УДК 621.793:621.125

МИРОШНИЧЕНКО В.Н., НОВИКОВ Р.Ю., Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, г. Николаев.

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОГО РЕЖИМА КОНДЕНСАЦИИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

У статті розглянуто можливість підвищення ефективності електронно-променевого випаровування та конденсації у вакуумі захисних покриттів на поверхню. Якісні зміни можливі за рахунок керування енергією руху частинок на різних етапах технологічного процесу за допомогою електромагнітних полів. Приведено теоретичне обґрунтування цього методу.

The method of increase of efficiency of high-speed electron beam evaporation and condensation heat-resistant coatings of substances in vacuum is examined. Quality changes characteristics of coatings at the expense of movement control of evaporated particles are possible. This result is achieved by means of electrostatic and magnetic fields at different part of manufacturing process. Theoretic substantiation of this mode is presented.

Электронно-лучевой метод нанесения жаростойких защитных покрытий (ЭЛП) используется в судовом газотурбиностроении уже более 30 лет, тем не менее работы по интенсивному развитию этого метода продолжаются до сих пор. Покрытия MeCrAlY (в качестве Me может быть Ni и/или Co) используют для защиты лопаток газотурбинных двигателей во всем мире. Актуальным данный метод является особенно для судовых энергетических установок из-за агрессивности элементов содержащихся в морском воздухе. В процессе эксплуатации морских газотурбинных двигателей в их проточную часть попадают соли щелочных металлов, поступающие с топливом и воздухом. В результате, под действием процессов высокотемпературного окисления и коррозии, может начаться процесс разрушения структуры металлов, локализующийся в поверхностных слоях (например, окисление) и/или охватывающий более глубокие слои (сульфидная и водородная коррозии) [1]. Данные покрытия обеспечивают необходимый ресурс лопаток в жестких условиях эксплуатации. Однако, технология ЭЛП отличается большой трудоемкостью и малым коэффициентом использования наносимого покрытия. Усовершенствование данного способа нанесения защитных покрытий позволит ему найти более широкое применение.

Целью данной работы является повышение эффективности ЭЛП посредством изменения технологии процесса нанесения покрытий. Одним из основных факторов, определяющих работоспособность любого покрытия, является прочность сцепления с подложкой (адгезия). Явление адгезии металлов представляет особый научный интерес, т.к. закономерности сцепления металлов тесно связаны с внешними факторами воздействия, такими как скорость движения потока частиц, предварительная обработка подложки и т.д. [3]. Считается, что чем выше энергия движения частиц, тем более глубокое проникновение частиц в подложку, следовательно, выше и адгезия. Высокая скорость необходима для разрушения оксидных пленок на поверхности подложки, препятствующих образованию прочного сцепления в зоне подложка-покрытие, и для формирования промежуточного слоя перехода от ориентации решетки в зерне напыляемой частицы к ориентации в зерне подложки [2]. Известно также, что бомбардировка напыляемой пленки высокоэнергитичными частицами во многом определяет процессы роста и результирующие характеристики покрытия [3]. Таким образом, если энергия движения потока частиц будет достаточно высокой, то это обеспечит высокую адгезию. Но эта скорость должна быть высока

только в начале процесса формирования защитного покрытия и допускается также в конце на завершающем этапе формирования покрытия. Для ЭЛП характерна некоторая специфика структуры и методики нанесения защитного покрытия. Преимущество данного покрытия по отношения к другим способам достигается за счет столбчатости структуры. Процесс формирования покрытия начинается с осаждения частиц испаренного материала на подложку. В результате образуются отдельные центры кристаллизации, вокруг которых происходит рост кристаллитов впоследствии срастающихся и образующих сплошную пленку. Процесс нанесения ЭЛП выполняется в вакууме ($P = 10^{-2} – 10^{-3}$ Па), поэтому после формирования сплошной пленки качество поверхности подложки перестает оказывать доминирующее влияние на свойства наносимого покрытия. И нет необходимости в высокой скорости движения частиц, а даже наоборот. Поддержание скорости движения частиц на том же уровне, что и при формировании начального слоя, приведет к нежелательному изменению параметров структуры и ее свойств по ряду причин:

- рост температуры подложки способствует увеличению подвижности адсорбированных молекул, что повышает вероятность встречи мигрирующих молекул, и как следствие – формирование пленки с крупнокристаллической решеткой;
- существует вероятность уменьшения коэффициента конденсации пара, т.е. частичное испарение уже осажденных атомов материала подложки, благодаря активации поверхности конденсата частицами пара с высокой энергией (рис. 1). Из рисунка видно, что с увеличением интенсивности излучения уменьшается доля сконденсировавшихся частиц пара никеля [5];
- возможно образование нежелательных диффузионных слоев, химических соединений на границе покрытие-подложка;
- изменение свойств подложки [6];
- при высокой плотности потока имеет место образование дуплетов (сдвоенных частиц) и даже многоатомных групп, что также приводит к формированию крупнозернистой структуры, негативное влияние которой на свойство покрытия описаны выше;
- увеличение плотности поступающей энергии на слиток смещает и количество нейтральных частиц в сторону больших энергий. В [4] приведены спектры энергетического распределения атомов и ионов кобальта по нормали к мишени. Увеличение энергетической плотности в два раза приводит к увеличению энергетического состояния испаренных частиц также в два раза;
- наиболее высокоэнергетические частицы располагаются вдоль нормали к мишени, что может привести к усилению неоднородности получаемых пленок по толщине.

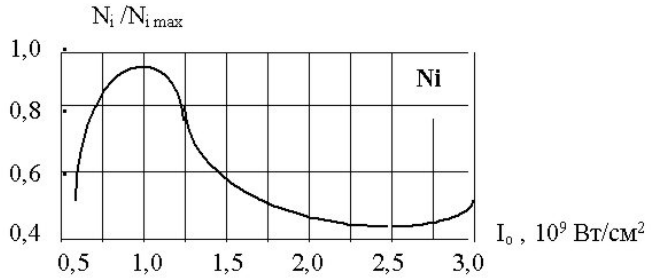

Рис. 1. Эффект реиспарения в зависимости от потока энергии на поверхности слитка испаряемого материала

Учитывая сказанное, необходимо после стадии формирования при ускоренных режимах начальной сплошной пленки уменьшать скорость движения потока испаряемых частиц. В существующих установках управление скоростью конденсации частиц возможно осуществлять за счет изменения мощности электронно-лучевой пушки испаряющей материал напыляемого защитного покрытия, но использование данного способа в качестве регулятора скорости ограничено. При таком способе ускорение процесса нанесения покрытий осуществляется в большей степени за счет увеличения количества частиц осаждаемого материала в камере, и только лишь частично за счет увеличения энергии движения самих частиц.

Кроме того, чрезмерная бомбардировка слитка электронами может привести к разбрызгиванию материала и образованию дефектов на подложке в виде капель испаряемого материала, поэтому существует некий порог в достижении высоких энергий движения частиц.

Решением проблемы реализации предложенной технологии обеспечения повышенной адгезии наносимых защитных покрытий с подложкой возможно с помощью устройств, выполняющих роль ускорителей движения испаряемых частиц. Высокий уровень ионизации паров испаряемого материала (~30 %) позволяет дополнительно управлять энергетикой процесса введением источника, ускоряющего или замедляющего ионы. Это можно выполнить

несколькими способами [4].

На тигель, изолированный от корпуса, подается отрицательное напряжение, а между тиглем и подложкой помещают охлаждаемый анод, выполненный в виде тора, кольца. Тогда под воздействием электрического поля в продуктах испарения при отлете от испаряемого вещества происходит мощная ионизация. Положительные ионы испаряющегося металла возвращаются вновь к слитку, ускоряясь полем, и бомбардируют слиток, выбивая новые атомы. Таким образом, прикладывая электрическое поле, мы значительно увеличиваем скорость напыления.

Больший эффект можно получить при дополнительном использовании воздействия магнитного поля. Вокруг тигля располагают электромагнит, позволяющий концентрировать магнитное поле (с целью ионизации пара) непосредственно в зоне разряда между охлаждаемым анодом и испаряемым веществом, являющимся в свою очередь катодом разрядного устройства. Магнитная индукция аксиально-симметричного магнитного поля над испаряемым материалом позволяет повысить эффективность ионизации увеличением длины пробега электронов и созданием над расплавом области высокой плотности пара при меньшей мощности луча за счет фокусирования электронного луча.

Использование подобных устройств-ускорителей для управления энергией движения потока в процессе осаждения защитных покрытий с помощью электромагнитных полей поднимает вопрос о возможности изменения, улучшения и получения структуры с заданными свойствами в более широком диапазоне. Если направление движения потока особо не сказывается на качественных свойствах структуры наносимых слоев, то влияние скорости движения потока изучено недостаточно, а данные носят противоречивый характер. Установлена явно выраженная зависимость адгезии от скорости напыления, но термолизация кинетической энергии частиц при их торможении вызывает ряд негативных последствий, описанных ранее. В тоже время экспериментальные данные [5] при использовании подобных систем управления энергиею движения испаренных частиц свидетельствуют о возможности расширения температурной области существования заданной текстуры без изменений за счет сохранения этой ориентации при более высоких температурах. Противоречивость этих данных еще раз свидетельствуют о необходимости более глубокого изучения этого вопроса.

Недостатком всех рассмотренных выше способов управления энергетикой испарения путем сочетания разных методов является большой разброс испаренных частиц по энергиям, который колеблется от 10 до 1000 эВ [4]. В связи с этим, параллельно с рассматриваемой задачей возникает и другая – создание энергомонохроматических источников испарения и датчиков контроля уровня энергии испаренных частиц.

Выводы

Предложено изменение технологии процесса нанесения защитных жаростойких ЭЛП, позволяющее увеличить адгезию покрытия с подложкой. Особенность процесса – скорость движения потока частиц на начальном этапе осаждения значительно выше скорости движения в обычных установках и достигается косвенно, через энергию лучей генерируемых ЭЛП, а непосредственно – при помощи специальных устройств, в основе работы которых лежат процессы ионизации пара с последующим управлением процессом осаждения пленок при воздействии на них собственными ионами осаждаемого вещества. Использование подобных устройств делает возможным реализацию технологии процесса нанесения ЭЛП с переменной в более широком диапазоне энергиею движения частиц в течение процесса конденсации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Багерман А.З. Особенности эксплуатации газовых турбин в коррозионной среде // Тяжелое машиностроение. – 2002. – № 4. – С. 29.
2. Белевский В.П., Белоус М.В., Костин Е.Г., Чугаев В.Н. Влияние ионной бомбардировки в процессе осаждения пленок на формирование их структуры, электрофизические и физико-технологические свойства // Электронная техника. – Сер. 3: Микроэлектроника. – М.: ЦНИИ “Электроника”, 1977. – Вып. 5 (84). – С. 104-111.
3. Бешенков В.Г., Григорьев А.Б., Марченко В.А. Импульсы частиц, эмитированных мишенью при интенсивном облучении низкоэнергетичными ионами // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72. Вып. 5. – С. 108-114.
4. Жигалов В. С. Лазерные технологии // Сибирская аэрокосмическая академия им. академика М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 1998 .
5. Костин Е.Г. Применение разрядов в парах испаряемых металлов для осаждения пленок из ионизированного потока // Вопросы атомной науки и техники. – 2006. – № 5. – С. 131-136.
6. Ройх И.Л., Колтунова Л.Н., Федосов С.Н. Нанесение защитных покрытий в вакууме. – М. “Машиностроение”, 1976. – 368 с.
7. Рыбников А.И., Можайская Н.В., Крюков И.И., Круковский П.Г., Тадля К.А., Коларик В., Хуэц-Лоренцо М. Определение ресурса металлических защитных покрытий для лопаток ГТУ // Тяжелое машиностроение. – 2002. – № 10. – С. 42-46.

Надійшла до редколегії 24.03.08.