

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
Физико-технический институт

А. В. Белый, С. Д. Латушкина

**ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ  
ПОТОКОВ И ИОННО-АССИСТИРОВАННОГО ОСАЖДЕНИЯ**

Минск  
«Беларуская навука»  
2024

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Предисловие</b> .....                                                                                                                | 3  |
| <b>Глава 1. Методы и оборудование инженерии поверхностей с применением концентрированных потоков заряженных частиц</b> .....            | 5  |
| 1.1. Вакуумно-дуговое осаждение покрытий .....                                                                                          | 5  |
| 1.2. Магнетронное распыление покрытий .....                                                                                             | 7  |
| 1.3. Ионно-лучевая обработка .....                                                                                                      | 8  |
| 1.4. Совмещенные методы инженерии поверхностей .....                                                                                    | 10 |
| <b>Глава 2. Выбор материалов и технологических параметров инженерии поверхностей</b> .....                                              | 12 |
| <b>Глава 3. Основные процессы при ионно-лучевой обработке поверхностей с высокой плотностью тока</b> .....                              | 17 |
| 3.1. Особенности развития диффузионных процессов при бомбардировке поверхности заряженными частицами .....                              | 17 |
| 3.2. Влияние плотности ионного тока на структурные параметры поверхностного слоя .....                                                  | 23 |
| <b>Глава 4. Ионно-ассистированное осаждение вакуумных покрытий</b> .....                                                                | 30 |
| 4.1. Особенности структуры покрытий, полученных в условиях ионно-ассистированного осаждения .....                                       | 30 |
| 4.2. Влияние параметров ионно-ассистированного осаждения на структуру и свойства формирующегося поверхностного слоя .....               | 36 |
| 4.3. Ионно-ассистированное осаждение покрытий кубического нитрида бора .....                                                            | 39 |
| 4.4. Ионно-ассистированное осаждение с использованием магнетронных распылительных систем .....                                          | 40 |
| 4.5. Структура и синтез алмазоподобных покрытий с использованием ионно-ассистированного осаждения .....                                 | 43 |
| 4.6. Физико-химические свойства алмазоподобных покрытий .....                                                                           | 47 |
| 4.7. Ионно-лучевая обработка газотермических покрытий .....                                                                             | 49 |
| <b>Глава 5. Осаждение многокомпонентных покрытий из сепарированных потоков вакуумно-дуговой плазмы</b> .....                            | 52 |
| 5.1. Механизмы управления свойствами многокомпонентных покрытий на основе нитрида титана .....                                          | 52 |
| 5.2. Особенности формирования многокомпонентных покрытий с использованием плазмооптической системы при вакуумно-дуговом осаждении ..... | 54 |
| 5.3. Моделирование температурного состояния системы «подложка – покрытие» в процессе вакуумно-плазменного осаждения покрытий .....      | 57 |
| 5.4. Многокомпонентные покрытия на основе нитрида титана, формируемые методом вакуумно-дугового осаждения .....                         | 62 |

|                                                                                                                                                   |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Глава 6. Особенности формирования многокомпонентных покрытий методом магнетронного распыления композиционных мишеней . . . . .</b>             | <b>89</b>  |
| 6.1. Исследования процесса осаждения многокомпонентных покрытий системы Ti–Zr–N с использованием композиционных мишеней . . . . .                 | 89         |
| 6.2. Многокомпонентные борсодержащие покрытия, осажденные методом магнетронного распыления . . . . .                                              | 94         |
| 6.3. Формирование покрытий на основе дисилицида молибдена методом магнетронного распыления для применения в оптических газоанализаторах . . . . . | 101        |
| <b>Глава 7. Поверхностная инженерия металло-керамических материалов с использованием пучковых и плазменных технологий . . . . .</b>               | <b>111</b> |
| 7.1. Моделирование структуры металлокерамических композиционных материалов . . . . .                                                              | 111        |
| 7.2. Создание твердых сплавов с мультимодальной структурой . . . . .                                                                              | 114        |
| 7.3. Поверхностная инженерия твердых сплавов с использованием ионно-плазменных покрытий . . . . .                                                 | 122        |
| <b>Глава 8. Современные тенденции и направления исследований в области инженерии поверхностей . . . . .</b>                                       | <b>123</b> |
| 8.1. Основные механизмы разрушения поверхностей . . . . .                                                                                         | 123        |
| 8.2. Покрытия на основе интерметаллических соединений . . . . .                                                                                   | 125        |
| 8.3. Покрытия на основе высокоэнтропийных сплавов . . . . .                                                                                       | 130        |
| 8.4. Многослойные покрытия . . . . .                                                                                                              | 130        |
| 8.5. Мониторинг контактной разности потенциалов и работы выхода электрона . . . . .                                                               | 133        |
| 8.6. Новые технологические подходы к инженерии поверхностей . . . . .                                                                             | 136        |
| <b>Литература . . . . .</b>                                                                                                                       | <b>139</b> |