УДК 677.529

Твердость обработанного нетканого иглопробивного полотна на основе смеси синтетических волокон

Hardness of treated non-woven needle-punched fabric based on a mixture of synthetic fibers

Н.И. ГОДИН, В.Г. НАЗАРОВ, А.В. ДЕДОВ

N.I. GODIN, V.G. NAZAROV, A.V. DEDOV

Московский политехнический университет, г. Москва, Россия

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

dedovs55@rambler.ru

Исследовано влияние режимов обработки нетканого иглопробивного полотна на основе смеси полиэтилентерефталатных и бикомпонентных волокон в отношении 70/30 масс.% на твердость материалов, предназначенных для полирования полимеров, стекол и керамики. Полотно обрабатывали на специальном устройстве, при использовании которого термомеханическое воздействие на полотно достигается в зазоре между нагретым валом и транспортерной лентой с регулированием толщины прогрева и получением материалов с градиентом плотности упаковки волокон по толщине. Предложена модель для прогнозирования твердости материалов, полученных при варьировании скорости обработки и температуры вала. Установлена связь между структурой полотна и обработанных материалов и твердостью.

Ключевые слова: твердость, нетканое полотно, полиэтилентерефталатные и бикомпонентные волокна, обработка, моделирование

The effect of processing modes of non-woven needle-punched fabric based on a mixture of polyethylene terephthalate and bicomponent fibers in a ratio of 70/30 wt.% on the hardness of materials intended for polishing polymers, glass and ceramics was studied. The fabric was processed on a special device, in which thermomechanical effect on the fabric is achieved in the gap between the heated roll and the conveyor belt with regulation of the heating thickness and obtaining materials with a gradient of fiber packing density by thickness. A model is proposed to predict the hardness of materials obtained by varying the processing speed and roll temperature. A relationship between the structure of the fabric and processed materials and their hardness is established.

Keywords: hardness, nonwoven fabric, polyethylene terephthalate and bicomponent fibers, processing, modeling

DOI: 10.35164/0554-2901-2025-02-42-45

Введение

Использование для полирования полимеров, стекол, лакокрасочных покрытий и т.д. [1–4] высокопористых нетканых иглопробивных полотен [5–8] из синтетических волокон ограничено недостаточными для практического использования механическими свойствами и относительно небольшой твердостью. Стандартный метод получения полотен с повышенными механическими свойствами заключается в термомеханической обработке на валковом оборудовании полотен на основе смесей синтетических волокон с различной температурой плавления. Обычно для обработки используются полотна на основе смеси высокоплавких полиэтилентерефталатных и низкоплавких полипропиленовых волокон [9–12]. Следствием уменьшения длины полипропиленовых волокон при нагреве до температуры плавления и давления в зазоре валов каландра является усадка полотна и уменьшение пористости обработанных материалов [9, 10, 12].

Авторами статьи предложено использовать для обработки на специальном оборудовании полотно на основе смесей полиэтилентерефталатных и бикомпонентных волокон [13–15] с получением пористых материалов с повышенными относительно полотна механическими свойствами при регулируемом изменении пористости, включая получение материалов с градиентным распределением плотности упаковки волокон по толщине [16–18]. Влияние режимов термомеханической обработки на твердость материалов и зависимость твердости от изменения в процессе обработки пористости материалов не исследовано. Это является целью данной работы.

Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования использовали нетканое иглопробивное полотно на основе смеси бикомпонентных волокон линейной плотности 0,44 текс (Samsung, Республика Корея) и полиэтилентерефталатных волокон линейной плотности 0,66 текс по ТУ 6-13-0204077-95-91 в соотношении 30/70 масс.% соответственно. Бикомпонентные волокна имеют стержень из высокомолекулярного полиэтилентерефталата с температурой плавления 220–250°С и оболочку из низкомолекулярного полиэтилентерефталата с температурой плавления 120–130°С.

Волокнистый холст получали механическим способом формирования и упрочняли при плотности основного прокалывания 180 см$^{-2}$. Поверхностная плотность полотен составляла 0,30–0,32 кг/м^2, толщина 2,5–2,8 мм, объемная плотность 110–127 кг/м^3 и коэффициент пористости 0,90–0,92.

Температура вала при обработке полотна составляла 160, 180, 200 и 220°С, скорость обработки – 1, 2, 5, 10 и 15 м/мин. Коэффициент пористости полотна и обработанных материалов рассчитывали из уравнения:

$$\delta = 1 - \frac{p}{p_f} \quad (1)$$

где δ – коэффициент пористости, отн. ед.; ρ – плотность полотна и обработанного материала, кг/м^3; ρ_f – плотность полиэтилентерефталатных и бикомпонентных волокон, равная 1370 кг/м^3.

Толщину полотен и обработанных материалов, которая необходима для расчета объема образцов и, соответственно, коэффициента пористости, определяли в пяти точках, равномерно распределенных по площади образцов размером 10×10 см. Относительная ошибка определения коэффициента пористости не превышала ± 8%.

Твердость обработанных материалов, полученных при варьировании степени пропитки полотна от 0,08 до 0,73, определяли при использовании прибора ТШМ-2 (Точприбор, Россия) (рис.1).

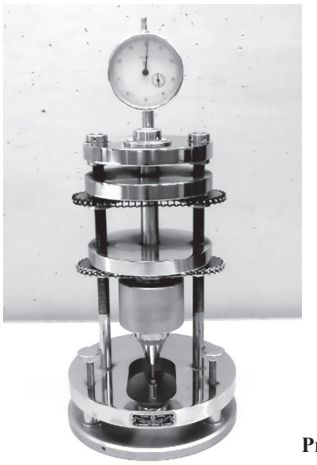

Рис. 1. Общий вид прибора ТШМ-2.

Показатели твердости полотна и обработанных материалов рассчитывали из уравнения:

$$H = \frac{P}{\pi d h} \quad (2)$$

где H – твердость, Н/см^2; P – сила вдавливания шарика в образец, равная 10 Н; d – диаметр шарика твердомера, равный 0,5 см; h – глубина вдавливания шарика в образец, см.

Глубину вдавливания шарика измеряли в пяти точках, равномерно распределенных по площади образцов размерами 10×10 см. Максимальная относительная ошибка определения твердости обработанных материалов не превышала ± 12%.

Схема устройства, которое использовали для обработки полотна, представлена на рис. 2.

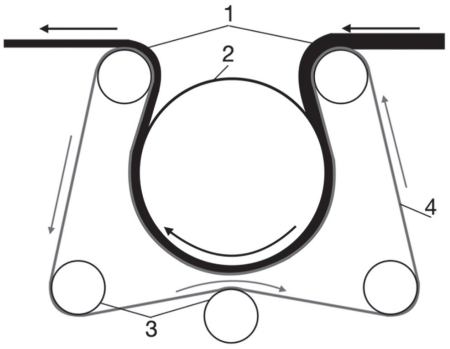

Рис. 2. Схема устройства для обработки полотен: *1* – полотно; *2* – нагретый металлический вал; *3* – направляющие валы; *4* – транспортерная лента (тонкой стрелкой показано направление движения транспортерной ленты; утолщенной стрелкой – движение полотна).

Для ограничения налипания нагретых волокон на поверхность металлического вала 2 нанесен слой фторкаучука. Бесшовная транспортерная лента 4 представляет собой нетканое иглопробивное полотно, изготовленное из арамидных волокон методом прокалывания закольцованной заготовки. Использованные материалы для футеровки поверхности вала и производства транспортерной ленты обеспечивают длительную эксплуатацию оборудования при температуре до 280°С.

Относительно большой диаметр вала 2, который составляет 1 м, увеличивает время контакта полотна с нагретой поверхностью вала с возможностью регулирования прогрева полотен по толщине. В зазоре между валом и транспортерной лентой создается относительно небольшое механическое воздействие на полотно, что в совокупности с принудительной подачей транспортерной лентой ограничивает вытяжку полотна. При выходе полотна из зазора между валом 2 и транспортерной лентой 4 структура обработанных материалов фиксируется интенсивным обдувом холодным воздухом.

Зависимость твердости материалов от скорости обработки (w, м/мин) полотна при заданной температуре металлического вала (t, °С) представлена на рис. 3.

Полученные зависимости H от w описываются уравнениями общего вида:

$$H = Aw^{-0,27} \quad (3)$$

где коэффициент размерности A, (Н/см^2) / (м/мин), зависит от температуры вала.

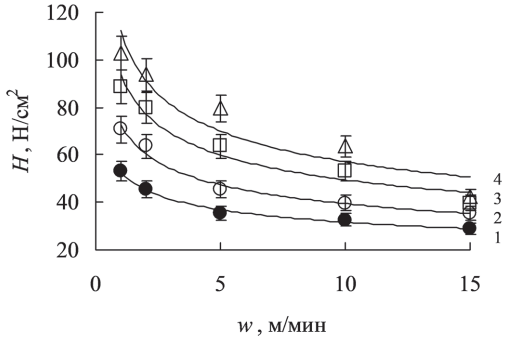

Рис. 3. Зависимость твердости материалов от скорости обработки при температуре вала 160 (*1*), 180 (*2*), 200 (*3*) и 220 (*4*) °С.

Уравнение (3) применяется для прогнозирования твердости материалов в зависимости от режимов обработки, используемых для получения образцов. Для расширения возможности уравнения (3) получена зависимость A от t, которая представлена на рис. 4.

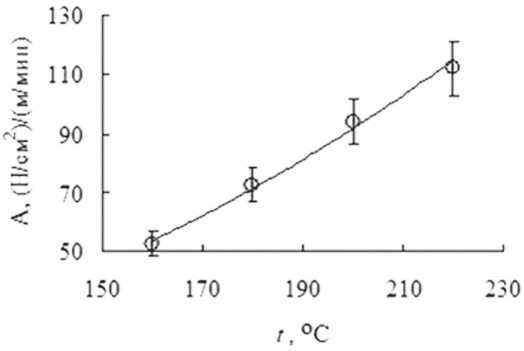

Рис. 4. Зависимость коэффициента *A* от температуры металлического вала.

Зависимость коэффициента A от t описывается уравнением:

$$A = 0,0003 \cdot t^{2,4} \quad (4)$$

Подставляя в уравнение (3) уравнение, которое описывает зависимость A от t (уравнение 4), получено уравнение для прогнозирования твердости обработанных материалов, изготовленных при варьировании скорости обработки и температуры вала. Уравнение имеет вид:

$$H = 0,0003 \cdot t^{2,4} w^{-0,27} \quad (5)$$

Графическое решение уравнения (5) при изменении скорости обработки от 1 до 15 м/мин и температуры вала от 120 до 260°С представлено на рис. 5.

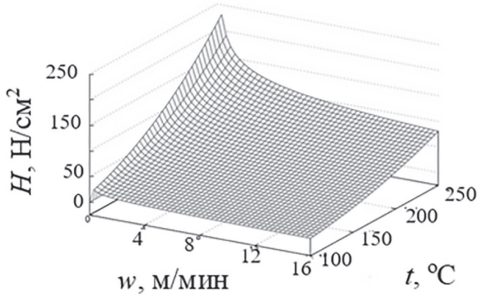

Рис. 5. Зависимость твердости материалов от скорости обработки и температуры металлического вала.

Из зависимости, представленной на рис. 5, следует, что твердость материалов в основном зависит от скорости обработки. Возрастание твердости материалов достигается при скорости обработки менее 4 м/мин и температуре вала больше 200°С. Наиболее заметное увеличение твердости наблюдается при скорости обработки меньше 1 м/мин и температуре вала от 220 до 250°С, изменение которой при постоянной скорости обработки 1 м/мин приводит к возрастанию твердости от 100 до 220 Н/см^2 (рис. 5) по сравнению с 22 Н/см^2 для исходного полотна.

Твердость полотна и обработанных материалов определяется подвижностью волокон под действием шарика, при вдавливании которого волокна могут смещаться в плоскости поверхности полотна или уплотняться в направлении движения шарика. При сдвиге волокон глубина вдавливания шарика будет соответствовать или

приближаться к толщине образцов. Экспериментальные данные показали, что глубина вдавливания значительно меньше толщины не только обработанных материалов, но и толщины исходного полотна. Поэтому можно сделать вывод о том, что твердость обработанных материалов зависит от перемещения волокон в направлении движения шарика.

При обработке полотна сложного состава происходит плавление оболочек бикомпонентных волокон, расплав которых при сжатии полотна в зазоре между валом и транспортерной лентой соединяет волокна между собой. Замена фрикционных связей между волокнами, которые формируются в процессе прокалывания, на связи, которые образуются при сплавлении волокон в местах их контакта между собой, ограничивает подвижность волокон при вдавливании шарика, что отражается увеличением твердости обработанных материалов.

Эффективность сплавления волокон определяется равномерным распределением бикомпонентных волокон в объеме полотна. В процессе прокалывания первоначально происходит уплотнение полотна, и после достижения определенной плотности возрастает вероятность захвата волокон зазубринами игл, что приводит к переориентации волокон, ориентированных на стадии формирования волокнистого холста параллельно поверхности полотна, в направлении, перпендикулярном поверхности. Кроме того, иглы преимущественно захватывают и протаскивают в объем волокна поверхностного слоя. При прокалывании полотен из смеси волокон различной линейной плотности волокна меньшей линейной плотности захватываются зазубринами игл с большей вероятностью.

Можно заключить, что в процессе прокалывания в поверхностном слое полотен происходит преимущественный захват зазубринами игл бикомпонентных волокон, линейная плотность которых меньше линейной плотности полиэтилентерефталатных волокон. Поэтому в поверхностном слое полотна концентрация бикомпонентных волокон меньше их концентрации в объеме, что обусловливает относительно небольшое увеличение твердости при скорости обработки от 2 до 16 м/мин и температуре вала от 150 до 200°С, которая выше температуры плавления оболочки бикомпонентных волокон. Небольшое увеличение твердости материалов объясняется тем, что при таких режимах обработки прогревается только поверхностный слой с относительно небольшим содержанием бикомпонентных волокон. Снижение скорости обработки при температуре вала от 150 до 200°С или увеличение температуры вала выше 200°С приводит к прогреву полотна и плавлению оболочки бикомпонентных волокон с фиксацией волокон и возрастанием твердости.

Пористость полировального материала определяет его сорбционную емкость, что является условием проведения полирования при использовании жидких составов различного назначения. Практическое значение имеет установление соотношения между изменением коэффициента пористости и твердостью материалов, которые в различной степени зависят от режимов обработки. Увеличение температуры и снижение скорости обработки приводят к уменьшению пористости [5–11], но при этом возрастает твердость материалов (рис. 5). Зависимость твердости от коэффициента пористости для материалов, полученных при варьировании режимов обработки, представлена на рис. 6.

Соотношение между H от δ для материалов, полученных при варьировании скорости обработки и температуры вала, описывается общей зависимостью. Из приведенных данных следует, что существенное увеличение твердости происходит при коэффициенте пористости меньше 0,84 (рис. 6). Полученная зависимость на рис. 6 с коэффициентом корреляции 0,88 подчиняется уравнению вида:

$$H = 3{,}9 \cdot \delta^{-18{,}1} \quad (6)$$

Уравнение (6) применимо для прогнозирования твердости при заданном изменении коэффициента пористости материала. При использованных в работе режимах обработки получен материал, для которого при снижении коэффициента пористости с 0,92 до 0,82 (примерно на 10%), твердость увеличивается в 4 раза (рис. 6).

В работе с применением уравнения (6) решена обратная задача, связанная с расчетом коэффициента пористости материала, имеющего максимальную твердость, равную 220 Н/см^2 (рис. 5). Согласно уравнению (5), максимальная твердость достигается при скорости обработки меньше 1 м/мин и температуре вала 250°С. Получено, что коэффициент пористости материала с максимальной твердостью составляет 0,8.

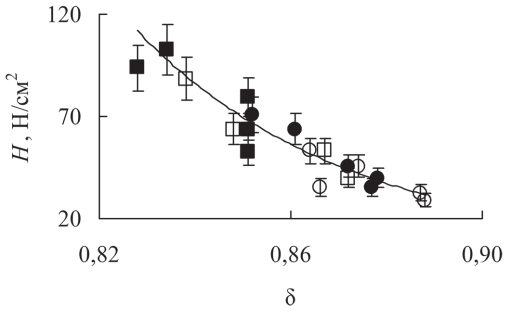

Рис. 6. Зависимость твердости от коэффициента пористости материалов, полученных при температуре вала 160°С (○), 180°С (●), 200°С (□) и 220°С (■).

Выводы

Предложенный метод обработки нетканого иглопробивного полотна из полиэтилентерефталатных и бикомпонентных волокон линейной плотности 0,66 и 0,44 текс в отношении 70/30 масс.% обеспечивает получение материалов твердостью в диапазоне значений от 22 до 220 Н/м^2.

Значительное увеличение твердости достигается при скорости обработки полотен менее 4 м/мин и температуре вала выше 200°С.

Существенное возрастание твердости достигается при сохранении высокой пористости обработанных материалов.

Литература

1. Jain N.K., Jain V.K., Jha S. Parametric optimization of advanced fine-finishing processes // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2017. V. 34, N11–12. P. 1191–1213. DOI:10.1007/s00170-006-0682-4.
2. Lichtner A., Roussel D., Röhrens D., Jauffres D., Villanova J., Martin C.L., Bordia R.K. Anisotropic sintering behavior of freezecast ceramics by optical dilatometry and discrete-element simulations // Acta Mater. 2018. V. 155. P. 343–346. DOI: 10.1016/j.actamat.2018.06.001.
3. Rakshit R., Das A.K. A review on cutting of industrial ceramic materials // Precis. Eng. 2019. V. 59, N2. P. 90–97. DOI: 10.1016/j.precisioneng. 2019.05.009.
4. Терашкевич Д.И., Бокова Е.С., Гинзбург А.С., Коваленко Г.М. Анализ микроструктуры полировальных материалов на основе полиуретанов // Пластические массы. 2021. №1–2. С. 3–6. DOI: 10.35164/0554-2901-2021-1-2-3-6.
5. Dedov A.V., Babushkin S.V., Platonov A.V., Kondratov A.P., Nazarov V.G. Sorption properties of nonwoven materials // Fibre Chem. 2001. V. 33, N5. P. 56–58. DOI:10.15828/2075-8545-2023-15-1-53-58.
6. Dedov A.V. Forming of the pore structure of needlepunch materials // Fibre Chem. 2008. V. 40, N5. P. 464–466. DOI:10.1007/s10692-009-9076-3.
7. Yang M., Sheng P. Sound absorption structures: from porous media to acoustic metamaterials//Ann. Rev. Mater. Res. 2017. V. 47, N1. P. 83–114. DOI:10.1146/annurev-matsci-070616-124032.
8. Yang T., Xiong X., Wang Y., Mishra R., Petrů M., Militký J. Application of Acoustical Method to Characterize Nonwoven Material//Fibers and Polym. 2021. V. 22, N3. P. 831–840. DOI:10.1146/annurev-matsci-070616-124032.
9. Zobel, S., Maze, B., Tafreshi, H.V., Wang, Q., and Pourdeyhimi, B. Simulating Permeability of 3-D Calendered Fibrous Structures // Chem. Engineering Sci. 2007. V. 62. P. 6285. DOI: 10.1016/j.ces.2007.07.007.
10. Dedov, A.V., Nazarov, V.G. Mechanical characteristics of needle-piercing material obtained from a mixture of polyester and polypropylene fibers treated on roll calendar // Fibre Chem. 2011. 43(3): 259–262. DOI:10.1007/s10692-011-9344-x.
11. Kopitar D., Skenderi Z., Mijovic B. Study on the Influence of Calendaring Process on Thermal Resistance of Polypropylene Nonwoven Fabric Structure // J. Fiber Bioengineering and Informatics. 2014. V. 7, N1. P. 1–11. DOI:10.3993/jfbi03201401.
12. Kopitar D, Skenderi Z, Rukavina T. Impact of calendering process on nonwoven geotextiles hydraulic properties // Textile Research J. 2014. N1. P. 69–80. DOI:10.1177/0040517513485627.

13. Ayad E., Cayla A., Rault F., Gonthier A., Campagne C., Devaux E. Influence of Rheological and Thermal Properties of Polymers During Melt Spinning on Bicomponent Fiber Morphology // J. Mater. Engineering and Performance. 2016. V. 25, N6. P. 3296–3302. DOI:10.1007/s11665-016-2193-2.
14. Prahsarn C., Klinsukhon W., Padee S., Su-Wannamek N., Roungpaisan N., Srisawat N. Hol low segmented-pie PLA/PBS and PLA/PP bicomponent fibers: an investigation on fiber properties and splittability // J. Mater. Sci. 2016. V. 51. N8. P. 10910–10916. DOI:10.1007/s10853-016-0302-0.
15. Huang W.T., Liu D.Z., Li J.F., Zhu L.P., Yan S.G. Polymer complexation for functional fibers // Sci. China Technol. Sci. 2019. V. 62, N5. P. 931–944. DOI: 10.1016/j.carpta.2020.100030.
16. Leshchenko T.A., Chernousova N.V., Dedov A.V., Nazarov V.G. Effect of processing regimes on mechanical properties of material based on a three-component fiber mixture Fibre Chem. 2024. V. 55, N5. C. 318–322. DOI:10.1007/s10692-024-10483-5
17. Dedov A.V., Bokova E.S., Ryzhkin V.A. Production nonwoven needlepunched materials with increased stretch resistance // Fibre Chemistry. 2013. V. 45, N4. C. 221–223. DOI:10.1007/s10692-013-9516-y.
18. Dedov A.V., Nazarov V.G. Processed Nonwoven Needlepunched Materials with Increased Strength // Fibre Chem. 2015. V. 47, N2. P. 121–125. DOI:10.1007/s10692-015-9649-2.