

Воздухопроницаемость композиционных материалов, армированных нетканым иглопробивным полотном

The breathability of composite materials reinforced with non-woven needle-punched fabric

В.К. НГУЕН¹, О.В. КОЖЕВНИКОВА¹, А.В. ДЕДОВ²

V.K. NGUYEN¹, O.V. KOZHEVNIKOVA¹, A.V. DEDOV²

¹ Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, Москва, Россия

² Московский политехнический университет, Москва, Россия

¹ A.N. Kosygin Russian State University, Moscow, Russia

² Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

dedovs55@rambler.ru

Исследована зависимость коэффициента проницаемости по воздуху от степени пропитки композиционных материалов, полученных пропиткой высокопористого нетканого иглопробивного полотна водной дисперсией полиуретана. Образцы композиционных материалов получены методом пропитки полотна без отжима между валами каландра. Избыток дисперсии удаляли при свободном стекании из образца на сетке. Коэффициент проницаемости увеличивается при возрастании степени пропитки от 0 до 0,6 и снижается при степени пропитки больше 0,6. Рост воздухопроницаемости композиционных материалов связали с фиксацией волокон частицами полиуретана. Методом электронной микроскопии исследована структура композиционных материалов со степенью пропитки 0,60 и 1,32.

Ключевые слова: нетканое иглопробивное полотно, водная дисперсия полиуретана, композиционный материал, воздухопроницаемость

The dependence of the air permeability coefficient on the degree of impregnation of composite materials obtained by impregnating highly porous non-woven needle-punched fabric with an aqueous dispersion of polyurethane has been studied. Samples of composite materials were obtained by impregnating the fabric without squeezing between the calender rolls. Excess dispersion was removed by free flow from the sample on a grid. The permeability coefficient increases with the degree of impregnation from 0 to 0.6 and decreases with the degree of impregnation greater than 0.6. The increase in breathability of composite materials was associated with the fixation of fibers by polyurethane particles. The structure of composite materials with impregnation degrees of 0.60 and 1.32 was studied using electron microscopy.

Keywords: nonwoven needle-punched cloth, water dispersion of polyurethane, composite material, air permeability

DOI: 10.35164/0554-2901-2026-02-34-37

Нетканые иглопробивные полотна, которые используются для тепло- [1–3], звукоизоляции [4–6] и фильтрации газовоздушных выбросов [7–9], должны обладать высокой воздухопроницаемостью и достаточными для практического применения механическими свойствами, которые не достигаются при использовании стандартной технологии изготовления полотен. Композиционные материалы с требуемым комплексом физико-механических свойств получают при пропитке полотен водными дисперсиями полиуретанов [10, 11]. Производство пористых материалов достигается при относительно небольшой степени пропитки и использовании высокопористых полотен.

Стандартная технология пропитки включает протаскивание полотна через пропиточную ванну, отжим полотна между валами каландра для удаления избыточной дисперсии и тепловую обработку пропитанных полотен. Механические воздействия на полотно, возникающие на различных стадиях стандартной технологии пропитки, ограничивают применение высокопористых полотен с относительно низкими механическими свойствами [12–14]. Для получения пористых композиционных материалов предлагается использовать метод, связанный с погружением в дисперсию полиуретана высокопористого полотна в свободном состоянии и исключение последующего отжима пропитанного полотна между валами каландра. Определение зависимости воздухопроницаемости композиционных материалов от степени пропитки и коэффициента пористости является целью работы.

В качестве объекта исследования использовали образцы композиционных материалов, полученных пропиткой образцов нетканого иглопробивного полотна из полиэтилентерефталатных волокон линейной плотности 0,33 текс (диаметром 20–25 мкм) производства ОАО «Могилевхимволокно», Республика Беларусь, по ТУ ВУ

700117487.067–2018. Волокнистый холст получали механическим способом формирования и упрочняли при плотности основного прокальвания 140 см² и глубине прокальвания 6 мм. Поверхностная плотность полотна составляла 320 ± 20 г/м², толщина 4,2 ± 0,4 мм, плотность 72 ± 6 кг/м³ и коэффициент пористости 0,94. Плотность образцов нетканых полотен определяли делением массы образца на его объем, точность определения длины и ширины образцов составляла ±0,5 мм, точность измерения толщины под давлением 10 кПа составляла ±0,01 мм. Плотность волокон устанавливали согласно требованиям ОФС.1.1.2.0009 «Определение плотности полимерных материалов», которая заключается в измерении массы образца полотна на воздухе и при погружении в жидкости, в качестве которой использовали 5 масс.% раствор этилового спирта в воде.

Для пропитки образцов полотна использовали водную дисперсию анионно-стабилизированного ароматического полиуретана марки Аквапол-11 (АКВ-11) производства ООО «НПП «Макромер» им. В.С. Лебедева» (г. Владимир) с концентрацией полимера 40 ± 2 масс.%. Основные свойства дисперсии АКВ-11 исследованы в работе [15].

Образцы полотна размером 18×18 см погружали в емкость, заполненную водной дисперсией полиуретана комнатной температуры, и выдерживали в дисперсии в течение 15–20 мин. Степень пропитки полотна регулировали разбавлением исходных дисперсий дистиллированной водой. После извлечения из емкости образцы выдерживали на металлической сетке до полного стекания избыточной дисперсии с последующей тепловой обработкой при температуре 140°C до постоянной массы образцов.

Степень пропитки полотна (C_M , отн. ед.) рассчитывали из уравнения:

$$C_M = \frac{m_1 - m}{m}, \quad (1)$$

где m_1 и m – масса образцов полотна после и до пропитки соответственно, кг.

Массу образцов полотна и композиционных материалов определяли при использовании электронных весов с точностью $\pm 0,002$ г, толщину – по ГОСТ 12023–93 с применением толщиномера по ГОСТ 11358–70 с ценой деления 0,01 мм. Относительная ошибка определения массы образцов композиционных материалов не превышала $\pm 8\%$.

Длину и ширину образцов определяли с точностью $\pm 0,5$ мм. Толщину образцов, которая, в основном, влияла на точность определения плотности композиционных материалов, измеряли в шести равномерно удаленных друг от друга точках на поверхности образцов размером 18×18 см. Максимальная относительная ошибка определения толщины и, соответственно, плотности композиционных материалов составляла $\pm 9\%$.

Коэффициент пористости (δ , отн. ед.) образцов полотна и композиционных материалов рассчитывали из уравнений (2) и (3) соответственно:

$$\delta = \rho_0 / \rho_f \quad (2)$$

$$\delta = 1 - \frac{m_f / \rho_f + m_{py} / \rho_{py}}{V}, \quad (3)$$

где ρ_0 – плотность образцов полотна, $\text{кг}/\text{м}^3$; m_f – масса волокон, кг, которая соответствовала массе образца полотна до пропитки; ρ_f – плотность полиэтилентерефталатного волокна, $\text{кг}/\text{м}^3$, равная $1370 \text{ кг}/\text{м}^3$; m_{py} – масса полиуретана в образцах композиционных материалов, кг, которую определяли как $(m_1 - m)$ (уравнение (1)); ρ_{py} – плотность полиуретана, $\text{кг}/\text{м}^3$, равная $920 \text{ кг}/\text{м}^3$; V – объем образцов композиционных материалов, м^3 .

Воздухопроницаемость образцов полотна и композиционных материалов определяли согласно требованиям ГОСТ 12.088–77 при использовании прибора FF-12/A (Великобритания) и постоянном давлении воздуха, равном 49 Па. Воздухопроницаемость образцов оценивали коэффициентом проницаемости, который рассчитывается из линейного закона Дарси и позволяет учесть влияние переменной толщины композиционных материалов на воздухопроницаемость [16, 17]:

$$w = K \frac{\Delta P}{\eta d}, \quad (4)$$

где w – скорость фильтрации воздуха, $\text{м}/\text{с}$; K – коэффициент проницаемости, м^2 ; ΔP – перепад давления воздуха, Па; d – толщина образцов полотна и композиционных материалов, м; η – вязкость воздуха, Па·с, равная $1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с.

Относительная ошибка определения коэффициента проницаемости композиционных материалов не превышала $\pm 6\%$.

Зависимости коэффициента проницаемости образцов композиционных материалов от степени пропитки и коэффициента пористости представлены на рис. 1 и рис. 2 соответственно.

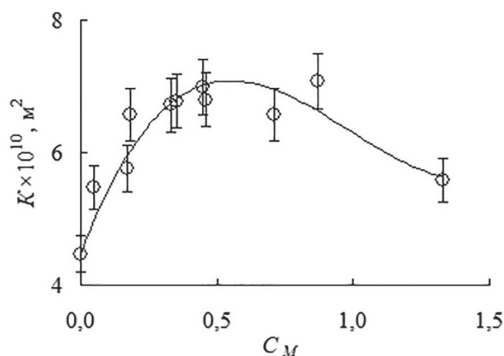


Рис. 1. Зависимость коэффициента проницаемости композиционных материалов от степени пропитки (при $C_M = 0$ показатель коэффициента проницаемости полотна без пропитки).

Из зависимостей K от C_M (рис. 1) и δ (рис. 2) следует, что по сравнению с коэффициентом проницаемости полотна коэффициент проницаемости композиционных материалов увеличивается при возрастании степени пропитки от 0 до 0,6 или снижении коэффи-

циента пористости от 0,94 до 0,91. При $C_M = 0,6$ ($\delta = 0,91$) получен композиционный материал с максимальным коэффициентом проницаемости, равным $7,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$, который в 1,75 раза превышает коэффициент проницаемости полотна ($4,29 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$), использованного для пропитки. Дальнейшее возрастание степени пропитки и уменьшение коэффициента пористости приводит к снижению коэффициента проницаемости (рис. 1 и рис. 2).

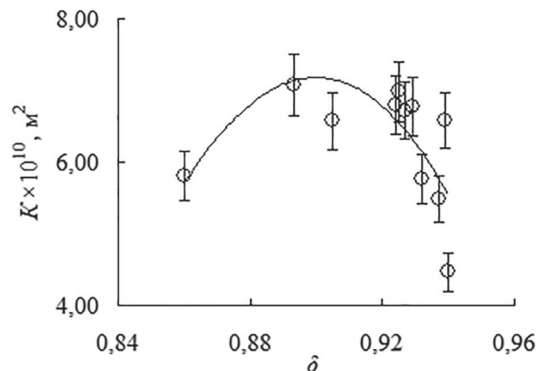


Рис. 2. Зависимость коэффициента проницаемости композиционных материалов от коэффициента пористости (коэффициент пористости полотна равен 0,94).

Авторами статьи установлено, что в начальный момент испытаний образцов полотна коэффициент проницаемости уменьшается при увеличении продолжительности измерений. Постоянное значение коэффициента проницаемости достигается через определенное время испытаний.

Для образцов композиционных материалов продолжительность испытаний практически не влияет на результаты определения коэффициента проницаемости. Относительно небольшое давление воздуха, равное 49 Па, ограничивает значительное сжатие полотна и уменьшение пористости, что могло бы привести к снижению коэффициента проницаемости на начальной стадии испытаний. Зависимость коэффициента проницаемости полотна от времени измерений определяется тем, что под действием потока воздуха волокна перемещаются из мелких пор в крупные поры. Следствием заполнения крупных пор волокнами является увеличение сопротивления движению потока воздуха, что отражается снижением коэффициента проницаемости в течение начального периода испытаний.

При относительно небольшой степени пропитки композиционных материалов (в зависимости от плотности полотна, менее 0,3–0,5), полученных при использовании стандартной технологии, на поверхности волокон из частиц полиуретана образуются оболочки, которые увеличивают жесткость волокон со снижением их подвижности. При более высокой степени пропитки (более 0,3–0,5) волокна соединяются мостиками из частиц полиуретана, которые также снижают подвижность волокон [18, 19].

Следствием фиксации положения волокон композиционных материалов является сохранение пористой структуры на различных стадиях испытаний, что ограничивает влияние продолжительности процесса на величину коэффициента проницаемости. Кроме того, фиксация волокон объясняет получение композиционных материалов с повышенным относительно полотна коэффициентом проницаемости (рис. 1 и рис. 2).

В работах авторов статей [18, 19] установлена возможность изменения объема полотна в процессе стандартной пропитки, что также может влиять на формирование пористой структуры и воздухопроницаемость композиционных материалов. Подход к определению изменения объема полотен в процессе стандартной пропитки водными дисперсиями полиуретанов основан на определении величины безразмерного коэффициента уравнений, описывающих зависимости $(p/p_0 - 1)$ от C_M (где p – плотность образцов композиционных материалов). Особенностью зависимостей в данной системе координат является то, что при условии $C_M = 0$ выполняется $(p/p_0 - 1) = 0$ и зависимости $(p/p_0 - 1)$ от C_M выходят из начала координат. Это повышает точность построения зависимостей в предложенной системе координат [18, 19].

Зависимость $(p/p_0 - 1)$ от C_M для образцов композиционных материалов, полученных пропиткой полотна в свободном состоянии и без отжима между валами каландра, представлена на рис. 3.

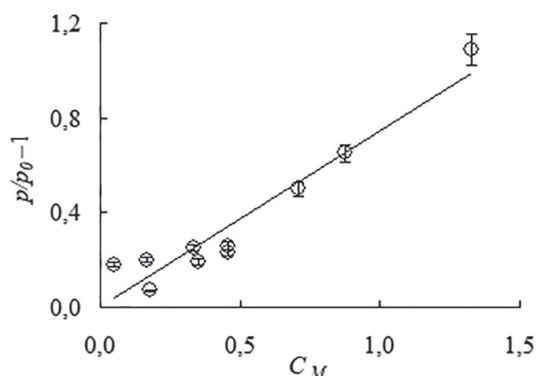


Рис. 3. Зависимость параметра $(p/p_0 - 1)$ от степени пропитки полотна.

Зависимость на рис. 3 описывается уравнением общего вида:

$$p/p_0 - 1 = k_p \cdot C_M, \quad (5)$$

В уравнении (5) $k_p = 0,75$. Выполнение условия $k_p < 1$ свидетельствует о возрастании объема полотна в процессе его пропитки в свободном состоянии и без отжима. При сохранении объема полотна выполняется условие $k_p = 1$, а при снижении объема – $k_p > 1$ [18, 19].

Выполнен расчет плотности композиционного материала с оптимальной степенью пропитки, равной 0,6 (p , кг/м³), при которой получен композиционный материал с максимальным коэффициентом проницаемости (рис. 1), и теоретической плотности (p_T , кг/м³), которую имел бы композиционный материал при условии сохранения объема полотна в процессе пропитки без отжима ($k_p = 1$). Получили, что $p = 104$ кг/м³, а $p_T = 115$ кг/м³.

Из отношения p_T/p , приблизительно равного 1,1, следует, что при оптимальной степени пропитки объем полотна возрастает примерно на 10% и не может существенно влиять на коэффициент проницаемости. Поэтому увеличение коэффициента проницаемости композиционных материалов, полученных при изменении степени пропитки от 0 до 0,6, является следствием фиксации положения волокон, количество которых возрастает с ростом степени пропитки.

Микрофотографии поперечного среза композиционных материалов с оптимальной и максимальной степенью пропитки представлены на рис. 4.

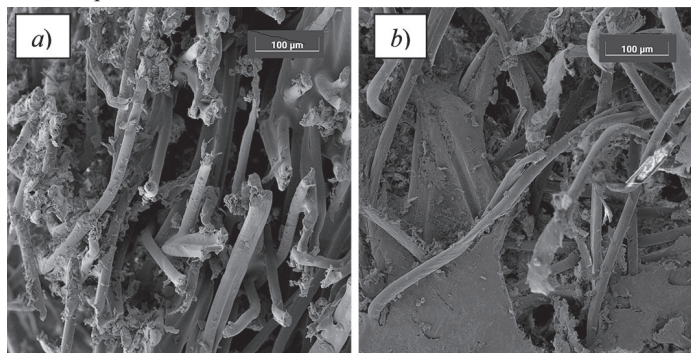


Рис. 4. Микрофотографии поперечного среза образцов композиционных материалов со степенью пропитки 0,6 (а) и 1,32 (б).

Из рис. 4 следует, что при оптимальной степени пропитки получен композиционный материал, в котором волокна соединены между собой только в местах точечных контактов. Относительно небольшая поверхность волокон покрыта частицами полиуретана, которые не образуют сплошных оболочек. Следствием соединения волокон в местах точечных контактов и распределения частиц полиуретана на поверхности волокон является значительный объем порового пространства между волокнами, доступного для фильтрации воздуха (рис. 4а).

Возрастание коэффициента проницаемости при увеличении степени пропитки от 0 до 0,6 является следствием технологии получения образцов композиционных материалов, степень пропитки которых регулировали разбавлением исходной дисперсии. Для получения образцов с $C_M < 0,6$ использовали разбавленные дисперсии с относительно небольшим содержанием полиуретана, концентрация которого влияет на вязкость дисперсии, определяющей её

способность в процессе стекания из полотна удерживаться между волокнами.

При использовании разбавленных и низковязких дисперсий они удерживаются в местах непосредственного контакта волокон друг с другом. Увеличение концентрации полиуретана приводит к тому, что дисперсии удерживаются между волокнами, расположенными на относительно большом расстоянии друг от друга, что увеличивает количество фиксированных волокон и определяет постоянное возрастание коэффициента проницаемости при увеличении степени пропитки от 0 до 0,6.

При увеличении степени пропитки выше 0,6 пространство между волокнами начинает заполняться частицами полиуретана, которые образуют сплошную пленку между волокнами (рис. 4б), что отражается в снижении коэффициента проницаемости относительно показателя материала с оптимальной степенью пропитки, равной 0,6.

Выводы

- при пропитке высокопористого нетканого иглопробивного полотна плотностью 72 кг/м³ и коэффициентом пористости 0,94 водной дисперсией Аквапол-11 (в свободном состоянии и без отжима) получены пористые композиционные материалы, коэффициент проницаемости которых при степени пропитки менее 1,32 превышает коэффициент проницаемости полотна;
- при степени пропитки, равной 0,6, получен композиционный материал с коэффициентом пористости 0,91 и максимальным коэффициентом проницаемости $7,5 \times 10^{-10}$ м², который в 1,75 раза превышает коэффициент проницаемости полотна;
- проницаемость нетканого иглопробивного полотна зависит от подвижности волокон под действием потока воздуха; для композиционных материалов подвижность волокон снижается за счет фиксации волокон в местах их контакта между собой частицами полиуретана;
- уменьшение коэффициента проницаемости композиционных материалов со степенью пропитки большей 0,6 является следствием заполнения пространства между волокнами частицами полиуретана.

Литература

1. Hadded A., Bentoufa S., Fayala F. Thermo physical characterisation of recycled textile materials used for building insulating // J. Build. Eng. 2016. V. 5, N1. P. 34–40. DOI: 10.1016/j.jobte.2015.10.007.
2. Venkataraman M., Mishra R., Miltky J., Bijoya M., Bijoya K.B. Modelling and simulation of heat transfer by convection in aerogel treated nonwovens // J. Textil. Instit. 2016. V. 108, N8. P. 1–12. DOI: 10.1080/00405000.2016.1255124.
3. Wazna M.E., Gounni A., Abdeslam E.B., Cherkaoui O. Development, characterization and thermal performance of insulating nonwoven fabrics made from textile waste // J. Indust. Textil. 2019. V. 48, N7. P. 1167–1185. DOI: 10.1177/1528083718757526.
4. Kucuk M., Korkmaz Y. Sound absorption properties of bilayered nonwoven composites // Fibers Polym. 2015. V. 16, N4. P. 941–948. DOI: 10.1007/s12221-015-0941-9.
5. Yang Y., Chen Z., Chen Z., Fu R., Li Y. Sound insulation properties of sandwich structures on glass fiber felts // Fibers Polym. 2015. V. 16, N7. P. 1568–1577. DOI: 10.1007/s12221-015-5200-6.
6. Murugan T., Ramesh V., Manickam K., Sundararajan P. A Study on the Effect of Natural Regenerated and Synthetic Non-woven Fabric Properties on Acoustic Applications // J. Natural Fibers. 2021. V. 19, N2. P. 1–11. DOI: 10.1080/15440478.2021.1929645.
7. Brochocka A. Filtration properties of nonwoven structures with superabsorbents for respiratory protective devices // Fibres and Textiles in Eastern Europe. 2017. V. 25, N3. P. 62–67. DOI: 10.5604/12303666.1237232.
8. Makarov B.P., Shablygin M.V., Matrokhin A.Yu., Mikhailova M.P. Method for Producing Nonwoven Fabrics Based on Arcelon Fibre for Filtering Air Mixtures // Fibre Chem. 2022. V. 53, N4. P. 1–3. DOI: 10.1007/s10692-022-10286-6.
9. Datta M., Chatterjee B., Chatterjee B., Ray P. Air Resistivity Model Of Jute Needled Nonwoven // J. Natural Fibers. 2022. V. 19, N2. P. 1–15. DOI: 10.1080/15440478.2021.2018085.
10. Wang L., Xu F., Li H., Liu Y., Liu Y. Preparation and stability of aqueous acrylic polyol dispersions for two-component waterborne polyurethane // J. Coatings Technol. Res. 2017. V 14, N1. P. 215–223. DOI: 10.1007/s11998-016-9845-x.

11. Arshad N., Zia K.M., Hussain M.T., Zuber M., Arshad M.M. Synthesis of novel curcumin-based aqueous polyurethane dispersions for medical textile diligences with potential of antibacterial activities // *Polym. Bulletin*. 2022. V. 79, N10. P. 7711–7727. DOI: 10.1007/s00289-021-03871-y.
 12. Senthil K.P., Punitha V. An Overview of Nonwoven Product Development and Modelling of Their Properties // *J. Textile Sci. Eng.* 2017. V. 7, N4. P. 1–6. DOI: 10.4172/2165-8064.1000310.
 13. Dedov A.V., Roev B.A., Bobrov V.I., Nazarov V.G. Mechanism of Stretching and Breaking of Needle-Punched Nonwovens // *Fibre Chem.* 2018. V. 49, N5. P. 334–337. DOI: 10.1007/s10692-018-9893-3.
 14. Nazarov V.G., Dedov A.V., Evdokimov A.G. Nonwoven needle-punched materials with high tensile strength // *Fibre Chem.* 2022. V. 54, N4. P. 248–251. DOI: 10.1007/s10692-023-10387-w.
 15. Евсюкова Н.В., Коваленко Г.М., Бокова Е.С. Исследование полиуретановых водных дисперсий марки Аквапол® для производства искусственных кож // *Пластические массы*. 2021. №5–6. С. 36–39.
 16. Yang T., Xiong X., Mishra R., Novák J. Investigation on Acoustic Behavior and Air Permeability of Struto Nonwovens // *Fibers Polym.* 2016. V. 17, N12. P. 2078-2084. DOI 10.1007/s12221-016-6967-9.
 17. Pradhan A.K., Das D., Rabisankar C., Sidh N.S. Studies on air permeability of multi-constituent nonwovens // *J. Textil. Institute*. 2016. V. 108, N5. P. 1–6. DOI: 10.1080/00405000.2016.1191720.
 18. Асметков И.Д., Годин Н.И., Дедов А.В. Влияние режимов пропитки на пористую структуру композиционных материалов с волокнистым наполнителем из полипропиленовых волокон // *Пластические массы*. 2024. №5–6. С. 19–22.
 19. Kozhevnikova O.V., Bokova E.S., Dedov A.V., Ivanov L.A. Construction heat and sound insulating composite materials with high tensile strength // *Nanotechnologies in Construction A Scientific Internet-Journal*. 2024. V. 16, N1. P. 22–31. DOI: 10.15828/2075-8545-2024-16-1-22-31.
-