

УДК 675.92.035

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ  
НЕТКАНЫХ ИГЛОПРОБИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ПРИ РАСТЯЖЕНИИ\***

**MODELING OF STRENGTH PROPERTIES  
IN TENSION NON-WOVEN NEEDLE-PUNCHED MATERIAL**

*А.В. ДЕДОВ, В.Г. НАЗАРОВ*  
A.V. DEDOV, V.G. NAZAROV

(Московский государственный университет печати имени Ивана Федорова)  
(Moscow State University of Printing Arts named after Ivan Fedorov)  
E-mail: dedovs@rambler.ru

*Разработана модель для прогнозирования напряжения при разрыве и удлинения при разрыве иглопробивных нетканых материалов различной поверхностной и объемной плотности удельного объема пор иглопробивных материалов. При расчете напряжения при разрыве модель имеет ограниченное применение и используется для прогнозирования прочности материалов при определенном значении удельного объема пор, которая меньше удельного объема пор волокнистого холста. Расчет удлинения при разрыве не имеет ограничения. Удельный объем пор отражает формирование структурных элементов материалов в процессе прокалывания, которыми являются пучки, а также активные и пассивные волокна.*

*A model is developed to predict the stress at break and elongation at break of needle-punched non-woven materials of different surface and volume density from their specific pore volume. When calculating the stress at rupture model has limited application and is used to predict the strain at break of the material specific values of specific pore volume, which is approaching a specific pore volume of the fibrous canvas. The calculation of the elongation at break has no limits. The proposed structural parameter reflects the changing patterns in the process of perforation, and the formation of associated bundles of fibers and between the fibers.*

**Ключевые слова:** нетканый иглопробивной материал, напряжение при разрыве, удлинение при разрыве, удельный объем пор, модель.

**Keywords:** non-woven needle-punched material, the stress at break, elongation at break, specific pore volume, the model.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, гос. задание №10.4714.2017/8.9.

Прочностные характеристики при растяжении нетканых иглопробивных материалов являются нормированными показателями, определяющими целевое назначение материала [1], [2]. Очевидно практическое значение прогнозирования прочностных характеристик и определение зависимости прочностных характеристик от структуры материалов.

Ранее выполненные исследования [3] показали низкую эффективность оценки прочности иглопробивных материалов при использовании нормированного показателя нагрузки при разрыве, которая зависит от комбинации показателей поверхностной и объемной плотности. В то же время использование для этой цели напряжения при разрыве ограничено низким сопротивлением материалов сжатию под действием механической нагрузки измерительного устройства. Сжатие материалов под действием измерительного устройства приводит к ошибке определения толщины полотна и влияет на расчет площади поперечного сечения образца и соответственно условного напряжения при разрыве. Однако толщина нетканых материалов определяется при нормированной нагрузке измерительного устройства [1], поэтому ошибка измерения толщины при использовании отрегулированного измерительного устройства является величиной постоянной, а полученные данные могут использоваться для расчета напряжения при разрыве. Целью работы являлась разработка модели для прогнозирования условного напряжения при разрыве нетканых иглопробивных материалов различной поверхностной и объемной плотности.

В качестве объектов исследования использовали нетканые иглопробивные материалы, изготовленные из полиэфирного волокна (ТУ 6-13-0204077-95-91) линейной плотностью 0,33 текс. Волокнистые холсты получали механическим способом формирования на линии Дило (Германия). Структуру материалов различной поверхностной и объемной плотности варьировали плотностью основного прокалывания, которую изменяли от 120 до 240 см<sup>-2</sup> при действии игл с одной стороны и постоянной протяжке

полотна, равной 50%. Плотность прокалывания была меньше критической величины, выше которой происходит разрыв волокон и уменьшение прочности. Поверхностную плотность материалов изменяли от 150 до 650 г/м<sup>2</sup>, а объемную плотность – от 90 до 130 кг/м<sup>3</sup>.

Исследованы зависимости прочностных характеристик, в качестве которых использовали условное напряжение при разрыве ( $\sigma$ , МПа) и относительное удлинение при разрыве ( $\varepsilon$ , %), от различных структурных параметров материалов. Оптимальной является модель, уравнение которой отражает зависимость прочностных характеристик от удельного объема пор ( $V_M$ , м<sup>3</sup>/кг), который рассчитывается как отношение истинного объема пор к массе образца [4], [5]. Зависимости условного напряжения при разрыве и относительного удлинения при разрыве от удельного объема пор нетканых материалов различной объемной и поверхностной плотности представлены на рис. 1 (зависимости условного напряжения при разрыве от удельного объема пор в продольном (1) и поперечном (2) направлениях нетканого иглопробивного материала) и рис. 2 (зависимости относительного удлинения при разрыве от удельного объема пор в продольном (1) и поперечном (2) направлениях нетканого иглопробивного материала).

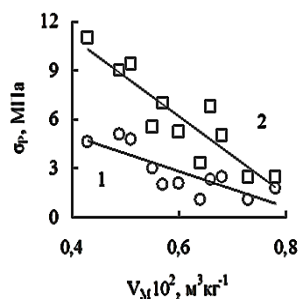


Рис. 1

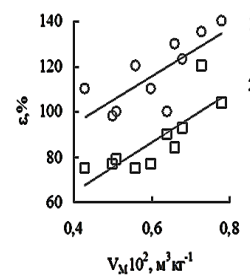


Рис. 2

В продольном и поперечном направлениях материалов различной поверхностной и объемной плотности зависимости условного напряжения при разрыве и относительного удлинения при разрыве от удельного объема пор имеют линейный вид

(рис.1 и 2) и подчиняются следующим уравнениям:

$$\sigma = \sigma_0 - k_\sigma V_M, \quad (1)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + k_\varepsilon V_M, \quad (2)$$

где  $\sigma_0$  и  $\varepsilon_0$  – соответственно условное напряжение при разрыве (МПа), и относительное удлинение при разрыве (%), при выполнении условия  $V_M=0$ ,  $\sigma_0$  и  $\varepsilon_0$  отражают прочностные характеристики монолитного материала с максимальной плотностью упаковки волокон, ориентированных в определенном направлении полотна;  $k_\sigma$  и  $k_\varepsilon$  – коэффициенты размерности МПа/(м<sup>3</sup>/кг) и %/(м<sup>3</sup>/кг), соответственно отражающие условное напряжение при разрыве и относительное удлинение материала, удельный объем пор которого равен единице. Значения коэффициентов уравнений (1) и (2) представлены в табл. 1 (значения коэффициентов уравнений (1) и (2) для расчета зависимостей прочностных характеристик иглопробивных материалов от удельного объема пор).

Условное напряжение при разрыве увеличивается при уменьшении удельного объема пор (рис. 1), в то время как относительное удлинение при разрыве в этих условиях снижается (рис. 2). Механические свойства в поперечном направлении полотна превосходят механические свойства в продольном направлении. Вид зависимостей условного напряжения при разрыве от удельного объема пор (рис. 1) показывает, что при  $V_M=0,85 \times 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$ , в продольном и поперечном направлении полотна  $\sigma=0$ . Увеличение удельного объема пор больше данной критической величины приводит к  $\sigma < 0$ , что ограничивает применение уравнения (1). В то же время отсутствуют ограничения применения уравнения (2), которое может быть использовано для расчета относительного удлинения при разрыве материалов с показателями удельного объема пор больше критической величины. Причем материал с  $V_M=0$  имеет определенные показатели относительного удлинения при разрыве ( $\varepsilon_0$ ), значения которых зависят от направления полотна (рис. 2).

Прочность при растяжении иглопробивных материалов определяется поведением волокон в пучках, которые формируются при захвате волокон зубринами игл. Часть волокон соединяет пучки между собой (активные волокна) и несет механическую нагрузку. Часть волокон не входит в состав пучков (пассивные волокна) и не несет нагрузку [6...8]. Предложенная структура материалов обеспечивает теоретическое обоснование механизма разрушения, который определяется отношением прочности связей между волокнами в пучках и прочности самих волокон. Когда прочность связей между волокнами в пучках больше прочности волокон, разрушение материала является следствием разрыва волокон. Когда прочность связей между волокнами в пучках меньше прочности волокон, разрушение материала происходит за счет выкальзывания волокон из пучка.

Реализация определенного механизма разрушения зависит от количества пучков, расстояния между ними и количества волокон в их объеме или от структурных факторов, которые в значительной степени определяют удельный объем пор. Увеличение удельного объема пор достигается при уменьшении плотности прокалывания. При таком режиме прокалывания снижается количество пучков и число активных волокон, а структура и механические свойства материалов приближаются к структуре и механическим свойствам волокнистого холста. Низкие механические свойства волокнистого холста определяют необходимость введения критического значения удельного объема пор, ограничивающего применение уравнения (1).

Кроме того, в материалах с высоким значением удельного объема пор формируются пучки с низкой плотностью упаковки волокон, что приводит к небольшой прочности связей между волокнами в пучках. Для таких материалов реализуется механизм разрушения, который является следствием выкальзывания волокон из пучков. Линейный характер зависимости напряжения при разрыве от удельного объема пор показывает, что такой механизм разруше-

ния сохраняется для материалов с большими значениями удельного объема пор.

Сложнее оценить влияние удельного объема пор на относительное удлинение при разрыве, которое складывается из удлинения первой и второй стадий растяжения иглопробивных материалов [9]. На первой стадии растяжения происходит выпрямление извитых волокон между пучками, их вращение и переориентация в направлении действия механической нагрузки. После выпрямления и переориентации волокон между пучками механическая нагрузка перераспределяется на волокна в пучках, что соответствует переходу ко второй стадии растяжения. Удлинение на второй стадии растяжения определяется механизмом разрушения. При реализации механизма разрушения, связанного с разрывом волокон, удлинение на второй стадии растяжения соответствует удлинению волокна при разрыве. При реализации механизма разрушения за счет выкальзывания волокон из пучка удлинение на второй стадии растяжения соответствует длине волокон в пучках.

Исходя из ранее установленного механизма разрушения материалов с различными значениями удельного объема, который достигается за счет выкальзывания

волокон из пучков, относительное удлинение на второй стадии растяжения приближается к постоянной величине, которая не зависит от удельного объема пор. В таком случае увеличение удлинения при разрыве при возрастании удельного объема пор является следствием снижения удлинения на первой стадии растяжения. Снижение подвижности волокон между пучками материалов с увеличенным удельным объемом пор достигается при уменьшении расстояния между пучками, снижении извитости и повышении ориентации волокон.

Разность между механическими свойствами в продольном и поперечном направлении полотна (рис. 1 и 2, табл. 1) отражает различную степень ориентации волокон, задаваемой при механическом способе формирования волокнистого холста. Механический способ формирования волокнистого холста обеспечивает высокую ориентацию волокон в поперечном направлении полотна. Высокая степень ориентации в поперечном направлении полотна приводит в этом направлении к возрастанию эффективности формирования пучков и уменьшению расстояния между ними, что отражается снижением в силовом поле подвижности волокон между пучками и в их объеме.

Т а б л и ц а 1

Направление полотна	$\sigma_0$ , МПа	$k_\sigma$ , МПа/(м <sup>3</sup> /кг)	$\varepsilon_0$ , %	$k_\varepsilon$ , %/(м <sup>3</sup> /кг)
Вдоль	9,4	1100	16,6	11407
Поперек	20,7	2400	51,7	11004

Коэффициент  $\sigma_0$  отражает прочность монолитного иглопробивного материала с максимально возможной плотностью упаковки волокон. В то же время увеличение плотности прокалывания не обеспечивает получение монолитного материала с теоретически возможной максимальной плотностью упаковки волокон и их строгой ориентацией в продольном и поперечном направлениях, что требует объяснения физического смысла коэффициента  $\sigma_0$ .

Величина коэффициента  $\sigma_0$  является расчетной и определяется экстраполяцией зависимостей напряжения при разрыве от

удельного объема пор, которые получены для материалов с относительно высокими значениями удельного объема пор. Очевидно, что увеличение плотности упаковки волокон в процессе прокалывания и их переориентация происходят до определенной степени и зависят от направления полотна. Поэтому коэффициент  $\sigma_0$  отражает максимальное значение условного напряжения при разрыве монолитного материала, формирование которого зависит от состава иглопробивного материала, режимов прокалывания и направления полотна.

## ВЫВОДЫ

1. Предложенный параметр для оценки пористости нетканых иглопробивных материалов отражает зависимость структуры от режимов прокалывания и влияние структуры материалов на их прочностные характеристики.

2. Следствием достижения в процессе прокалывания удельного объема пор меньше критической величины, равной в условиях реализации использованной технологии производства  $0,85 \times 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$ , является получение материала, механические свойства которого характеризуются условным напряжением при разрыве.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Трещалин М.Ю., Мухамеджанов Г.К., Телицын А.А. Производство и методы испытаний нетканых материалов. – М., 2008.
2. Бершев Е.Н., Семенов В.А. Моделирование механических процессов производства нетканых материалов. – Л., 1983.
3. Дедов А.В. Обработка иглопробивного материала из полиэфирного волокна // Химические волокна. – 2008, №2. С.52...54.
4. Бокова Е.С., Дедов А.В. Механические и структурные характеристики иглопробивных материалов при использовании различных игл // Химические волокна. – 2011, №6. С. 40...42.
5. Бокова Е.С., Дедов А.В. Прогнозирование прочности иглопробивных материалов // Химические волокна. – 2011, №6. С. 38...40.
6. Гусев В.Е., Барабанов Г.Л. Методы повышения прочности иглопробивных нетканых материалов // Текстильная промышленность. – 1970, №3. С.52...54.
7. Семенов В.А. Прочность нетканого материала // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000, №2. С.34...38.

8. Барабанов Г.Л., Хорохов М.А. Прочность иглопробивных нетканых материалов из волокон с резко отличающейся линейной плотностью // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2002, № 3. С.267.

9. Дедов А.В. Иглопробивной материал с градиентом плотности // Материаловедение. – 2008, №6. С. 32...35.

## REFERENCES

1. Treshalin M.Yu., Muhamedzhanov G.K., Telicyn A.A. Proizvodstvo i metody ispytaniy netkanykh materialov. – M., 2008.
2. Bershev E.N., Semenov V.A. Modelirovanie mekhanicheskikh processov proizvodstva netkanykh materialov. – L., 1983.
3. Dedov A.V. Obrabotka igloprobivnogo materiala iz poliefirnogo volokna // Himicheskie volokna. – 2008, №2. S.52...54.
4. Bokova E.S., Dedov A.V. Mekhanicheskie i strukturnye harakteristiki igloprobivnykh materialov pri ispolzovanii razlichnykh igl // Himicheskie volokna. – 2011, №6. S. 40...42.
5. Bokova E.S., Dedov A.V. Prognozirovaniye prochnosti igloprobivnykh materialov // Himicheskie volokna. – 2011, №6. S. 38...40.
6. Gusev V.E., Barabanov G.L. Metody povysheniya prochnosti igloprobivnykh netkanykh materialov // Tekstilnaya promyshlennost. – 1970, №3. S.52...54.
7. Semenov V.A. Prochnost netkanogo materiala // Izv. vuzov. Tehnologiya tekstilnoj promyshlennosti. – 2000, №2. S.34...38.
8. Barabanov G.L., Horohonov M.A. Prochnost igloprobivnykh netkanykh materialov iz volokon s rezko otlichayushejsya linejnoy plotnostyu // Izv. vuzov. Tehnologiya tekstilnoj promyshlennosti. – 2002, № 3. S.267.
9. Dedov A.V. Igloprobivnoj material s gradientom plotnosti // Materialovedenie. – 2008, №6. S. 32...35.

Рекомендована кафедрой материаловедения.  
Поступила 23.11.15.