

ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

А.А. Лозован

«МАТИ»-РГТУ им. К.Э. Циолковского, 121552, г. Москва, ул. Оршанская, 3, тел. (095) 353-8317,
E-mail: plasma@mati.ru

Представлен обзор результатов, полученных в области ионно-плазменного модифицирования поверхностей изделий сложной формы. В работе рассмотрены ионная имплантация и ионное распыление пористых материалов, а также лазерное, плазменное и ионно-ассистированное магнетронное нанесение покрытий.

Введение

Среди различных методов модифицирования поверхности во многих случаях приоритетное применение имеют методы вакуумной ионно-плазменной обработки, такие как ионная имплантация, ионно-плазменное нанесение покрытий и др. Это связано с тем, что применение этих методов позволяет одновременно повышать ряд эксплуатационных свойств, например износостойкость и коррозионную стойкость изделий. Вакуумное ионно-плазменное нанесение покрытий обеспечивает гораздо лучшую их адгезию к подложке, чем у гальванических покрытий, а ионная имплантация позволяет формировать в поверхностном слое метастабильные фазы, недоступные для традиционных технологий, а также существенно интенсифицирует диффузионные процессы, что нашло, например, свое применение в диффузионной сварке и т.д.

В тоже время расширение перечня изделий, поверхность которых может быть модифицирована методами ионно-плазменной обработки, ограничено степенью сложности их формы. Дело в том, что ионная имплантация и большинство методов вакуумного нанесения покрытий, очистка поверхности ионным пучком и др. проводятся по классической схеме: источник частиц – поток – обрабатываемая поверхность. В этих условиях обеспечить равномерную обработку поверхности изделий сложной формы не всегда возможно. Обработка наружных поверхностей методами ионно-плазменной обработки в зоне прямой видимости достигается обычно сканированием пучка заряженных частиц, а также применением манипуляторов деталей и масок (для выравнивания толщины покрытий поверхности) в случае применения потоков частиц любого зарядового состояния. Особенно трудно обеспечить обработку внутренних поверхностей пустотелых изделий.

В данной работе представлен обзор результатов (как теоретических, так и экспериментальных), полученных автором и его сотрудниками в области ионной обработки поверхности подобных объектов, а также нанесения на них покрытий.

Безусловно, огромное разнообразие задач по обработке поверхности изделий сложной формы, выдвигаемых промышленностью, не позволяет предложить универсального метода их решения. Выбор способа решения конкретной задачи зависит от многих факторов, таких как степень сложности формы изделия, материал подложки и покрытия, габариты изделия, условия эксплуатации и т.д. Ниже приводится обзор результатов (как

теоретических, так и экспериментальных), полученных автором и его сотрудниками в области ионной обработки поверхности подобных объектов, а также нанесения на них покрытий.

Основная часть

В исследованиях по ионной имплантации наиболее сложными по форме объектами были пористые материалы, при этом модифицировать необходимо было не только внешнюю поверхность образцов, но и стенки пор.

К началу наших исследований экспериментов по взаимодействию ускоренных ионов с пористыми материалами было проведено крайне мало, а теоретическая разработка этих вопросов практически не проводилась. Между тем перспективность применения ионной имплантации для модифицирования поверхности пористых материалов в различных технологических процессах, а также проблемы радиационной эрозии при ионном облучении пористых материалов (стоящие перед реакторным материаловедением, а также при работе спеченных порошковых изделий, например - пористых, катодов из гексаборида лантана, работающих в условиях сильноточного газового разряда и др.), сделала эти задачи, особенно в теоретическом плане, весьма актуальными.

В то же время необходимо было оценить ограничения, накладываемые ионным распылением пористых материалов на процесс имплантации. Анализ литературных данных распылению пористых материалов ускоренными ионами показал неоднозначность зависимости коэффициента распыления Y от пористости мишени P - Y может как падать, так и расти с увеличением P мишени. Эта неоднозначность объяснялась обычно влиянием геометрии пор на массоперенос из них, при чем авторы ограничивались качественным рассмотрением этого влияния. Кроме того, в большинстве работ не сообщается о характерных размерах пор в исследуемых материалах. Между тем, как показал автор [1], эти данные могут иметь решающее значение при анализе результатов ионной бомбардировки пористых мишеней.

Взаимодействие ионного потока с пористой средой рассматривалось для 2-х идеализированных моделей пористых структур: модели параллельных капилляров и модели сферических пор.

Далее были введены критерии разделения пор по типоразмерам, имеющие физический смысл именно в плане взаимодействия ионного

потока с пористым телом. Бомбардировка пористого тела ускоренными ионами приводит не только к удалению распыленного слоя d с внешней стороны мишени, но и к изменению форм пор, обусловленному неравномерным (вследствие угловой зависимости коэффициента распыления) распылением стенок пор.

Величина распыленного слоя равна $d = Y N_0 / N$, где N_0 - доза облучения, N - число атомов в единице объема мишени. Если за форм-фактор принять отношение характерного размера поры R (для сферических и цилиндрических пор - радиуса и т.д.) к d , то критерий разделения пор по типоразмерам можно записать в виде $L_N = RN / Y N_0$. Знак N при L означает, что данный критерий является размерно-дозовым, т.е. подразделение пор по типоразмерам существенно зависит от дозы облучения. При $L_N \gg 1$ форма пор в процессе облучения меняется незначительно и при этом условии поры были названы макропорами.

Если характерный размер пор соизмерим с величиной проективного пробега иона в твердом теле R_p , то при облучении пористого тела ускоренными ионами практически сразу начнется разрушение формы пор. Так как проективный пробег иона для данной пары ион-мишень зависит от энергии иона, напишем размерно-энергетический критерий разделения пор по размерам в виде $L_E = R / n R_p(E)$, где n - постоянный множитель, величина которого порядка нескольких единиц числа ($n \leq 10$); $R_p(E)$ - проективный пробег иона. Поры, для которых $L_E \leq 1$ являются микропорами, при $L_E > 1$, но не соблюдается условие $L_N \gg 1$, поры промежуточные.

Таким образом критерии L_N и L_E характеризуют пору не как самостоятельный объект, а как элемент в системе взаимодействия пористое тело - ионный поток и разделение пор по типоразмерам производится именно в этом смысле.

Критерии L_N и L_E не только дают возможность подразделять поры по типоразмерам, но и определяют различный качественный подход при описании взаимодействия ускоренных ионов с порами в зависимости от того, к какому типоразмеру они принадлежат. Так задача взаимодействия ускоренных ионов с макропорами практически идентична задаче ионного модифицирования поверхности тел сложной формы (например, внутренних стенок пустотелых изделий). Изучение же процесса взаимодействия ускоренных ионов с микропорами требует исследования динамики изменения форм поры и ее влияния на различные параметры процесса облучения. Следовательно, физические модели, описывающие процесс взаимодействия ускоренных ионов с пористым телом, могут быть разделены на статические (в смысле формы пор) и динамические модели.

Полученные решения уравнений переноса для статических моделей [1] подтвердили экспериментальные результаты по распылению пористых тел и, в то же время, показали, что Y не растет с ростом P так сильно, что может помешать модифицировать стенки пор.

Ряд экспериментов был посвящен проблеме нанесения покрытий на изделия сложной формы.

Определенные возможности выравнивания толщины покрытий, наносимых на поверхности изделий сложной формы, дает метод перепыления, реализованный на созданной под руководством автора установке УМН-60И, предназначенной для нанесения покрытий хрома и нитрида хрома на режущие кромки бритвенных лезвий. Лезвия толщиной 0,1 мм складываются в пакеты высотой около 340 мм, сечение которых, т.е. сечение обрабатываемой поверхности, имеет пилообразный профиль. Напыление производится вертикально расположенным на боковой стенке камеры планарным магнетроном с размерами мишени 400x110 мм. На другой боковой стенке камеры также вертикально установлен ионный источник.

Вследствие указанной геометрии системы распыляемая мишень - подложка при осаждении атомов на зубчатый профиль пакета происходит «затенение» одной кромкой лезвия части поверхности другой кромки, то есть формируется неравномерное по толщине покрытие - с утолщением к вершине кромки.

Негативное влияние этого процесса частично снижается за счет рассеяния распыленных атомов в столкновениях с молекулами газа (рабочее давление около 1 Па). Однако, естественное стремление к улучшению вакуумных условий при нанесении качественных покрытий не позволяет использовать этот эффект в полной мере.

Для решения задачи был использован метод перепыления, суть которого заключается в одновременном (или последовательном) с нанесением применением ионного распыления, реализуемого с помощью ионного источника. Распыление части покрытия в ряде случаев позволяет обеспечить перенос атомов на участки с меньшей толщиной покрытия и, таким образом, обеспечить более равномерную толщину покрытия или даже нанести покрытие на те участки, где оно отсутствовало.

В данном случае геометрия обрабатываемой поверхности такова, что чем глубже к впадине «зуба» находится точка падения иона, тем большая часть распыленных атомов вторично оседает на поверхности обрабатываемого профиля, а наибольший унос материала происходит с вершины «зуба» и прилегающих к нему участков, то есть с участков наибольшей толщины покрытий. Более того, так как ионы, генерируемые ионным источником, падают на поверхность изделия под углом к ней, то при данной энергии ионов (около 3 кэВ) возникает анизотропия пространственного распределения распыленных частиц [2] - направление их преимущественной эмиссии смещается от нормали к поверхности по направлению, зеркальному направлению падающих ионов, т.е. внутрь «зуба», что еще больше увеличивает эффективность перепыления.

Для частичной обработки участков вне зоны «прямой видимости» можно использовать рассеяние осаждаемых частиц на атомах остаточного газа, следовательно, процесс нанесения должен производиться при низком вакууме, что без

выполнения определенных условий негативно сказывается на качестве покрытий. Тем не менее, метод используется для нанесения покрытий на неотъемлемые изделия, т.к. весьма экономически выгоден.

Получение качественных коррозионно-стойких покрытий из Ti и TiN на деталях сложной формы из стали и алюминиевых сплавов реализовано на установке «Декор-3», устройство распыления которой представляет собой триодную систему с накальным катодом. Нанесение покрытий на установке «Декор-3» [3] производится в плазме самостоятельного разряда низкого давления, при этом перемещение обрабатываемых деталей в рабочей камере отсутствует.

Помещение деталей при нанесении покрытий непосредственно в плазму газового разряда, позволяет получать покрытия весьма высокого качества, которые формируются в условиях комплексного воздействия плазмы и потока осаждаемых частиц на поверхность изделия, нагрева изделий до температуры 350 - 500°C, отсутствия капельной фазы и проведения процесса при относительно высоком вакууме (на порядок выше, чем, например, при магнетронном напылении).

Проведенные эксперименты показали удовлетворительную равномерность толщины покрытий, нанесенных на наружную поверхность сложных изделий (отклонение толщины порядка 10%). Толщина покрытий на внутренней поверхности трубных изделий (при $L/d < 5$ и $d \geq 30$ мм, где L и d – длина и внутренний диаметр трубы, соответственно) меньше, чем на наружной поверхности в 1,2 – 2 раза в зависимости от соотношения диаметра и длины изделий, а для изделий типа «стакан» – в 1,5 – 3 раза.

Следующий метод, представленный в работе, – это лазерное нанесение покрытий на внутреннюю поверхность тонких труб при больших значениях отношения L/d [4]. Применяемые ранее методы либо ограничивали минимальный диаметр трубы значением порядка 50 мм, либо формировали покрытия, не отвечающие эксплуатационным требованиям.

Применение для этих целей вакуумно-дугового устройства [5] во-первых, неэффективно из-за больших потерь, вызванных широкой диаграммой направленности плазменного потока, во-вторых, непригодно для нанесения покрытий на относительно длинные трубы малого диаметра.

Предлагаемый метод свободен от указанных недостатков и позволяет к настоящему времени провести обработку изделий с параметрами d_{\min} до 9 мм и L/d до 100. Метод заключается в вакуумном осаждении на обрабатываемую поверхность атомных частиц, генерируемых лазерной

плазмой, полученной при облучении мишени лазерными импульсами.

Эксперименты проводились на специальном лазерном стенде, оснащенном оптическим квантовым генератором ЛТИ-207 с параметрами излучения: $\lambda = 1,06$ мкм; $W = 1$ Дж; $\tau_i = 5 \div 13$ нс; $f = 1 \div 30$ Гц; расходимость лазерного излучения импульсов $\gamma = 3$ мрад. Плотность лазерного излучения на мишени равна примерно $1 \cdot 10^{13}$ Вт/м², что обеспечивает начальную ионизацию любых веществ.

Благодаря качественной подготовке поверхности и доускорению ионов лазерной плазмы, осуществляемого с помощью импульсного источника питания, удалось получить удовлетворительную адгезию медных покрытий на стали и стальных на медной поверхности, которая определялась с помощью методик адгезионных испытаний, разработанных на базе ГОСТа 6806-73 (определение прочности сцепления покрытия с основой при изгибе) и ГОСТа 15140-78 (метод параллельных надрезов при испытании липкой лентой на отрыв).

Заключение

Все вышеизложенное показывает, что при определенной доработке указанные методы ионно-плазменной обработки поверхности изделий сложной формы могут быть успешно внедрены в промышленность.

Список литературы

1. Лозован А.А. Ионная имплантация пористых и компактных конструкционных материалов. // В кн.: Очерки по физико-химии и материаловедению. Под редакцией Б.С.Митина. М.: «СП ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ», 1998. - С.291-308.
2. Ивановский Г.Ф., Петров В.И. Ионно-плазменная обработка материалов. М.: Радио и связь, 1986. - 232 с.
3. Беграмбеков Л.Б., Лозован А.А., Тишкин А.А. Влияние параметров загрузки рабочей камеры на свойства покрытий, нанесенных в плазме ионизированного газового разряда. // В кн.: Взаимодействие ионов с поверхностью. ВИП-14. Материалы 14-ой Межд. конференции. М.: МАИ. - 1999. - С. 323-326.
4. Лозован А.А. Нанесение покрытий на внутреннюю поверхность труб методом импульсного лазерного испарения. // В кн.: Труды 6-ой Межд. конференции «Пленки и покрытия-2001». С-Пб.: С-Пб. ГТУ. - 2001. - С.212-215.
5. Абрамов И.С., В.Г. Вильдгарубе В.Г., А.А. Лисенков А.А. и др. О проникновении потока металлической плазмы в проводящие цилиндрические полости. // В кн.: Тезисы докладов: Прогрессивная технология нанесения металлопокрытий на поверхности. Челябинск. - 1986. - С. 31-35.

ION-PLASMOUS TREATMENT OF INTRICATE SHAPED PRODUCT SURFACES

A. A. Lozovan

«MATI» – RCTU by name K.A.Ciolkovsky, 121552, Russia, Moscow, Orshansky str., 3,
tel: (095) 353-8317, e-mail: plasma@mati.ru

Based ion-plasmoous treatment of intricate shaped product surfaces such as ion implantation, ion sputtering of pore materials and films deposited by pulsed laser deposition technique, magnetron sputtering and low-pressure sputtering.

5-я международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом» 6-9 октября 2003 г., Минск, Беларусь
5-th International Conference Interaction of Radiation with Solids, October 6-9, 2003, Minsk, Belarus