

И. Ш. Абдуллин, Э. Ф. Вознесенский, И. В. Красина,
А. Ю. Иванников, М. А. Вельбой

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ МОДИФИКАЦИИ РЕЛЬЕФА КУТИКУЛЫ ВОЛОСА ПОД ДЕЙСТВИЕМ СФОКУСИРОВАННОГО НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНОГО ИОННОГО ПОТОКА

Ключевые слова: шерсть, микроструктура, ВЧ плазма, модификация, модель, кутикула, травление, рельеф.

Предложена двумерная модель изменения рельефа кутикулы шерстяного волокна под действием сфокусированного низкоэнергетического ионного потока в низкотемпературной плазме высокочастотного разряда. Проведено несколько циклов моделирования, при каждом происходило изменение геометрии мишени, изменяющийся рельеф приводил к новому распределению электростатических сил.

Keywords: wool, microstructure, RF-plasma, modification, model, cuticula, etching, relief.

The two-dimensional model of change of a relief of a woollen fibre cuticula under the influence of focused low-energy ionic stream in low-temperature plasma of radio-frequency discharge is offered. Some cycles of modelling are spent, at everyone there was a change of geometry of the target, the changing relief led to new distribution of electrostatic forces.

В работах [1–4] экспериментально установлены эффекты модификации волокон натуральной шерсти и волосяного покрова меха при обработке в условиях плазмы высокочастотного разряда пониженного давления. Модификация поверхности кутикулы и внутреннего коркового слоя способствует комплексному изменению свойств волокон. Установлены пять характерных режимов, вызывающих в материале существенные изменения, табл. 1. Показано, что модификация поверхности волокон связана с травлением поверхностных слоев, фокусирующимся в области рельефа низкоэнергетичным ионным потоком.

Таблица 1 – Параметры плазменной обработки при модификации натурального кератинсодержащего материала (энергия рекомбинации (Q_n) составляет для используемого аргона составляет 15,76 эВ)

Параметры разряда	Режим				
	I	II	III	IV	V
	$W_p = 1,2 \text{ кВт}, P = 13,3 \text{ Па}, G_{lr} = 0,04 \text{ г/с}, \tau = 3 \text{ мин}$	$W_p = 1,3 \text{ кВт}, P = 13,3 \text{ Па}, G_{lr} = 0,04 \text{ г/с}, \tau = 5 \text{ мин}$	$W_p = 1,6 \text{ кВт}, P = 13,3 \text{ Па}, G_{lr} = 0,04 \text{ г/с}, \tau = 5 \text{ мин}$	$W_p = 2,0 \text{ кВт}, P = 13,3 \text{ Па}, G_{lr} = 0,04 \text{ г/с}, \tau = 5 \text{ мин}$	$W_p = 2,5 \text{ кВт}, P = 13,3 \text{ Па}, G_{lr} = 0,04 \text{ г/с}, \tau = 20 \text{ мин}$
Кинетическая энергия ионов (Q_k), эВ	69	71	75	92	100
Плотность ионного тока (J_i), А/м ²	0,37	0,38	0,40	0,56	0,7
Время обработки (τ), с	180	300	300	300	1200

Для приближенной оценки изменения рельефа кутикулы волосяного покрова под действием сфокусированного ионного потока предложена численная модель, содержащая следующие допущения:

- ионный поток моделируется совокупностью отдельных детерминированных частиц;
 - с целью упрощения для качественной оценки процесса рассмотрен двумерный случай;
 - плотность ионного потока составляла 4 мкм^{-2} ;
 - значения кинетической энергии ионов принимались постоянными – 90 эВ, потенциальная энергия рекомбинации – 15,76 эВ;
 - продолжительность эксперимента определялась количеством циклов исполнения модели; исследовано 60 циклов, что сопоставлено с 10 мин НТП обработки; таким образом, 1 цикл модели описывает $30 \cdot 10^{10}$ периодов столкновений частиц с поверхностью.
- Для моделирования изменений геометрии кутикулы волоса при травлении низкоэнергетичным ионным потоком построена двумерная модель профиля кутикулы. На модели мишени задавался равномерно распределенный отрицательный заряд с плотностью $25 \text{ е}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-2}$. Траектории ионов определялись исходя из суперпозиции электростатических сил мишени. Стартовые положения ионов задавались на расстоянии 70 мкм от мишени, что соответствует значениям толщины двойного слоя.

Траектории низкоэнергетического ионного потока фокусируются в области выступов мишени (рис. 1), что ранее подтверждено на основе пространственной модели [5].

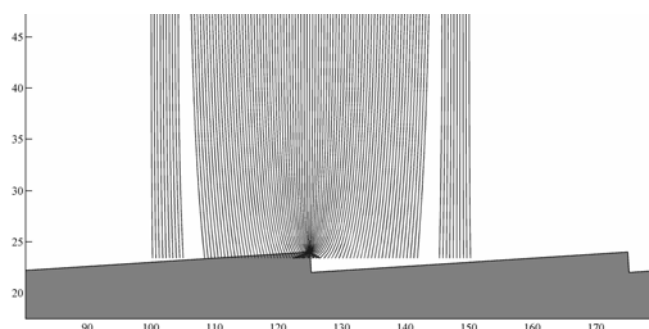


Рис. 1 - Траектории низкоэнергетического ионного потока вблизи мишени (двумерная модель)

Для установления динамических изменений кутикулы волоса при низкоэнергетичном ионном травлении на мишени фиксируются деформации поверхности при каждом столкновении; в качестве элементарной деформации принято снижение рельефа на 0,05 мкм на площади 0,25 мкм². Проведено 60 циклов моделирования, при каждом происходило изменение геометрии мишени, изменяющийся рельеф мишени приводил к новому распределению электростатических сил. Результаты моделирования приведены на рис. 2, зафиксированы изменения при 12, 24, 36, 48, 60-м циклах исполнения модели, что сопоставлено с поверхностными изменениями материала в режимах с I по V (см. табл. 1).

Результаты численного исследования (рис. 2) свидетельствуют о том, что травление поверхности фокусирующимся низкоэнергетичным потоком ионов приводит к сглаживанию рельефа кутикулы. При 60-ти кратном исполнении модели показано удаление 1–2 мкм материала поверхности модели, что соответствует V режиму модификации, при этом рельефность сократилась в ~2 раза.

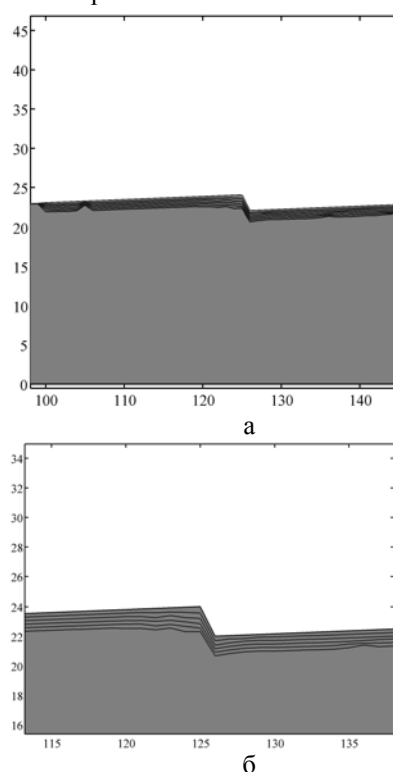


Рис. 2 - Результаты моделирования изменения рельефа кутикулы волоса при низкоэнергетичном ионном травлении (значения осей в мкм)

© **И. Ш. Абдуллин** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. плазмохимических и нанотехнологий высокомолекулярных материалов КНИТУ, abdullin_i@kstu.ru; **Э. Ф. Вознесенский** – д-р техн. наук, доц. той же кафедры; **И. В. Красина** – д-р техн. наук, зав. каф. технологии химических, натуральных волокон и изделий КНИТУ, irina_krasina@mail.ru; **А. Ю. Иванников** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Ин-та металлургии и материаловедения им. Байкова РАН; **М. А. Вельбой** – магистр Ивановского госуд. химико-технол. ун-та.

Полученные результаты свидетельствуют о снижении рельефности кутикулы в 2 раза, однако абсолютного сглаживания рельефа, даже при использовании V режима (режим деструкции), не наблюдается вплоть до полного удаления кутикулы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по соглашению 14.B37.21.2061 от 14 ноября 2012г.

Литература

1. Абдуллин, И.Ш. Модификация поверхности волокон шерсти в низкотемпературной плазме ВЧ разряда / И.Ш. Абдуллин и др. // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2010. – № 2. – С. 11–14.
2. Вознесенский, Э.Ф. Исследование эффектов ВЧ-плазменной модификации волосяного покрова меха методом СЗМ-микроскопии / Э.Ф. Вознесенский, Ф.С. Шарифуллин, И.Ш. Абдуллин, В.С. Желтухин, И.В. Красина // Вестник Казанского технологического университета. – 2011, № 15. – С. 328–331.
3. Вознесенский, Э.Ф. Структурные аспекты модификации натурального кератинсодержащего материала в плазме ВЧ-разряда пониженного давления / Э.Ф. Вознесенский, Ф.С. Шарифуллин, И.В. Красина, И.Ш. Абдуллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2009, № 5. – С. 426–429.
4. Вознесенский, Э.Ф. Теоретические основы структурной модификации материалов кожевенно-меховой промышленности в плазме высокочастотного разряда пониженного давления / Э.Ф. Вознесенский, Ф.С. Шарифуллин, И.Ш. Абдуллин. – Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2011. – 364 с.
5. Voznesensky, E. The numerical model of distribution of low-energetic ion stream on a surface of woolen fibers during modification in the radiofrequency gas discharge / E. Voznesensky, L. Dzhanbekova, I. Abdullin // the 14th annual conference of the Israel Plasma Science and Technology Association (IPSTA). Israel. – 2012. – P. 42.