

6. Resnick, P. Recommender systems / P. Resnick, H. R. Varian // Communications of the ACM. 1997. Vol. 40 (3). P. 56–58.
7. Resnick, P. GroupLens: An open architecture for collaborative filtering of netnews / P. Resnick [et al] // Proc. of CSCW'94. Chapel Hill NC: ACM Press, October 1994. P. 175–186.
8. Aguzzoli, S. Collaborative case-based recommendation systems / S. Aguzzoli, P. Avesani, P. Massa // Lecture Notes in Computer Science. 2002. 2416.

ОБ АВТОРЕ



Макеев Григорий Анатольевич, ассист. каф. выч. мат. и киберн. Дипл. инж.-програм. (УГАТУ, 2003). Дис. о системах совместной фильтрации информации.

УДК 621.793

С. Р. ШЕХТМАН

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Рассматривается технология создания наноструктурированных покрытий на основе вакуумного ионно-плазменного метода в условиях дополнительной ионной бомбардировки. Приведены исследования свойств покрытий, полученных по предлагаемой технологии. Вакуумные ионно-плазменные покрытия; ионная бомбардировка; наноструктурированные покрытия; многослойные покрытия

Применяемые в настоящее время защитные покрытия для целого ряда деталей авиационной техники, работающих в условиях высоких температур, нагрузок и агрессивных сред, не в полной мере отвечают необходимому комплексу требований по их защите. В связи с этим продолжается поиск новых способов и процессов нанесения покрытий в направлении создания композиций, обладающих более высокими эксплуатационными свойствами [1, 2].

В последнее десятилетие карбиды металлов привлекают внимание широкого круга специалистов, занимающихся синтезом этих соединений, изучением их структуры и разнообразных свойств. Высокая температура плавления многих карбидов, их своеобразные механические и физические свойства (большая твердость, абразивная способность, тугоплавкость, пластичность при высоких температурах и др.) обуславливают широкий интерес к покрытиям на их основе. Однако возможности повышения твердости поверхностного слоя при нанесении простых карбидов ограничены [3]. Наиболее перспективными в этом плане являются легированные конденсаты. Карбиды, силициды и карбосилициды металлов обладают уникальным сочетанием высокой твердости, коррозионной стойкости и термодинамической устойчивости, однако получение таких фаз традиционными методами связано с высокой температурой и продолжительностью процесса их синтеза. При этом технологии получения защитных покрытий из таких композиций отсутствуют.

На основе анализа литературных источников [3–6] и предварительных исследований было высказано предположение (гипотеза) о том, что если осуществить в вакууме ионно-плазменное по-

следовательное осаждение веществ системы Ti-C-Si при их одновременной ионной бомбардировке, то возможно получение многослойного покрытия, содержащего такие фазы, как карбиды, силициды и карбосилициды титана, а при последующей термической обработке — регулирование его фазового состава.

Многослойно-композиционные наноструктурированные покрытия достаточно хорошо сопротивляются разрушению в процессе его эксплуатации, благодаря тому, что [4–7]:

- многослойное наноструктурированное покрытие включает в себя чередующиеся тонкие слои переменной твердости, чрезвычайно эффективно тормозит развитие трещины, вследствие создания протяженных полей сжатия (твердые слои чередуются с более мягкими) и барьера на пути ее движения (мягкие тонкие слои);

- снижение модуля упругости покрытия позволяет уменьшить остаточные напряжения в покрытии и соответственно уменьшить градиент напряжений на границе раздела покрытие — основной материал, таким образом, заметно снизив вероятность отслаивания покрытия в процессе эксплуатации;

- многослойная структура покрытия обеспечивает повышенную энергоемкость поверхностных слоев материала основы вследствие ее рассеяния на границах раздела слоев покрытия, что в целом повышает трещиностойкость и вязкость разрушения композиций покрытие — основной материал.

Если толщина покрытия не превышает 100 ... 300 нм, то пленка, как правило, имеет не сплошную, а «островковую» структуру. Многослойное покрытие из слоев, толщина которых не превы-

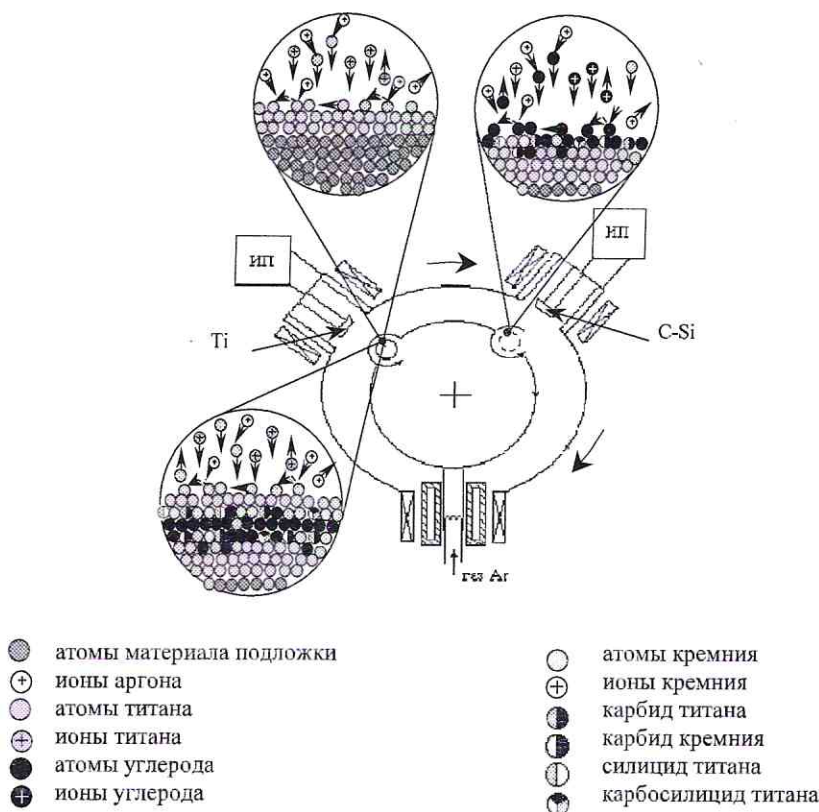


Рис. 1. Схема процесса осаждения многослойных вакуумных ионно-плазменных покрытий

шает 300 нм, представляет материал особого рода, так называемый многослойный композит (нанокомпозит) [10]. Фактически многослойный композит объединяет в себе высокопрочные, практически бездефектные слои и дефекты в виде границ раздела поверхностей между слоями.

Кроме того, интерес к карбосилициду титана как уникальному композиционному материалу, сочетающему свойства карбида титана и силицида титана, в последнее время значительно возрос.

Сущность предлагаемой технологии осаждения многослойных наноструктурированных вакуумных ионно-плазменных покрытий системы Ti-C-Si состоит в том, что в едином операционном цикле предусматривается совмещение дуговых разрядов горящих в парах материалов катодов, выполненных из титана и графита, пропитанного кремнием с самостоятельным сильноточным разрядом [11–13]. Схема процесса осаждения многослойных вакуумных ионно-плазменных покрытий представлена на рис. 1.

Технология предусматривает проведение в одном технологическом цикле предварительной ионной очистки поверхности плазмой самостоятельного сильноточного диффузионного разряда (бомбардировка поверхности производилась с помощью плазменного источника «ПИНК» [8]) в среде инертного газа аргона, в результате чего происходит предварительная очистка поверхности, нагрев деталей ионами металла, осаждение ионов на поверхности с формированием слоя покрытия

при одновременной бомбардировке поверхности ионами инертного газа и последующей термической обработкой, создаваемой плазменным источником «ПИНК».

Очистка поверхности образцов проводится бомбардировкой низкоэнергетическими ионами аргона при давлении 10^{-1} Па, при отрицательном смещении (1100 В) на подложке. Такой режим аргонного травления позволяет избежать внедрения ионов металлической плазмы на стадии предварительной очистки, исключить привязывание микродуг к поверхности, снизить температуру предварительного нагрева.

Бомбардировка поверхности ионами инертного газа аргона проводится для подготовки поверхности обрабатываемой детали перед нанесением многослойных ионно-плазменных покрытий и заключается в термической активации поверхности и образовании центров зародышеобразования, что, в свою очередь, обеспечивает высокую адгезионную прочность покрытий.

Напыление многослойных покрытий происходит в процессе последовательного осаждения Ti и C-Si из плазмы, генерируемой электродуговыми источниками, расположенными на боковой поверхности цилиндрической камеры под углом 120° друг к другу.

На первой стадии осаждения покрытия осуществляются взаимодействие частиц из ускоренного плазменного потока электродугового испарителя (ЭДИ) с титановым катодом с поверхностным слоем, поверхностная миграция атомов и ио-

нов титана, ионное перемешивание адсорбированных частиц. На второй стадии осуществляются одновременное осаждение частиц из ускоренного плазменного потока ЭДИ с титановым катодом и с графито-кремниевым катодом, ионное перемешивание адсорбированных частиц, синтез сложных карбидов (энергия заряженных частиц многократно превышает характерные значения энергии межатомных взаимодействий). На третьей стадии осуществляются переход частиц из ускоренного плазменного потока электродугового испарителя (ЭДИ) с графито-кремниевым катодом в адсорбционный слой, поверхностная миграция ионов углерода и кремния, синтез сложных карбидов на границе раздела слоев Ti и C-Si. Четвертая стадия аналогична второй, с той лишь разницей, что ионы и атомы титана осаждаются на слой, состоящий из углерода и кремния с образованием сложных карбидов титана на границе раздела слоев C-Si и Ti. Следует заметить, что все стадии формирования многослойного многокомпозиционного покрытия реализуются при постоянной бомбардировке поверхности ионами инертного газа аргона. Вторая, третья, четвертая, пятая стадии повторяются в зависимости от заданного количества слоев.

Следует отметить, что в качестве реагента углерода используется углерод из твердой фазы — графит, в отличие от традиционно используемого ацетилена. Осаждение покрытий осуществляется при одновременном воздействии плазменного источника «ПИНК». В процессе осаждения покрытий осуществляется равномерное планетарное вращение обрабатываемой детали относительно собственной оси и одновременно вокруг оси стола, благодаря чему обеспечивается равномерность распределения толщины формируемых покрытий [9, 10].

Разработанная технология позволяет формировать наноструктурированный материал в по-

верхностном слое покрытия. Разработанная технология нашла отражение в технологическом процессе осаждения наноструктурированных покрытий. Схема ТП приведена на рис. 2.

Были исследованы свойства покрытий микрометровыми и нанометровыми слоями, нанесенными на образцы из материалов ВТ6, 12Х18Н9Т, 12Х2Н1А, 38ХМЮА, ЭИ 961-Ш, ЭП-718 ИД. Исследования микротвердости образцов с наноструктурированными покрытиями показали, что во всем диапазоне температур отжига микротвердость многослойного композита выше на 20–50% по сравнению с многослойными покрытиями. При этом максимальная микротвердость наноструктурированного покрытия обнаружена после отжига при температуре 200–300°C, объясняется более активным протеканием диффузионных процессов между слоями, обеспечивающих увеличение содержания карбида и карбосилицида титана. Дальнейшее повышение температуры отжига приводит к нарушению четких границ между слоями и понижению микротвердости.

Электродный потенциал покрытия, осажденного на образцы из материала 13Х11Н2ВМФ, ниже на 20–25% по сравнению с многослойным покрытием. Следовательно, его поверхность в большей степени пассивна, что косвенно свидетельствует о более высокой коррозионной стойкости. Повышение коррозионных свойств наноструктурированного покрытия по отношению к многослойному покрытию достигается за счет увеличения числа границ между слоями, что препятствует проникновению коррозионного воздействия внешней среды в глубь покрытия, тормозит коррозионные процессы на границе среда–металл.

Исследования релаксационной стойкости покрытий системы Ti-C-Si на материалах ВТ6, ЭИ961-Ш, ЭП718 ИД при температурах нагрева 400, 600, 800°C, времени выдержки 4, 8, 16 часов

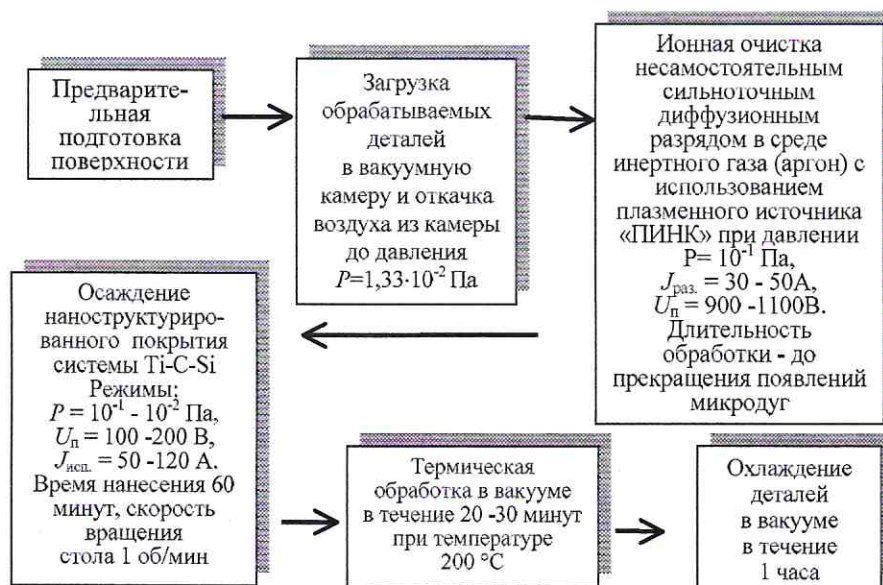


Рис. 2. Схема технологического процесса получения наноструктурированного покрытия системы Ti-Si-C

показали, что у наноструктурированных покрытий микротвердость после выдержки при температуре 600°C в течение 16 часов уменьшается на 10%, в то время как у многослойного покрытия, соответственно, на 25–30%. Наибольшая микротвердость обнаружена у наноструктурированных покрытий после отжига при температуре 200°C, что может быть объяснено увеличением содержания карбида и карбосилицида титана в многослойном композите в процессе термической обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведена разработанная технология создания наноструктурированных покрытий, полученных вакуумным ионно-плазменным методом в условиях дополнительной ионной бомбардировки. Приведены исследования свойств покрытий, полученных по предлагаемой технологии. Установлено, что по сравнению с многослойным покрытием микротвердость наноструктурированного покрытия выше на 20–50%, электродный потенциал ниже на 20–25%, релаксационная стойкость выше на 30%, что связано с увеличением содержания карбида и карбосилицида титана в многослойном композите. Разработанная технология может быть рекомендована для нанесения защитных покрытий на детали, работающие при повышенных температурах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеев, Ю. С. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей / Ю. С. Елисеев, А. Г. Бойцов, В. В. Крымов. М.: Машиностроение, 2003. 512 с.
2. Братухин, А. Г. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей / А. Г. Братухин, Г. К. Язов, Б. Е. Карасев. М.: Машиностроение, 1997. 416 с.
3. Буров, И. В. Современное состояние и перспективы развития технологии вакуумного дугового напыления износостойких покрытий / И. В. Буров, А. А. Лисенков // Вакуумная техника и технология. 2002. Т. 12, № 1. С. 55–59.
4. Андриевский, Р. А. Формирование структуры и микротвердость многослойных дуговых конденсатов на основе нитридов Ti, Zr, Nb и Cr / Р. А. Андриевский, И. А. Анисимова // Физика и химия обработки материалов. 1992. № 2. С. 99–103.

5. Елинсон, В. М. Ионно-плазменные методы конструирования поверхности на основе пленок углерода / В. М. Елинсон // Харьковск. науч. ассамблея. 2003. С. 169–188.
6. Анциферов, В. Н. Многослойные вакуумно-плазменные покрытия на основе карбидов титана и хрома, их структура и свойства / В. Н. Анциферов, С. П. Косогор // Физика и химия обработки материалов. 1996. № 6. С. 61–65.
7. Будилов, В. В. Интегрированные вакуумные ионно-плазменные технологии обработки деталей газотурбинных двигателей / В. В. Будилов, В. Ю. Иванов, В. С. Мухин. Уфа: Гилем, 2004. 216 с.
8. Игнатенко, П. И. Получение многослойных пленок с помощью ВЧ магнетронного распыления мишеней VВ2 и ZrВ2 / П. И. Игнатенко [и др.] // Харьковск. науч. ассамблея. 2003. С. 114–118.
9. Мухин, В. С. Синтез многослойных покрытий на основе композиции титан–углерод в вакууме / В. С. Мухин, В. В. Будилов, С. Р. Шехтман, Н. А. Сухова // Машиноведение, конструкционные материалы и технологии: сб. науч. тр. ОТН АН РБ. Уфа: Гилем, 2003. С. 194–209.
10. Гусев, А. И. Нанокристаллические материалы: Методы получения и свойства / А. И. Гусев. Екатеринбург: НИСО УрО РАН, 1998. С. 205–212.
11. Коваль, Н. Н. Источники низкотемпературной плазмы и электронных пучков на основе дуговых разрядов низкого давления с полым анодом: дис. ... д-ра техн. наук / Н. Н. Коваль. Томск, 2000.
12. Сухова, Н. А. Разработка метода получения высокотвердых композиционных металлографических покрытий / Н. А. Сухова // Вестник УГАТУ. Уфа, 2002. С. 211–214.
13. Будилов, В. В. Способ вакуумного ионно-плазменного нанесения многослойных композитов, содержащих сложные карбиды: положит. реш. о выдаче патента / В. В. Будилов, С. Р. Шехтман, Н. А. Сухова. № 2004121288 от 7.11.2005.

ОБ АВТОРЕ



Шехтман Семен Романович, доцент, нач. отд. орг. учебн. процесса. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1993). Канд. техн. наук по тепл. двиг. ЛА (УГАТУ, 1999). Иссл. в обл. вакуумных ионно-плазм. технологий.