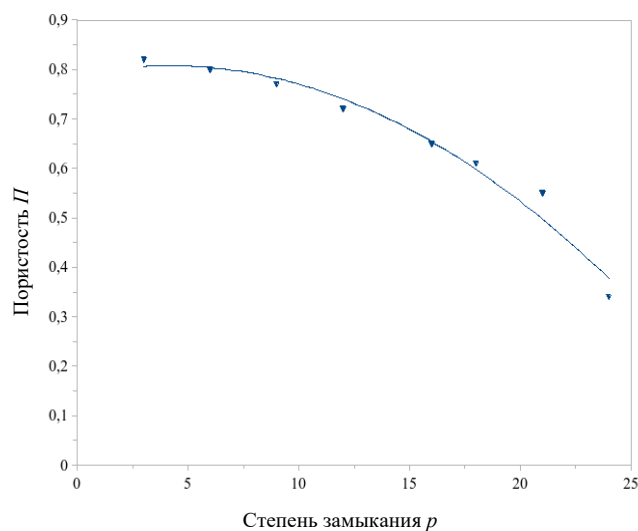


Рис. 4. Зависимость пористости замкнутых намоток от степени их замыкания

Из графика, приведенного на рисунке 4, видно, что с увеличением степени замыкания намоток p замкнутых структур их пористость снижается.

Точки на графике соответствуют значениям пористости в зависимости от степени замыкания конкретной намотки, а аппроксимирующая кривая (сплошная линия) обобщает закономерность изменения пористости замкнутых намоток от степени их замыкания. Из таблицы видно, что замкнутые намотки малой степени замыкания имеют большие поры и малый коэффициент заполнения намоток. Напротив, при повышении степени замыкания пористость замкнутых намоток снижается, а следовательно, варьируя значение p (степени замыкания замкнутых намоток), можно получать структуры

с требуемой пористостью и проницаемостью (требуемыми значениями размеров пор).

Очевидно, что пористость структур, формируемых 3D-намотками из нескольких систем нитей, будет определяться аналогично, но с учетом их количества и долевого содержания нитей каждой из используемых систем в общем объеме создаваемого материала, т. е. путем определения коэффициентов заполнения объема композита нитями каждой системы. Данная работа требует дальнейшего развития и проведения дополнительных исследований.

Исследования пористости различных структур намоток позволили разработать волокнистые композиционные фильтры, армированные комплексными нитями, устойчивыми к воздействию агрессивных сред, необходимые для применения в нефтегазовой отрасли и создания систем экологической безопасности людей, что отражено в работах [12, 13].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Панин И. Н. Разработка и исследование структур текстильных паковок специального назначения : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1996. 31 с.
2. Рокотов Н. В. Теоретические основы разработки намоточных механизмов для получения изделий с заданными свойствами и структурами : дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2018. 326 с.
3. Рудовский П. Н. Теоретические основы формирования технологической оценки паковок при фрикционном наматывании : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Кострома, 1996. 32 с.
4. Пути совершенствования пористых перегородок воздушных фильтров из текстильных материалов / С. Д. Николаев, М. И. Панин, О. В. Кашеев, И. В. Рыбаулина // Известия вузов. Технология текстильной промышленности 2018. № 5(377). С. 255–258.
5. Calculation of the loads on composite materials formed by winding / O. V. Kashcheev, N. A. Nikolaeva, M. I. Panin, S. V. Knyaz'kin, S. Y. Krotov // Fibre Chemistry. 2014. Vol. 46, No 2. P. 122–125.
6. Тимусяк С. Ю., Рудовский П. Н. Влияние диаметра наматывания на гидравлическое сопротивление паковок крестовой намотки // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2011. № 5(334). С. 71–74.
7. Рудовский П. Н. Анализ структуры намотки при фрикционном наматывании // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 1995. № 4(226). С. 56–59.
8. Rudovsky P. N. Control of package build in random winding // Melland Textilberichte. 1997. Vol. 78, No 3. С. 138–141.
9. Рудовский П. Н. Влияние взаимодействий витков на процесс раскладки // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 1995. № 5(227). С. 43.
10. Расчет коэффициента заполнения структур композитных материалов текстильным армирующим компонентом / М. И. Панин, И. Н. Панин, С. Д. Николаев, А. С. Николаев, И. М. Гаврилова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2013. № 1(343). С. 73–78.
11. Николаев С. Д., Панин М. И., Панин И. Н. Исследование прочностных характеристик мотальных паковок специального назначения с помощью разверток // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2010. № 8(329). С. 40–44.
12. Использование различных текстильных фильтров, применяемых при очистке воздуха и газов от пыли / С. Д. Николаев, И. Н. Панин, М. И. Панин, И. В. Рыбаулина // Дизайн и технологии. 2018. № 66(108). С. 84–88.
13. Об использовании комплексных нитей для армирования волокнистых композиционных материалов, применяемых в нефтегазовой отрасли / М. И. Панин, В. М. Капустин, А. Е. Цимбалюк, Р. В. Хакимов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности 2021. № 6(396). С. 103–106.

ВЫВОДЫ

1. Разработка новых конструкционных композиционных материалов с задаваемыми свойствами (пористостью, проницаемостью, прочностью) является крайне важной задачей, решение которой возможно за счет использования различных структур, в том числе 3D-намоток, формируемых одновременно несколькими системами нитей разной природы и сырьевого состава.

2. Пористость армирующих структур композиционных материалов, формируемых намотками нитей на оправки, можно проектировать расчетным путем, за счет выбора вида нитей, их сырьевого состава и структур намотки с требуемой степенью замыкания.

3. При точечной пропитке связующим нитей, армирующих композиты, или при использовании комплексных нитей создается не монолитная, а пористая структура композиционного материала, которая благодаря свойствам применяемых нитей может использоваться в различных отраслях промышленности.

REFERENCES

1. Panin I. N. Development and study of structures of special-purpose textile packages. Abstract of Doct. techn. sci. dis. Moscow, 1996. 31 p. (In Russ.)
2. Rokotov N. V. Theoretical foundations of the development of winding mechanisms for obtaining products with specified properties and structures. Doct. techn. sci. dis. Saint Petersburg, 2018. 326 p. (In Russ.)
3. Rudovsky P. N. Theoretical foundations of the formation of a technological assessment of packages during friction winding. Abstract of Doct. techn. sci. dis. Kostroma, 1996. 32 p. (In Russ.)
4. Nikolaev S. D., Panin M. I., Kashcheev O. V., Rybaulina I. V. Ways to improve porous partitions of air filters made of textile materials. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology] 2018;5(377):255–258. (In Russ.)
5. Kashcheev O. V., Nikolaeva N. A., Panin M. I., Knyaz'kin S. V., Krotov S. Y. Calculation of the loads on composite materials formed by winding. *Fibre Chemistry*. 2014;46,2:122–125.
6. Timusyak S. Yu., Rudovsky P. N. Effect of winding diameter on the hydraulic resistance of cross-wound packages. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 2011;5(334):71–74. (In Russ.)
7. Rudovsky P. N. Analysis of the winding structure during friction winding. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 1995;4(226):56–59. (In Russ.)
8. Rudovsky P. N. Control of package build in random winding. *Melliand Textilberichte*. 1997;78,3:138–141.
9. Rudovsky P. N. Influence of Coil Interactions on the Laying Out Process *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 1995;5(227):43. (In Russ.)
10. Panin M. I., Panin I. N., Nikolaev S. D., Nikolaev A. S., Gavrilova I. M. Calculation of the Filling Factor of Composite Material Structures with a Textile Reinforcing Component *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 2013;1(343):73–78. (In Russ.)
11. Nikolaev S. D., Panin M. I., Panin I. N. Study of strength characteristics of special-purpose winding packages using reamers. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 2010;8(329):40–44. (In Russ.)
12. Nikolaev S. D., Panin I. N., Panin M. I., Rybaulina I. V. Use of various textile filters used in cleaning air and gases from dust. *Dizajn i texnologii* [Design and Technology]. 2018;66(108):84–88. (In Russ.)
13. Panin M. I., Kapustin V. M., Tsybalyuk A. E., Khakimov R. V. On the use of complex yarns for reinforcing fibrous composite materials used in the oil and gas industry *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 2021;6(396):103–106. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 30.07.2025
Принята к публикации 09.09.2025