

повысить стабильность работы оборудования и качество получаемых покрытий.

Разработанные технологические процессы и основные узлы разрабатываемого оборудования защищены многочисленными патентами Республики Беларусь.

Несмотря на многообразие технологических приемов, используемых при формировании функциональных покрытий, не существует универсальных методов, способных решать все задачи, стоящие перед разработчиками, как в области машиностроения, так и в инструментальной промышленности. Решение каждой задачи требует своего индивидуального подхода, своего метода, своего материала.

УДК 533.9; 533.924

Асташинский В.М.

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В ОБЛАСТИ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
В ИНСТИТУТЕ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА  
ИМЕНИ А.В. ЛЫКОВА НАН БЕЛАРУСИ**

*Институт тепло- и массообмена  
имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск*

*The action of high-power compression plasma flows loaded with doping elements on various materials makes it possible to implement principles of a new scientific discipline under development – surface plasma metallurgy. Such an energy- and resource-saving approach enables one to obtain materials whose surface can be of practically any specified structural-phase composition which is unapproachable to other techniques.*

Прогресс в развитии современных технологий связывается с созданием новых материалов с существенно улучшенными (по сравнению с существующими) эксплуатационными характеристиками, в том числе путем модификации поверхностных свойств широко используемых материалов для придания

им нового требуемого качества. Трудности реализации отмеченного подхода обусловлены необходимостью разработки новых методов модификации свойств материалов, поскольку возможности традиционных способов обработки практически исчерпаны. К настоящему времени исследования по воздействию плазменных потоков на различные материалы ограничиваются условиями либо высокоэнергетического импульсного воздействия (длительностью до нескольких десятков микросекунд, что недостаточно для завершения физико-химических превращений в модифицированном слое), либо более продолжительного, но менее интенсивного воздействия с относительно небольшой скоростью течения плазмы ( $10^5 \div 10^6$  см/с). Такое положение объясняется отсутствием в мировой практике высокоэнергетических плазменных систем, способных работать в квазистационарных режимах при длительностях разряда на уровне сотен и тысяч микросекунд.

Имеющиеся в Институте тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси квазистационарные плазмодинамические системы нового поколения, по совокупности параметров превосходящие все имеющиеся в настоящее время типы плазменных ускорителей, открывают принципиально новые возможности для эффективной модификации поверхностных свойств различных материалов (металлы и их сплавы, порошковые покрытия, полупроводники и др.) с целью существенного улучшения их эксплуатационных характеристик, недостижимых при традиционных методах обработки.

На основании проведенных исследований предложено и развивается новое научное направление – поверхностная плазменная металлургия, в рамках которого разрабатываются методы эффективной структурно-фазовой модификации поверхностных свойств различных материалов при воздействии на них высокоэнергетическими компрессионными плазменными потоками, нагруженными специально вводимыми в плазму мелкодисперсными частицами (молибден, вольфрам,

титан, цирконий и др.), что приводит к глубокому (15–100 мкм) плавлению поверхностного слоя материала, жидкофазному перемешиванию в расплавленном слое легирующих элементов с подложкой и одновременному синтезу новых упрочняющих соединений (интерметаллидов, нитридов, карбидов и их твердых растворов). Такой энерго- и ресурсосберегающий подход, недоступный для других методов обработки, позволяет существенно улучшать эксплуатационные характеристики материалов, широко используемых в промышленности (конструкционные и инструментальные стали, твердые и легкие сплавы, полупроводники и др.).

В рамках реализации принципов поверхностной плазменной металлургии:

- впервые установлены закономерности формирования глубокого (до 50 мкм) модифицированного слоя в образцах конструкционных сталей при воздействии на них компрессионных плазменных потоков (плазмообразующий газ – азот) с легирующими добавками титана, молибдена и хрома. Показано, что такое воздействие приводит к увеличению концентрации внедренного азота и синтезу упрочняющих нитридов легирующих металлов. Изменения структурно-фазового состояния модифицированного слоя приводят к увеличению микротвердости и уменьшению коэффициента трения поверхности до 3–4 раз.

- впервые установлены закономерности формирования под воздействием компрессионных плазменных потоков на образцы широко используемой в промышленности быстрорежущей инструментальной стали Р6М5 (дорогостоящие штампы, инструмент для долбежных операций и др.) с предварительно нанесенным тонким слоем (1 мкм) циркония многозонных поверхностных структур, обеспечивающих существенное улучшение эксплуатационных характеристик модифицированных образцов (увеличение износостойкости и твердости поверхности) за счет формирования нитрида циркония, диспергирования зеренной структуры

и других эффектов, связанных со сверхбыстрой закалкой, а также расширение диапазона термической стабильности до 600-800<sup>0</sup>С.

– впервые при воздействии компрессионным плазменным потоком на образцы легких сплавов титана и алюминия получено существенное улучшение трибологических свойств поверхности, заключающееся в увеличении ее твердости (до 2,5 раз для титана и до 4 раз для алюминия) при уменьшении коэффициента трения до 4,5 раз за счет формирования упрочняющих фаз (нитридов и интерметаллидов).

Принципы поверхностной плазменной металлургии были реализованы и при воздействии компрессионных плазменных потоков на полупроводниковые материалы. Впервые на поверхности полупроводниковых пластин синтезированы под воздействием компрессионных плазменных потоков объемные субмикронные и наноразмерные поверхностные структуры и образования, наноструктурированные металлические, диэлектрические и металл-углеродные покрытия и тонкие пленки. Полученные многокомпонентные кремний-металлические объемные структуры на полупроводниковых пластинах открывают принципиально новые подходы к разработке элементной базы следующего поколения для микро- и оптоэлектроники (интегральные микросхемы, элементы памяти, устройств обработки и отображения информации и др.).

Основными физическими процессами, обеспечивающими реализацию принципов поверхностной плазменной металлургии под воздействием компрессионных плазменных потоков, являются:

– высокоскоростной нагрев поверхности (до температур, превышающих точку плавления легирующих элементов и материала подложки) вследствие термализации кинетической энергии компрессионного плазменного потока при его торможении на поверхности;

– поддержание необходимого уровня температур и давлений в течение времени, достаточного для завершения физико-химических превращений в расплавленном слое и обеспечивающего синтез новых структурно-фазовых элементов;

– жидкофазное перемешивание легирующих элементов с элементами подложки в расплавленном слое под действием высокого давления плазменного потока;

– высокоскоростное охлаждение модифицированного слоя материала в присутствии электрических и магнитных полей, наведенных выносными токами, текущими вдоль потока вследствие вмороженности магнитного поля в плазму.

Управление параметрами процесса, такими как состав плазмы, длительность воздействия, скорость плазмы, ее температура и давление, позволяет получать новые структурно-фазовые состояния материала с физико-механическими характеристиками, представляющими интерес для практических применений.

УДК 536.46

Вегера И.И., Польшаев А.В.

## **РАЗРАБОТКА НОВЫХ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА**

*ФТИ НАН Беларуси, Минск*

*The results and analysis of the research activities performed by Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences in the field of development of efficient technologies for strengthening mechanical engineering parts and units have been presented. It has been shown that there are good prospects for application of the resource saving technologies based on high-energy electrical physical methods of material high-speed induction processing. The research works have found their practical application in many industries and contribute to increasing of the competitiveness*