

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ НА ПАРАФИНОВЫЙ СЛОЙ ВОЛОКОН И НИТЕЙ В ТРИКОТАЖНЫХ МАТЕРИАЛАХ

SIMULATIONS OF THE EFFECTS OF LOW-TEMPERATURE PLASMA ON THE PARAFFIN LAYER OF FIBERS AND YARNS IN KNITTED MATERIALS

А.А. АЗАНОВА, В.С. ЖЕЛТУХИН, Л.Н. АБУТАЛИПОВА

A.A. AZANOVA, V.S. ZHELTUKHIN, L.N. ABUTALIPOVA

(Казанский национальный исследовательский технологический университет)
(Kazan National Research Technological University)

E-mail: azanovlar@mail.ru

В статье показаны результаты оценочных расчетов энергетического воздействия низкотемпературной плазмы на парафиновый слой волокон и нитей в трикотажных материалах. Приведены результаты моделирования воздействия ионов плазмы на фракционный состав парафина. Полученные данные позволяют объяснить некоторые эффекты плазменной обработки трикотажных материалов.

The article shows the results of approximate calculations of the energy impact of low-temperature plasma on the paraffin layer of fibers and yarns in knitted materials. The results of simulation of plasma ions influence on the fractional composition of paraffin are presented. The results of calculations allow to explain some effects of plasma treatment of knitted materials.

Ключевые слова: парафин, плазменная обработка, модель.

Keywords: paraffin, plasma treatment, model, knitted fabric.

Ранее проведенные экспериментальные исследования показали, что плазменная обработка сурового трикотажного полотна приводит к частичному удалению парафинового слоя и прочих нецеллюлозных примесей и способствует его гидрофилизации [1]. Для объяснения данных эффектов в работе проведено моделирование плазменного воздействия на парафиновый слой волокон и нитей в трикотажных материалах.

На первом этапе оценивали энергетическое воздействие низкотемпературной плазмы. Среднюю толщину парафинового слоя на нити определяли на примере сурового трикотажного полотна арт. М207 (165 г/м², гладь) с линейной плотностью пряжи 15,4 текс (65 м/г), содержание парафинирующих веществ 0,72 % от абсолютно сухой массы, то есть с учетом нормированной влажности су-

рового трикотажного полотна 7% на площади 1 м² содержится 1,1 г парафина (m_п).

При расчете исходили из предположения, что площадь парафинового слоя S_{пн} сопоставима с площадью поверхности нити S_н (S_{пн} ≈ ΣS_н). Допуская, что хлопчатобумажная пряжа представляет собой цилиндр определенного диаметра d длиной L, можно рассчитать площадь поверхности нитей S_н на площади полотна в 1 м²:

$$S_n = L \pi d.$$

Длина нити L на площади полотна 1 м² составит:

$$L = \Pi N = 165 \frac{\text{г}}{\text{м}^2} \cdot 65 \frac{\text{м}}{\text{г}} = 10725 \frac{\text{м}}{\text{м}^2},$$

где Π – поверхностная плотность полотна, г/м²; N – тонины (номер) пряжи, м/г.

Учитывая, что диаметр нити $d \approx 0,22$ мм, получаем:

$$S_H = 10725 \text{ м} \cdot 3,14 \cdot 0,22 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 7,4 \text{ м}^2.$$

Расчетная площадь поверхности нити S_H в полотне площадью в 1 м^2 составит $7,4 \text{ м}^2$ или $7,4 \cdot 10^{12} \text{ мкм}^2$. Средняя площадь парафинового слоя на нитях:

$$S_{\text{пн}} \approx 7,4 \text{ м}^2 = 7,4 \cdot 10^{12} \text{ мкм}^2.$$

Отсюда следует, что средняя толщина парафинового слоя h_n на нити составляет:

$$h_n = \frac{m_n}{\rho_n} = \frac{1,1 \text{ г}}{895 \cdot 10^3 \cdot 7,4 \text{ м}^2} \approx 0,166 \text{ мкм},$$

где ρ_n – плотность парафинирующего состава; при расчете принимали плотность парафина ($\rho_n = 880 \dots 905 \text{ кг/м}^3 \approx 895 \cdot 10^3 \text{ г/м}^3$).

При условии, что нанесенный на пряжу парафин плавится и равномерно распределяется по поверхности волокон, затекая в межволоконное пространство, площадь парафинового слоя на волокнах $S_{\text{пв}}$ будет сопоставима с площадью волокон ΣS_v ($S_{\text{пв}} \approx \Sigma S_v$), следовательно, толщина парафинового слоя h_v будет существенно меньше:

$$h = \frac{m_p}{\rho_p S_{\text{пв}}} = \frac{1,1 \text{ г}}{895 \cdot 10^3 \frac{\text{г}}{\text{м}^3} \cdot 64,7 \text{ м}^2} \approx 0,019 \text{ мкм},$$

где $S_{\text{пв}}$ – площадь поверхности волокон в 1 м^2 полотна, м^2 :

$$S_{\text{пв}} = L \pi d_v n,$$

где d_v – средний диаметр волокна; n – количество волокон в 1 м^2 полотна.

Количество и среднюю энергию $W_{\text{дп}}$ всех ковалентных связей молекул алкановых углеводородов, составляющих парафин, рассчитывали на примере нефтяного парафина. При этом учитывали энергию разрыва $W_{\text{дп}}$ связей С-С и С-Н на слой, приходящийся на площадь поверхности 100 нм^2 (толщина слоя $h = 0,166 \text{ мкм}$, масса – $1,5 \cdot 10^{-17} \text{ г}$), исходя из количества С-С- и С-Н-связей и соответствующих энергий разрыва этих связей. Известно [2], что у насыщенных углеводородов энергия разрыва связей С-С за-

висит от расположения атомов в цепи: равномерно уменьшается в направлении к ее середине. В связи с приблизительным характером оценки это изменение не учитывали и использовали следующие справочные данные: $W_{\text{с-с}} \approx 3,5 \text{ эВ}$, $W_{\text{с-н}} \approx 4,5 \text{ эВ}$ [3]. Результаты расчетов показали, что для разрыва связей С-С и С-Н в молекулах алканов, составляющих парафиновый слой толщиной $0,166 \text{ мкм}$, на поверхности 100 нм^2 необходима энергия:

$$W_{\text{дп}} = \Sigma W_{\text{с-с}} + \Sigma W_{\text{с-н}} \approx 8,2 \cdot 10^6 \text{ эВ}.$$

Известно [4], что объект обработки плазмой ВЧЕ-разряда при пониженном давлении подвергается воздействию ионов плазмообразующего газа, обладающих энергией $50 \dots 100 \text{ эВ}$ (при $W_p = 1,6 \text{ кВт}$, $W_{\text{iAg}} = 59 \text{ эВ}$ и $W_{\text{ивозд}} = 53 \text{ эВ}$), интенсивностью $2 \dots 10 \text{ ион} \cdot \text{нм}^2/\text{с}$ (при $W_p = 1,6 \text{ кВт}$ для Ag – $6 \text{ ион} \cdot \text{нм}^2/\text{с}$, для воздуха – $5 \text{ ион} \cdot \text{нм}^2/\text{с}$). Кроме того, энергия выделяется при рекомбинации ионов: для Ag^+ – $15,36 \text{ эВ}$, для N^+ – $14,56 \text{ эВ}$, для O^+ – $13,61 \text{ эВ}$ [3]; энергия рекомбинации молекулярных ионов сопоставима с энергией рекомбинации атомарных ионов, поэтому в расчетах не учитывалась. Суммарная расчетная энергия ионов, бомбардирующих площадь 100 нм^2 , составит $(11 \dots 14) \cdot 10^6 \text{ эВ}$, что достаточно для разрыва связей С-С и С-Н в молекулах парафина ($W_{\text{дп}} < \Sigma W_i$). Так как энергия связей С-С в алкановых углеводородах слабее, чем энергия связей С-Н [3], то наиболее вероятно, что в первую очередь будет происходить разрыв углеводородных цепей с образованием низкомолекулярных фракций (локальный крекинг), которые потом могут испаряться в процессе обработки в условиях вакуума и продува газа.

На следующем этапе работы для оценки деструктивного воздействия низкоэнергетических ионов плазмы на парафиновый слой и определения возможной глубины их проникновения выполнено математическое моделирование методом Монте Карло. Исходными данными для модели являлись состав плазмы аргона и воздуха, молекулярно-массовое распределение алканов в парафине и следующие параметры плазмы: $P = 13,3 \text{ Па}$, степень ионизации $10^{-7} \dots 10^{-5}$, концентрация

заряженных частиц $n = 10^{15} \dots 10^{17} \text{ м}^{-3}$, газовая температура $60 - 90 \text{ }^\circ\text{C}$, плотность ионного тока на поверхность образца $j_{\text{ип}} = 0,3 \dots 1,0 \text{ А/м}^2$, энергия ионов, поступающих на поверхность образца $W_i = 50 \dots 100 \text{ эВ}$, соответствующая мощности разряда $W_p = 0,8 \dots 2,0 \text{ кВт}$ [6]. Рассматривались только однозарядные ионы, поэтому энергия всех ионов выбиралась одинаковой. Моделировалась обработка парафинового слоя ионами плазмообразующего газа в течение 420 с. Интенсивность обработки задавалась равной 7 ион/($\text{нм}^2 \cdot \text{с}$). Расчеты выполнялись в программе Mat Lab.

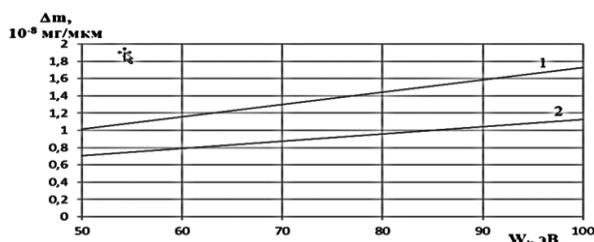


Рис. 1

Согласно расчетам в результате разрыва связей С-С образуются радикалы (алкилы), более 70 % которых соответствуют газообразной ($n \leq 4$) и легкокипящей (в условиях пониженного давления $5 \leq n \leq 16$) фракциям. Удаление газообразной и легкокипящей фракций приводит к изменению молекулярно-массового распределение парафина. Причем при обработке в воздушной плазме его состав изменяется больше, чем в аргоновой. Это связано с тем, что в воздушной плазме присутствуют молекулярные ионы, геометрический размер и масса, и соответственно импульс которых больше, чем у атомных ионов. Средняя молекулярная масса $M_{\text{ср}}$ парафина при обработке в плазме воздуха увеличивается с 331,4 а.е.м. до 334,8 а.е.м., при обработке в плазме аргона – до 334,7 а.е.м. Минимальная глубина проникновения ионов плазмообразующего газа составляет 1,5...8 нм. Расчетная потеря массы парафина Δm (при $W_i = 50 \dots 100 \text{ эВ}$) составляет $(0,69 \dots 1,09) \cdot 10^{-8} \text{ мг/мкм}^2$ при обработке в плазме аргона и $(0,96 \dots 1,72) \cdot 10^{-8} \text{ мг/мкм}^2$ в воздушной плазме (рис. 1 – расчетная масса фракций удаляемого парафина Δm в зависимости от энергии ионов W_i : 1 – воздух; 2 – аргон).

Результаты моделирования качественно согласуются с экспериментальными данными: методом экстракции парафина 4-хлористым углеродом выявлено, что после плазменной обработки его содержание в полотне уменьшается в среднем на 18...25% при обработке в среде воздуха и на 5...8% при обработке в среде аргона.

ВЫВОДЫ

Разработана модель воздействия низкоэнергетических ионов плазмы на парафиновый слой нитей и волокон в трикотажных материалах, которая позволяет рассчитать количество удаленного парафина и минимально возможную глубину проникновения ионов плазмы в парафиновый слой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Азанова А.А., Абдуллин И.Ш., Нуруллина Г.Н. Использование плазмы высокочастотного емкостного разряда пониженного давления в отделке трикотажных полотен // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011, № 6. С.111...115.
2. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. –Л.: Химия, 1991.
3. Гурвич Л.В. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. – М.: Наука, 1974.
4. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях: Теория и практика применения. – Казань: Изд-во Казан. технол. ун-та, 2000.

REFERENCES

1. Azanova A.A., Abdullin I.Sh., Nurullina G.N. Ispol'zovanie plazmy vysokochastotnogo emkostnogo razryada ponizhennogo davleniya v otdelke trikotazhnykh poloten // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2011, № 6. S.111...115.
2. Rabinovich V.A., Khavin Z.Ya. Kratkiy khimicheskiy spravochnik. –L.: Khimiya, 1991.
3. Gurvich L.V. Energii razryva khimicheskikh svyazey. Potentsialy ionizatsii i srodstvo k elektronu. – M.: Nauka, 1974.
4. Abdullin I.Sh., Zheltukhin V.S., Kashapov N.F. Vysokochastotnaya plazmenno-struynaya obrabotka materialov pri ponizhennykh davleniyakh: Teoriya i praktika primeneniya. – Kazan': Izd-vo Kazan. tekhnol. un-ta, 2000.

Рекомендована кафедрой моды и технологии. Поступила 10.04.19.