

УДК 539.3

Р.А. Каюмов – доктор физико-математических наук, профессор

И.З. Мухамедова – кандидат физико-математических наук, доцент

А.М. Шакирова – кандидат физико-математических наук

E-mail: kayumov@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

И.Ш. Абдуллин – доктор технических наук, профессор

В.В. Хамматова – доктор технических наук, профессор

E-mail: venerabb@mail.ru

Казанский государственный технологический университет им. Кирова

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА ЖЕСТКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ*

АННОТАЦИЯ

Предложена модель поведения полиэфирной ткани, подверженной обработке плазмой пониженного давления для оценки ее деформативности в своей плоскости. Излагается метод идентификации жесткостных характеристик, приводятся результаты обработки натуральных экспериментов, а также результаты численных исследований задачи о растяжении образцов ткани.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полиэфирная ткань, идентификация, жесткость, холодная плазма.

R.A. Kayumov – doctor of physical-mathematical sciences, professor

I.Z. Mukhamedova – candidate of physical-mathematical sciences, associate professor

A.M. Shakirova – candidate of physical-mathematical sciences

Kazan State University of Architecture and Engineering

I.Sh. Abdullin – doctor of technical sciences, professor

V.V. Khammatova – doctor of technical sciences, professor

Kazan State Technological University

ANALYSIS OF INFLUENCE OF COLD PLASMA ON THE STIFFNESS CHARACTERISTICS OF POLYMERIC MATERIALS

ABSTRACT

The present paper is devoted to model of the behavior of polyester fabric, exposed by the cold plasma treatment to assess its deformability in its plane. There are offered the method of identification of the stiffness characteristics, the results of processing field experiments, as well as the results of numerical studies of the problem of tensile samples.

KEYWORDS: polyester fabric, identification, stiffness, cold plasma.

Введение

Волокна из таких материалов, как полиэтилен и политетрафторэтилен, имеют высокие прочностные характеристики, что делает их перспективными для использования в композиционных материалах. Но сдерживающим фактором является относительно низкая прочность сцепления (адгезия) этих волокон к полимерным матрицам.

Наиболее важным в практическом отношении результатом воздействия низкотемпературной плазмы на полимерные материалы является сильное повышение их адгезионных характеристик [1-6]. Это позволяет создавать композиты на основе высокопрочных полиэтиленовых волокон. Однако при облучении холодной плазмой этих видов материалов уменьшаются их жесткостные характеристики.

* Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт № 2432 от 19.11.2009 г.) и при поддержке РФФИ № 08-01-00628-а.

Поэтому для полноценного анализа изменения жесткостных характеристик в различных направлениях полимерных композиционных материалов (ПКМ), модифицированных в потоке холодной плазмы, необходимо иметь их математические модели.

1. Физические соотношения

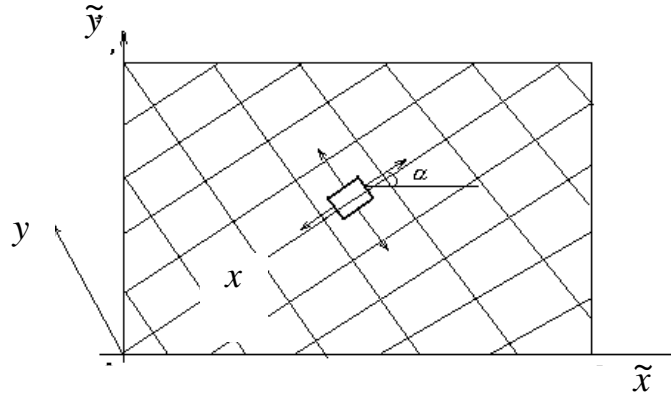


Рис. 1. Образец ткани, вырезанный под углом α к основе

Введем понятия жесткостей. Для тканей понятия напряжений S_{11}, S_{22}, S_{12} (усилий, приходящихся на единицу площади поперечного сечения ткани) становятся неудобными. Поэтому в дальнейшем будем оперировать только усилиями, приходящимися на единицу длины сечения образца. Обозначим их через N_{11} (погонное усилие вдоль направления основы, приходящееся на 1 мм длины поперечного сечения), N_{22} (погонное усилие вдоль направления утка), N_{12} (погонное усилие сдвига). Элемент при этом получает относительные удлинения $\epsilon_{11}, \epsilon_{22}$, а первоначально прямой угол изменяется на угол сдвига γ_{12} . Введем векторы $\{N\}, \{\epsilon\}$:

$$\{N\} = \{N_{11}, N_{22}, N_{12}\}^T, \{\epsilon\} = \{\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \gamma_{12}\}^T$$

Индекс «т» означает операцию транспонирования.

Для нелинейного случая для ткани в осях ортотропии x, y упругий потенциал, с помощью которого погонные усилия выражаются через деформации с помощью соотношения $N_{ij} = \partial W / \partial e_{ij}$, примем в следующем виде:

$$W = D_{110}e_{11}^2 / 2 + D_{112}e_{11}^4 / 12 + D_{120}e_{11}e_{22} + D_{220}e_{22}^2 / 2 + D_{222}e_{22}^4 / 12 + D_{330}g_{12}^2 / 2 + D_{334}g_{12}^6 / 30 \quad (1)$$

Тогда связь приращений погонных усилий dN_{ij} через приращения деформаций de_{ij} в осях ортотропии согласно (1) примет вид:

$$d\{N\} = [D]d\{e\} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} d\{e\} \quad (2)$$

$$\begin{cases} D_{11} = D_{110} + D_{112}e_{11}^2, & D_{22} = D_{220} + D_{222}e_{22}^2 \\ D_{12} = D_{120} = D_{210}, & D_{33} = D_{330} + D_{334}g_{12}^4 \\ D_{23} = D_{32} = D_{13} = D_{31} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Упругий закон в лабораторной системе координат \tilde{x}, \tilde{y} , т.е. в осях, параллельных краям испытываемого прямоугольного образца ткани, изображенного на рис. 1, примет вид:

$$d\{\tilde{N}\} = [\tilde{D}]d\{\tilde{\epsilon}\}, \text{ где } [\tilde{D}] = [T][D][T]^T, T = \begin{bmatrix} \cos^2 a & \sin^2 a & -\sin 2a \\ \sin^2 a & \cos^2 a & \sin 2a \\ \frac{\sin 2a}{2} & \frac{-\sin 2a}{2} & \cos 2a \end{bmatrix} \quad (4)$$

Аналогично вводится упругий потенциал для ткани, модифицированной холодной плазмой. Отличать соотношения будем с помощью индекса «*»:

$$W^* = D_{110}^* e_{11}^2 / 2 + D_{112}^* e_{11}^4 / 12 + D_{120}^* e_{11} e_{22} + D_{220}^* e_{22}^2 / 2 + D_{222}^* e_{22}^4 / 12 + D_{330}^* g_{12}^2 / 2 + D_{334}^* g_{12}^6 / 30 \quad (5)$$

2. Модель деформирования образцов ткани

Для численного анализа процесса деформирования образцов тканей использовался метод конечных элементов (МКЭ). В качестве подобласти принимался шестиузловой треугольный элемент второго порядка [8].

Для учета неспособности ткани воспринимать сжимающую нагрузку использовался следующий подход. На каждом шаге приращения нагрузки анализируется силовое поле N_{ij} . Если вдоль основы или утка усилия N_{11} или N_{22} принимают отрицательные значения, то на этом шаге соответственно жесткости D_{11} или D_{22} уменьшаются на несколько порядков (в нашем случае в 500 раз). После этого заново проводится решение уравнений равновесия и усилия пересчитываются. Эта процедура проводится до тех пор, пока не стабилизируется поле деформаций и усилий.

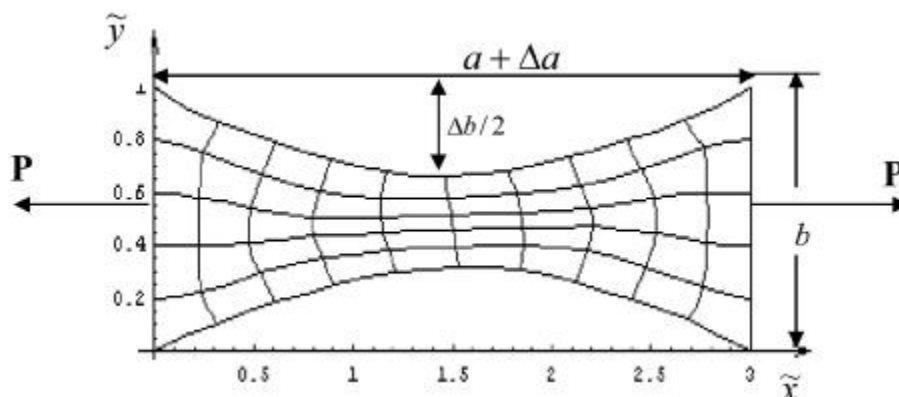


Рис. 2. Картина образца в растянутом состоянии

3. Идентификация механических характеристик

Под задачами идентификации в научной литературе понимают обратные (в математическом смысле) задачи, в которых по известным входным и выходным экспериментальным данным определяются параметры модели, описывающей поведение системы [7]. Изложенная выше модель была использована для идентификации механических характеристик тканей на основе численного анализа поведения образцов тканей, в том числе обработанных холодной плазмой. Для этого рассматривались эксперименты о растяжении образцов, вырезанных под углом a к основе (см. рис. 1, 2).

Задачу идентификации можно ставить следующим образом. Считаются известными данные испытаний конструкций с замером внешних воздействий, а параметры математической модели поведения материала и конструкций являются искомыми. Рассматривается прямая задача расчета деформированного состояния образца, параметры же модели подбираются так, чтобы были близки результаты численного расчета и экспериментальные данные. Например, можно потребовать минимума квадратичной невязки между расчетными и экспериментальными данными. Она имеет вид:

$$d^2 = v_1 [(P_y^{cp})^{эксн} - (P_y^{cp})^{расч}]^2 \Big|_{P_n a_1} + m_1 [\Delta a^{эксн} - \Delta a^{расч}]^2 \Big|_{P_n a_1} + k_1 [\Delta b^{эксн} - \Delta b^{расч}]^2 \Big|_{P_n a_1} + \dots \quad (8)$$

$$\dots + v_n [(P_y^{cp})^{эксн} - (P_y^{cp})^{расч}]^2 \Big|_{P_n a_n} + m_n [\Delta a^{эксн} - \Delta a^{расч}]^2 \Big|_{P_n a_n} + k_n [\Delta b^{эксн} - \Delta b^{расч}]^2 \Big|_{P_n a_n}$$

здесь n – количество проведенных экспериментов, $\Delta a^{эксн}$, $\Delta b^{эксн}$ – экспериментальные значения изменений сторон образца в продольном и в поперечном направлениях соответственно (см. рис. 2), а $\Delta a^{расч}$, $\Delta b^{расч}$ – расчетные значения вышеперечисленных изменений. P_1, \dots, P_n – величины нагрузок, a_1, \dots, a_n – углы между основной и длинной стороной образца, $v_1, \dots, v_n, m_1, \dots, m_n, k_1, \dots, k_n$ – весовые коэффициенты.

В данной работе считаются неизвестными жесткостные характеристики $D_{110}, D_{114}, D_{220}, D_{224}, D_{120}, D_{330}, D_{334}$. Особенностью этого класса задач является то, что при любых деформациях должно выполняться следующее ограничение:

$$D_{11} D_{22} - D_{12}^2 > 0. \quad (9)$$

Поэтому упругий потенциал должен подбираться специальным образом. В частности, условие (9) будет обеспечено, если принять $D_{110} D_{220} - D_{120}^2 > 0$.

Затем были обработаны результаты экспериментов о растяжении образцов полиэфирной ткани размерами 94 мм на 50 мм.

Далее были обработаны результаты испытаний на растяжение полиэфирной (ВПЭ-100) ткани до и после обработки холодной плазмой. На первом этапе жесткостные характеристики $D_{110}, D_{112}, D_{220}, D_{222}, D_{120}, D_{330}, D_{334}$ определялись по данным испытаний образцов из полиэфирной (ВПЭ-100) ткани, вырезанных под разными углами ($0^\circ, 90^\circ, 45^\circ$) к основе, при различных растягивающих усилиях. Образец, вырезанный под углом 30° к основе, считался контрольным. Расчеты дали следующие значения для D_{ijk} :

ВПЭ100 (исходная необработанная ткань):

$$D_{110} = 1.58, \quad D_{112} = 8000, \quad D_{220} = 0.95, \quad D_{222} = 1500, \quad [МПа*мм]$$

$$D_{120} = 0.178, \quad D_{330} = 0.065, \quad D_{334} = 13.5$$

ВПЭ100 (ткань, обработанная холодной плазмой в теч. 180 сек.):

$$D_{110}^* = 1.2, \quad D_{112}^* = 5900, \quad D_{220}^* = 0.835, \quad D_{222}^* = 1000, \quad [МПа*мм]$$

$$D_{120}^* = 0.178, \quad D_{330}^* = 0.045, \quad D_{334}^* = 2$$

С помощью разработанной модели была рассмотрена задача о деформировании контрольного образца, вырезанного под углом 30° . Ниже на рис. 3 представлены зависимости усилия растяжения P от продольной деформации Δa для контрольных образцов тканей. Видно, что полученные результаты хорошо согласуются с экспериментом для контрольного образца.

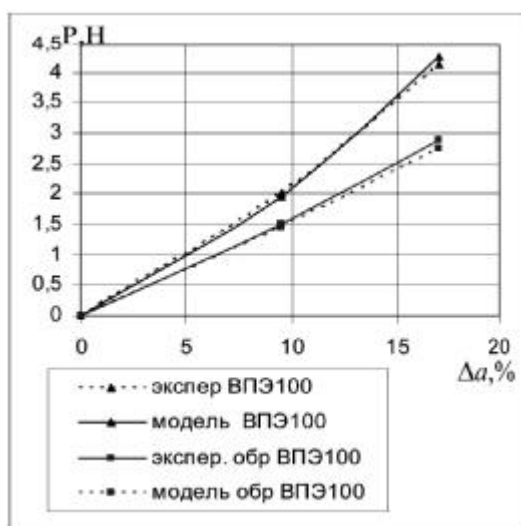


Рис. 3. Зависимость среднего усилия на торце P , Н от Δa экспериментальных данных и теоретической кривой по найденным жесткостным характеристикам при $a = 30^\circ$ для образцов ткани ВПЭ-100

Далее были получены зависимости механических характеристик от интенсивности воздействия плазмы на ткань. Для этого идентификация параметров D_{ijk} проводилась для каждой дозы облучения.

Для полиэфирной ткани эти зависимости представлены на рис. 4. Видно, что при увеличении дозы облучения холодной плазмой коэффициенты, входящие в характеристики (3), уменьшаются, т.е. ткань, модифицированная в потоке холодной плазмы, становится мягче.

На рис. 5 представлены зависимости жесткостных характеристик D_{ij} от деформаций образца при разной продолжительности воздействия холодной плазмы на ткань ВПЭ-100.

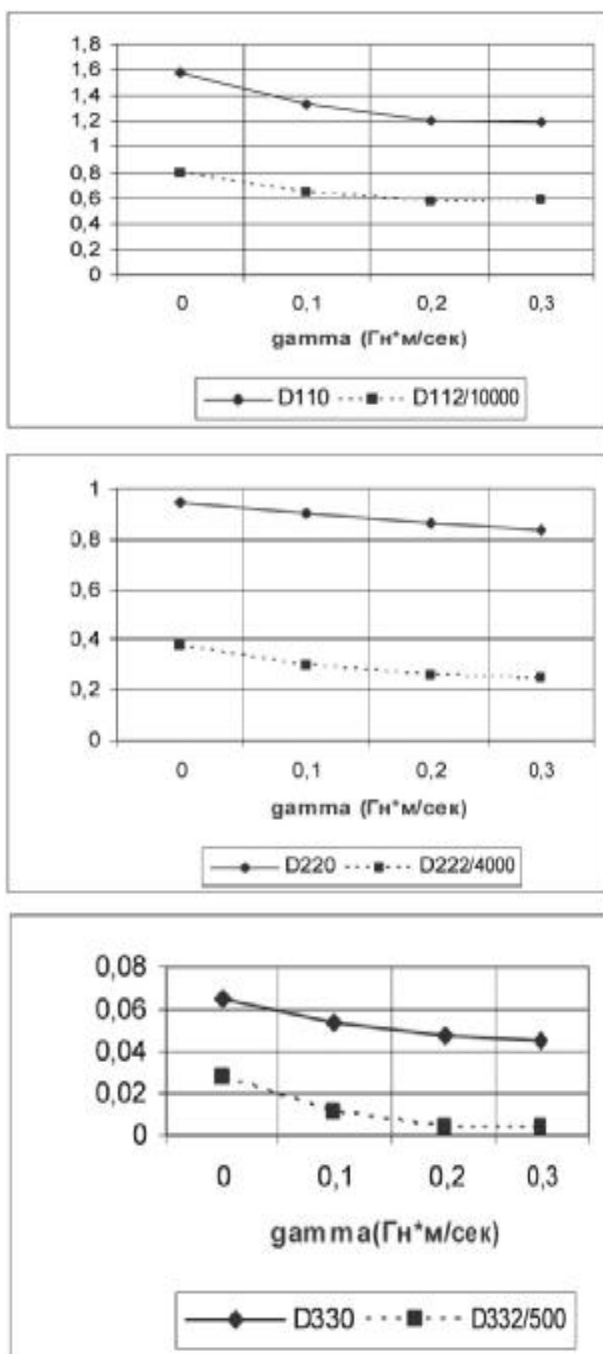


Рис. 4. Зависимости нелинейных жесткостных характеристик от дозы облучения γ для ткани ВПЭ-100

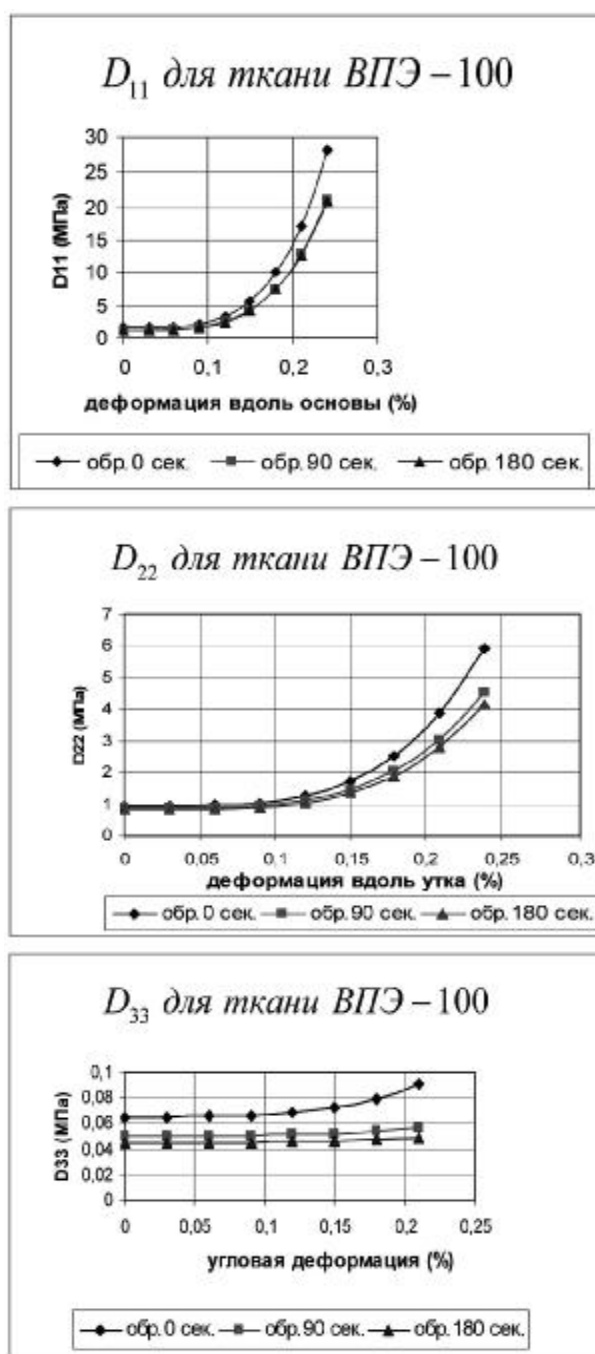


Рис. 5. Графики зависимостей жесткостных характеристик D_{11}, D_{22}, D_{33} от деформаций для необработанных и обработанных образцов из ткани ВПЭ-100

Заключение

Предложенная конечно-элементная модель деформирования нелинейно-упругих тканевых материалов позволяет исследовать закономерности поведения образцов ткани при различных нагрузках с учетом того, что материал не способен воспринимать сжимающие нагрузки.

Разработанная методика экспериментального определения жесткостных характеристик тканей по результатам испытаний образцов, вырезанных под разными углами (0° , 90° , 30° , 45°) к основе при различных растягивающих усилиях, позволила провести анализ влияния обработки ткани холодной плазмой на ее механические характеристики. Выявлено, что падение жесткостей составляет величины порядка 15 % вдоль основы, 35 % – вдоль утка, 45 % – на сдвиг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

3. Абдуллин И.Ш., Хамматова В.В. Влияние потока низкотемпературной плазмы на свойства текстильных материалов. – Казань: Изд-во КГУ, 2003. – 216 с.
4. Серазутдинов М.Н., Каюмов Р.А., Хамматова В.В. Расчет деформационных свойств текстильных материалов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности, 2006, № 5. – С. 34-38.
5. Кутепов А.М., Захаров А.Г., Максимов А.М. Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов. – М.: Наука, 2004. – 496 с.
6. Беляев Н.Н., Рассказова Е.А. Модификация шерстяных и химических волокон обработкой в низкотемпературной плазме // Экспресс информация. Текстильная промышленность. – М.: ЦНИИШерсти, 1983, № 53. – 27 с.
7. Герасимова Н.А., Кузьмичев В.Е., Веселов В.В. Совершенствование физико-химических способов повышения прочности адгезионных соединений // Деп. в ЦНИИТЭЛепром, 08.09.86, № 1755. – ЛП.
8. Шацкая Т.Е., Натрусов В.И., Смирнов Ю.Н., Аллаяров С.Р., Кудинов В.В., Корнеева Н.В. Создание конкурентоспособных композиционных материалов на основе высокопрочных высокомодульных полиэтиленовых волокон // Ползуновский альманах, 2007, № 1. – 189 с.
9. Каюмов Р.А., Нежданов Р.О., Тазюков Б.Ф. Определение характеристик волокнистых композитных материалов методами идентификации. – Казань: Изд-во КГУ, 2005. – 258 с.
10. Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. – М.: Высшая школа, 1985. – 329 с.