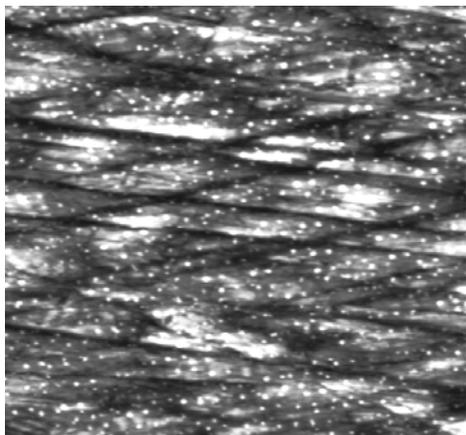


И. И. Васильев, И. Ш. Абдуллин, М. М. Миронов

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ***Ключевые слова: ионно-плазменное покрытие, модель Фольмера-Вебера, ВЧЕ плазменная обработка.**Избирательная обработка в плазме ВЧЕ разряда с фокусировкой ионного потока на вершинах микронеровностей позволяет использовать эффект нанополировки для активации поверхности перед осаждением покрытия. Исследовано осаждение ионно-плазменного покрытия на начальных стадиях роста. Показаны стадии формирования защитных покрытий на обработанном плазмой поверхности стали.**Keywords: ion-plasma coating, model of Volmer-Weber, high-frequency plasma processing.**By election plasma treatment focusing of the ion flux on the tops of asperities can be used to activate the effect of polishing the surface prior to deposition of the coating. We have investigated the deposition of ion-plasma coating on the initial stages of growth. In this article, we showed step of forming the protective coating on the steel surface, which we have treated in plasma.*

В практике получения защитных покрытий наибольшее применение нашли методы ионно-плазменной конденсации из пароплазменной фазы в вакууме. Системы сильноточного низковольтного вакуумно-дугового испарения с интегрально холодным катодом, получившие наименование «конденсация вещества из плазменной фазы с ионной бомбардировкой» или сокращенно «КИБ» позволяют наносить нанокпозиционные, наноструктурированные, покрытия с нанослоями, нанокристаллические и др., а так же покрытия с упрочняющими наночастицами [1] предназначенных для работы в различных областях техники. АСМ-исследования роста на начальных стадиях ионно-плазменных покрытий (рис. 1) показали формирование по механизму Фольмера – Вебера.



**Рис. 1 – АСМ-изображение островков из TiN на поверхности стали. Увеличение ×11400**

Механизм Фольмера-Вебера предполагает конденсацию и рост покрытия по островковой модели. Прежде чем образуется сплошное покрытие, формирование проходит в нескольких этапов:

1) взаимодействие атома с поверхностью (адсорбция атома), который характеризуется переходом физически адсорбированных атомов в дефекты поверхности (поры, трещины,

межзеренные границы) и в кристаллическую решетку твердого тела;

2) миграция по поверхности и образование зародышей. Миграцию атомов на поверхности можно объяснить тем, что после взаимодействия с поверхностью атом стремится занять более выгодную, с энергетически точки зрения, место. Сталь состоит из зерен кристаллической структуры, и, как правило, в решетках кристаллов бывают незаполненные связи или дефекты на поверхности, что приводит к высоким уровням свободной энергии. То есть можно предположить, что дефекты и межграницные области являются центрами зародышеобразования;

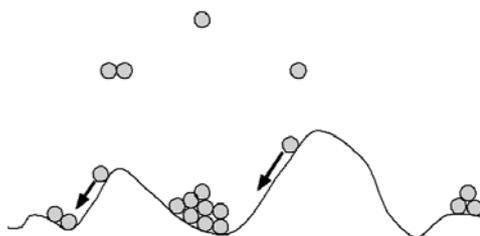
3) рост зародыша за счет миграции атомов по поверхности и атомов поступающих непосредственно из плазмы;

4) срастание зародышей и образование островков;

5) рост островков и их слияние;

6) образование сплошной пленки.

Как мы предполагаем, на шероховатой поверхности центры зародышеобразования концентрированы не на вершинах микронеровностей, а в большей степени, во впадинах и на плоскостях. Так как именно на таких местах существуют высокие уровни свободной энергии (рис. 2).

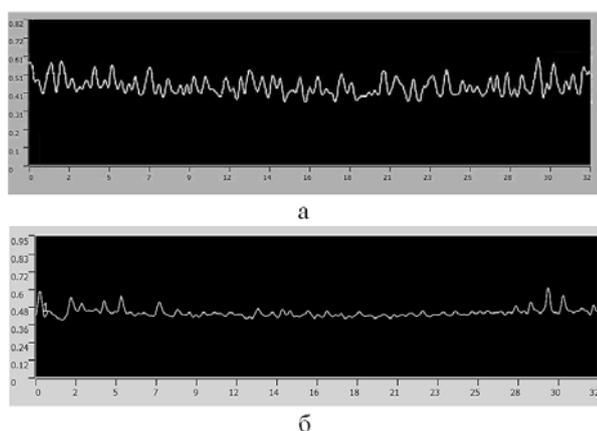


**Рис. 2 – Островковое формирование покрытия на шероховатой поверхности**

Известно, что перед нанесением защитных покрытий используют различные ионно-плазменные обработки для активации и очистки поверхности. Однако, традиционные методы ионной очистки поверхности не позволяют увеличить центры

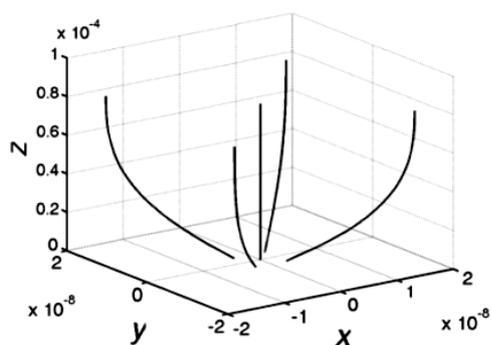
зародышеобразования на рельефной поверхности металлических материалов [2].

Ранее проведенные работы [3, 4] показали, что обработкой в плазме ВЧ емкостного разряда в промышленных частотах 13,56 МГц на металлических поверхностях можно получить эффект нанополировки. Как видно из рисунка 3 после процесса очистки в плазме ВЧ емкостного разряда в атмосфере инертного газа при пониженном давлении шероховатость поверхности уменьшается.



**Рис. 3 – Рельеф поверхности стали марки 9ХФ до ВЧЕ плазменной обработки (а) и после (б) в мкм**

Уменьшение шероховатости происходит за счет бомбардировки ионами вершин микронеровностей, траектория которых показана на рисунке 4. На этом рисунке центральная прямая линия соответствует траектории иона, попавшего в двойной слой над вершиной неровности, кривые линии – траектории ионов, попавших в слой между вершинами вблизи середины расстояния. [5]



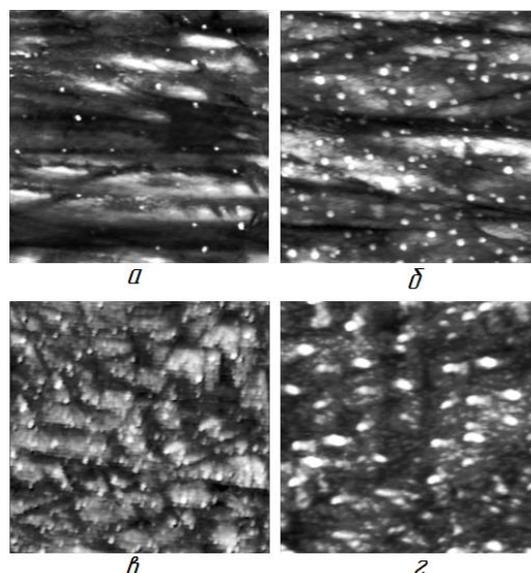
**Рис. 4 - Траектории движения ионов вблизи заряженной шероховатой поверхности [6]**

При энергиях 60-80 эВ ионный поток становится практически однородным и концентрируется на вершинах микронеровностей, то есть реализуется режим избирательной обработки поверхности. Фокусировка ионного потока на вершинах микронеровностей позволяет использовать слабоинтенсивные потоки для нанополировки поверхности. На местах удаленных вершин образуются свободные связи и атомные

дефекты, которые являются центрами зародышеобразования при конденсации покрытия.

После предварительной плазменной обработки на стальных подложках проводились исследования формирования защитного покрытия на начальных стадиях роста. На подложках из стали марки 9ХФ осаждали покрытие TiN в течение 10 и 35с методом ионно-плазменной конденсации электродугового испарения на установке ННВ6.6-И1. Полученные покрытия исследовали методом атомно-силового микроскопии на сканирующем зондовом микроскопе Ntegra фирмы NT MDT. Результаты показаны на рисунке 5.

Из рисунка 5 видно, что при конденсации в течении 10 секунд на поверхности подложки образуются островки с латеральными размерами от 40 до 60 нм и высотой 5-6 нм. Такие островки на обработанной плазмой поверхности (а) образовались в 2-3 раза больше по сравнению с не обработанным образцом (б). Как следует из теории зародышеобразования и микроскопических наблюдений, после образования зародышей до определенных размеров наступает процесс «вторичного» образования зародышей. Из рисунка б г видно, что на поверхности обработанной стали образовались островки с размерами около 100 нм и на свободных местах – «вторичные» островки с размерами 30-50 нм. В результате избирательной обработки ионами ВЧЕ разряда «первичные» и «вторичные» островки во время конденсации распределяются равномерно по всей шероховатой поверхности.



**Рис. 5 - АСМ-изображения островков (увеличение  $\times 17000$ ). Формирование покрытия TiN на поверхности стали с предварительной плазменной обработкой (б, г) и без (а, в), в течение 10 с (а, б) и 35 с (в, г) осаждения**

Таким образом проведенные исследования показывают, что предварительная обработка поверхности существенно влияет на количество центров зародышеобразования на начальных стадиях роста покрытия и не вызывает сомнений

необходимость предварительной плазменной обработки для достижения хорошей адгезии наносимых защитных покрытий.

### Литература

1. Панин В.Е. Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий: учебное пособие / В.Е. Панин, В.П. Сергеев, А.В. Панин; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 254 с.
2. Абдуллин И.Ш. Финишная подготовка поверхности нетеплостойких инструментальных сталей перед нанесением защитных покрытий/ И.Ш. Абдуллин, И.И. Васильев // Вестник Казанского технологического университета. - 2013,- №5, С 180-182
3. Абдуллин И.Ш. Модификация нанослоев в высокочастотной плазме пониженного давления / И.Ш. Абдуллин, В.С. Желтухин, И.Р. Сагбиев, М.Ф.Шаехов. – Казань: Изд-во Казан. технол. ун-та, 2007. – 356 с.
4. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Сагбиев И.Р., Шарафеев Р.Ф. Модификация поверхностного слоя вольфрамо-кобальтового сплава в высокочастотной плазме пониженного давления // Вестн. КГТУ им. А.Н.Туполева.- 2009, №1 - С. 72-74.
5. Сагбиев И.Р. Струйный высокочастотный разряд пониженного давления в процессах модификации поверхностных нанослоев конструкционных материалов. Автореферат д-р техн. наук: 01.02.05.. – Казань: Изд-во Казан. технол. ун-та, 2009. – 32 с.
6. Желтухин В.С., Морозов С.В., Сагбиев И.Р., Сунгатуллин А.М.. Математическая модель взаимодействия ВЧ плазмы пониженного давления с шероховатой поверхностью // XXXIV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС. Сборник докладов. –Звенигород, 2007. – С.284.

---

© **И. И. Васильев** – асп. каф. ПНТВМ КНИТУ, [ilham.v@ya.ru](mailto:ilham.v@ya.ru); **И. Ш. Абдуллин** - д-р техн. наук, проф., зав. каф. ПНТВМ КНИТУ; **М. М. Миронов** - к.т.н., доц. той же кафедры.