

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_p) составляет для используемого аргона составляет 15,76 эВ) Параметры разряда Режим I II III IV V
 $W_p = 1,2$ кВт, $P = 13,3$ Па, $G_{Ar} = 0,04$ г/с, $\tau = 3$ мин $W_p = 1,3$ кВт, $P = 13,3$ Па, $G_{Ar} = 0,04$ г/с, $\tau = 5$ мин $W_p = 1,6$ кВт, $P = 13,3$ Па, $G_{Ar} = 0,04$ г/с, $\tau = 5$ мин $W_p = 2,0$ кВт, $P = 13,3$ Па, $G_{Ar} = 0,04$ г/с, $\tau = 5$ мин $W_p = 2,5$ кВт, $P = 13,3$ Па, $G_{Ar} = 0,04$ г/с, $\tau = 20$ мин
Кинетическая энергия ионов (Q_k), эВ 69 71 75 92 100 Плотность ионного тока (j_i), А/м² 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 $25 \cdot 10^{-1}$ 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 низкоэнергетичного ионного потока фокусируются в области выступов мишени (рис. 1), что ранее подтверждено на основе пространственной модели [5].

Рис. 1 - Траектории низкоэнергетичного 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. а б Рис. 2 - Результаты моделирования изменения рельефа кутикулы волоса при низкоэнергетичном ионном травлении (значения осей в мкм)

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.