

Особенности формирования многокомпонентных нанокристаллических покрытий на основе нитрида титана вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом

Н. Н. Коваль, Ю. Ф. Иванов, О. В. Крысина, И. В. Лопатин, В. В. Шугуров

Институт сильноточной электроники СО РАН
634055 Россия, Томск
e-mail: krycina_82@mail.ru

Показаны особенности формирования многокомпонентных нанокристаллических покрытий на основе нитрида титана вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом. Описаны преимущества и перспективность модернизаций ионно-плазменной установки, на которой велось осаждение покрытий. Выявлено влияние допирующего элемента на структурно-фазовое состояние и характеристики покрытий на основе нитрида титана.

Введение

В настоящее время для получения многокомпонентных функциональных покрытий используются различные PVD-методы (Physical Vapor Deposition), такие как магнетронное распыление [1, 2], вакуумно-дуговое осаждение [3, 4], комбинированные методы [5, 6], включающие одновременное использование ионных источников, магнетронов, электродуговых испарителей и др. Также исследователи в области синтеза покрытий дополняют напылительное оборудование различными устройствами, которые повышают эффективность процесса осаждения или минимизируют недостатки выбранного метода, например, ионно-плазменными источниками газоразрядной или металлической плазмы, электронными пушками, системами независимого нагрева и охлаждения подложек, блоками подачи напряжения смещения, плазменными фильтрами, системами фокусировки плазменного потока, используют катоды различной конструкции или сложного состава [7–11] и т. д.

Благодаря модернизации оборудования и технологии появилась возможность синтезировать многокомпонентные нанокристаллические покрытия с уникальными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками, такими как сверх- и ультратвердость (40–100 ГПа), низкий коэффициент трения ($<0,2$), высокая степень упругого возврата (80–94 %), упругая деформация более 10 %, высокая прочность на разрыв 10–40 ГПа [12], высокая термическая стабильность (до 1700 °C) [13].

В данной работе для синтеза многокомпонентных нанокристаллических покрытий использовался метод вакуумно-дугового плазменно-ассистированного осаждения, в котором металлическая компонента плазмы формируется при испарении материала катода из катодных пятен дугового разряда, а реакционно-способный газ азот подается в рабочую зону в ионизованном состоянии. Этот метод обладает следующими важными преимуществами, по сравнению с другими методами: 1) широкий диапазон рабочего давления ($10^{-1} \dots 10^{-4}$ Па); 2) высокая степень ионизации (20–100 %); 3) возможность использования в качестве катода практически всех металлов, сплавов и композитов; 4) высокая скорость роста покрытий (~ 10 мкм/ч) [14]. Для реализации метода используемое ионно-плазменное оборудование с целью улучшения характеристик формируемых покрытий было оснащено плазменным источником газоразрядной плазмы, блоком подачи напряжения смещения, работающим в стационарном и импульсном режимах, электродуговым испарителем с улучшенным охлаждением катода, композиционными катодами сложного состава и др.

Цель данной работы – исследование эксплуатационных параметров модернизированной вакуумно-дуговой установки, синтез многофункциональных нанокристаллических покрытий с высокими физико-механическими свойствами и их исследование.

Метод и методика осаждения, их особенности

Экспериментальные работы по исследованию режимов формирования плотной низкотемпературной плазмы, генерируемой при вакуумно-дуговом испарении катодов сложного состава, и ее параметров с целью синтеза многокомпонентных нанокристаллических покрытий проводились на автоматизированной вакуумной ионно-плазменной установке ТРИО. Основными узлами установки являются модернизированный электродуговой испаритель ДИ-100 с усиленным охлаждением испаряемого катода, стандартный электродуговой испаритель установки ННВ6-И1, оригинальный плазменный источник с накаливаемым катодом ПИНК [15], блок потенциального смещения, работающий как в стационарном, так и в импульсном режимах. Стоит отметить, что в качестве материала испаряемых катодов были использованы спеченные композиционные материалы систем Ti-Cu, Ti-Al и Ti-Si, изготовленные в ИФПМ СО РАН [16].

Благодаря таким модернизациям напылительной установки удалось существенно улучшить ионно-плазменные процессы очистки и активации поверхности подложек, азотирования сталей и сплавов, электродугового плазменно-ассистированного синтеза функциональных покрытий, выполняемых в едином вакуумном цикле.

Во-первых, использование модернизированного электродугового испарителя позволило усовершенствовать генерацию потока дуговой металлической плазмы, по сравнению с широко применяемыми дуговыми испарителями (ДИ) установок типа ННВ-6 и «Булат». Благодаря изменению конструкции катодного узла удалось увеличить площадь охлаждаемой поверхности рабочего катода с 28 (ННВ-6) и 30 % – «Булат» до 80 %, тем самым существенно уменьшив его интегральную температуру во время процесса испарения вакуумной дугой. Это, в свою очередь, позволило снизить долю капельной фракции в потоке плазмы. Например, при осаждении Ti-покрытия с использованием стандартного электродугового испарителя установки ННВ-6 при токе дугового разряда 100 А и времени осаждения 10 мин доля объема, занимаемого макрочастицами в

покрытии в ≈ 2 раза больше, чем при применении испарителя ДИ-100 при аналогичных параметрах. Средний размер капель в обоих случаях практически одинаков и равен 0,7 мкм. В то же время количество макрочастиц увеличилось в 2–3 раза при переходе от ДИ-100 к ДИ ННВ-6.

Еще одной отличительной конструктивной особенностью дугового испарителя ДИ-100 является возможность применения в качестве испаряемых катодов пористые материалы (например, силумин или материалы, полученные СВС-методом), что невозможно в случае использования стандартных ДИ. При этом между испаряемым катодом и системой его водоохлаждения ставится медная диафрагма, толщиной 0,5 мм, что обеспечивает достаточно хорошее охлаждение, предотвращая прямой контакт охлаждающей воды с катодом.

Стоит отметить, что источник ДИ-100 предназначен для производительных технологических процессов синтеза покрытий: диаметр рабочего катода составляет 100 мм, а высота 50–60 мм, т. е. объем рабочего материала катода в 2–4 раза больше, чем у катодов для установок ННВ-6 и «Булат», максимальный ток разряда увеличен до 250 А, что позволяет достигнуть скорости роста покрытий до 20 мкм/ч. На рис. 1 представлено распределение скорости роста покрытия TiN, осажденно-го с помощью стандартного и модернизированного дугового испарителя по оси камеры, которая располагается на расстоянии 300 мм от поверхности катода. Видно, что в пределах угла разлета плазменного потока однородность напыления изменяется незначительно (15–20 %) для обоих дуговых испарителей, но средняя скорость роста покрытий для ДИ-100 в 1,5–2 раза выше, чем в случае стандартного плазменного источника (ННВ-6). Это можно объяснить следующим образом. Как известно, интегральная температура катода, скорость перемещения катодных пятен (КП), доля макрочастиц в плазменном потоке, коэффициент эрозии и скорость роста конденсата являются взаимосвязанными параметрами. Так, масса материала, уносимого макрочастицами, в особенности их размеры, значительно уменьшаются с увеличением скорости перемещения КП [17], что напрямую связано с температу-

рой катода в зоне КП и общей температурой катода. То есть при уменьшении температуры катода скорость перемещения катодных пятен возрастает, а доля капельной фазы уменьшается. Кроме того, основное количество капель, генерируемых вакуумной дугой, движется под малыми углами (до 30°) к рабочей поверхности катода [18–19], в то время как подложки для напыления обычно располагаются под углом 90° . Вклад ионной компоненты в скорость роста покрытия увеличивается от ≈ 60 до $\approx 90\%$ (от общего потока частиц), а доля макрочастиц и нейтральных частиц уменьшается с ≈ 40 до $\approx 6\%$ при переходе от малых углов к рабочей поверхности катода до 90° [18]. Таким образом, в случае применения ДИ-100 существенно возрастает эффективность использования ионной компоненты общего плазменного потока, генерируемого катодным пятном, в то время как процентное содержание макрочастиц в формируемом конденсате значительно меньше, чем при использовании стандартных дуговых испарителей установок типа ННВ-6 и «Булат».

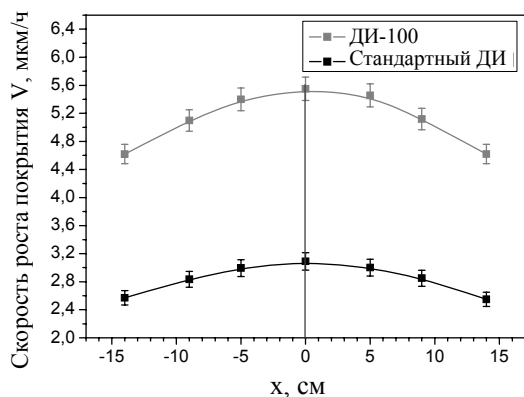


Рис. 1. Распределение скорости роста покрытия TiN для стандартного ДИ (ННВ-6) и модернизированного ДИ-100 (100 А, вращение, $U_b=U_{fl}$) по оси вакуумной камеры

Второй отличительной особенностью метода вакуумно-дугового осаждения в данной работе является использование композиционных катодов на основе титана, например систем Ti-Cu, Ti-Al, Ti-Si, Ti-Cr и др. Такие катоды получают спеканием порошков в вакууме или СВС-методом. Применение композиционных катодов позволяет получать непосредственно поток смешанной плазмы, по

сравнению со случаем, когда одновременно испаряются нескольких одноэлементных катодов. В отличие от мозаичных катодов, в объеме основного материала которого замурованы вставки второго материала, у композиционных катодов, не наблюдаются локальные долговременные привязки катодных пятен. В ранних работах авторами было показано, что характеристики катодов на основе титана с низкой концентрацией дополнительного элемента (≤ 15 ат. %), в частности систем Ti-Cu и Ti-Si, аналогичны или превосходят эксплуатационные свойства титанового катода из сплава ВТ1-0, традиционно применяемого для синтеза нитридтитановых покрытий [20–21]:

1) коэффициенты электропереноса для катодных материалов системы Ti-Cu и Ti-Si с концентрацией добавочного элемента до 15 ат. % и сплава ВТ1-0 при токе разряда в диапазоне $I_d=50\div 100$ А в пределах погрешности одинаковы и равны $\approx 50\text{--}55$ мкг/Кл;

2) скорость роста нитридных покрытий при испарении композитных материалов с низкой концентрацией добавочного элемента и титанового катода аналогичны и равны $\approx 1,5$ мкм/ч для тока разряда $I_d=50$ А и $\approx 3,0$ мкм/ч для $I_d=100$ А;

3) величины характеристик катодных пятен для катодов из композитных материалов и титанового сплава, таких как средняя скорость перемещения катодного пятна, средний ток на пятно, количество пятен при определенном токе разряда близки по значениям (в случае катодов системы Ti-Si наблюдается увеличение скорости движения катодного пятна в 1,5–2 раза, по сравнению с титановым катодом, что говорит об уменьшении доли капельной фазы в плазменном потоке);

4) испарение материала композиционных катодов проходит равномерно без преимущественной эрозии одного из структурных составляющих катода (средний диаметр кратеров $d_{cp}\approx 100$ мкм; размер зерен основных фаз материала композиционного катода 3–20 мкм);

5) особенности капельной фракции для композиционных Ti-Cu катодов с низкой концентрацией меди и титанового катода: занимаемая каплями площадь в случае Ti-12 ат. % Cu в 1,5 раза больше, чем для титанового катода; средний диаметр капель: 0,8 (Ti) и

0,9 мкм (Ti-12ат. % Cu); общее количество капель с титанового катода на 10 % больше, чем в случае с композиционным катодом.

Следующей модернизацией вакуумно-дуговых процессов модификации поверхности материалов и изделий и формирования на их поверхности износостойких покрытий является использование источника газоразрядной плазмы на основе несамостоятельного дугового разряда низкого давления (ПИНК). Такой плазмогенератор характеризуется следующими особенностями:

- большие токи дугового разряда без зажигания катодного пятна (I_p до 250 А);
- низкое рабочее давление ($p=10^{-2}\div 10^{-1}$ Па);
- большая плотность ионного тока (j_i до 10 мА/см²) при концентрации плазмы $n=10^{10}-10^{11}$ см⁻³;
- хорошая однородность ($\pm 5-10\%$) в больших объемах ($\sim 0,1$ м³).

Благодаря подаче рабочего газа в ионизованном состоянии и необходимой величины отрицательного потенциала смещения на подложку, можно легко регулировать энергию ионов, поступающих на поверхность образца, и тем самым проводить следующие ионно-плазменные процессы.

1. Финишную очистку и активацию поверхности образцов в плазме инертного газа при низком рабочем давлении.

Стоит отметить, что при генерации газоразрядной плазмы при низких рабочих давлениях ($10^{-2}\div 10^{-1}$ Па) средняя длина свободного пробега иона увеличивается и превышает характерный размер слоя пространственного заряда, образующегося у подложки, на которую подается отрицательное смещение. При варьировании величины отрицательного смещения ионы, поступающие на поверхность подложки после прохождения слоя пространственного заряда, формирующегося вблизи подложки при низком давлении, ускоряются до энергии, соответствующей величине приложенного потенциала, так как потерями энергии за счет столкновения с другими частицами можно пренебречь. Таким образом, с помощью газовых ионов с энергией в диапазоне $\sim 100\div 1000$ эВ возможно проводить очистку поверхности стравливанием тонкого поверхностного слоя (оксидные пленки, адсор-

бированные газы) образцов, значительным образом не изменяя их исходной структуры, обеспечить их нагрев и активацию для дальнейших ионно-плазменных процессов (азотирование, напыление покрытий).

2. Азотирование сталей и сплавов в азотной плазме несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым и полым катодом.

Ионно-плазменное азотирование сталей и сплавов с использованием ПИНК имеет несколько преимуществ, по сравнению с традиционными методами:

- азотирование можно производить при пониженных температурах (200–550 °С), что позволяет азотировать стали с низкой температурой отпуска;
- обеспечивается возможность приложения отрицательного напряжения смещения к обрабатываемым подложкам (>150 В) для повышения эффективности азотирования;
- за счет непрерывной низкоэнергетичной ионной бомбардировки поверхности происходит удаление окислов, тормозящих процесс диффузии азота вглубь образца;
- длительность процесса азотирования сокращается в 2–5 раз, по сравнению с традиционными методами азотирования;
- протяженность модифицированного слоя в зависимости от условия процесса азотирования и состава подложки может достигать 300 мкм [22, 23];
- использование в качестве рабочего газа только технически чистого азота.

3. Плазменно-ассистированный синтез покрытий.

Стоит отметить, что плазменный источник с накаливаемым катодом эффективен для плазменного ассистирования при магнетронном и вакуумно-дуговом осаждении покрытий. Во-первых, напыление покрытий может проходить при низком давлении ($\sim 10^{-1}$ Па), как следствие этого, покрытие формируется практически без внедрения атомов газа, т. е. с более плотной структурой. Во-вторых, непрерывная бомбардировка растущего покрытия низкоэнергетическими ионами рабочего газа приводит к удалению с поверхности адсорбированного газа и измельчению структуры покрытия. В-третьих, наличие в объеме вакуумной камеры дополнительных ионов, генери-

руемых ПИНК, обеспечивает стабильное горение дугового разряда при малых токах (<20 А). В-четвертых, комплексное применение плазменного источника и системы подачи отрицательного напряжения смещения на подложку с растущим покрытием приводит к значительному снижению доли капельной фазы, которая является существенным недостатком вакуумно-дугового метода осаждения. Уменьшение капельной фракции в такой смешанной плазме (металлическая и газоразрядная), генерируемой дуговыми разрядами низкого давления, происходит за счет отражения макрочастиц, отрицательно заряженных до плавающего потенциала ($-6 \div -8$ В) в плазме дугового газового разряда ($T_e \approx 5 \div 7$ эВ), от образца, находящегося под отрицательным потенциалом ($U = \sim -100$ В) [24–25].

Следующей особенностью модернизированного оборудования и, соответственно, способа осаждения покрытий в данной работе является использование совмещенного блока подачи импульсного и стационарного отрицательного напряжения смещения. Его основными параметрами в импульсном режиме являются величина отрицательного напряжения смещения U_b (0–1000 В), коэффициент заполнения импульса τ (10–90 %), частота следования импульсов ν (10–50 кГц).

Отличительной особенностью импульсного режима подачи потенциала является кратное увеличение ионного тока на подложку на переднем фронте импульса. Так, авторами [26] показано, что при -300 В амплитуда ионного тока на подложку возрастает в 1,5–3 раза при переходе от стационарного к импульсному режиму в зависимости от частоты повторения импульсов. Стоит отметить, что величина тока ионов при увеличении амплитуды импульса напряжения не достигает насыщения, как в случае стационарного режима, и растет пропорционально амплитуде импульсов и их частоте. Причем, скорость нарастания величины ионного тока при увлечении амплитуды импульсов тем больше, чем больше частота следования импульсов [27]. Увеличение ионного тока сопровождается соответствующим изменением свойств плазмы: увеличивается температура электронов и степень ионизации рабочего газа [27].

С помощью импульсной подачи потенциала появляется возможность:

- предварительной очистки подложек от окисных включений и адсорбированных газов без пробоев, и, следовательно, без внесения дефектов на поверхности обрабатываемых подложек;

- прикладывать смещение во время осаждения к диэлектрическим подложкам и пленкам.

Это объясняется компенсацией положительного заряда на поверхности образца (диэлектрик или диэлектрическое включение) потоком электронов в течение паузы между импульсами за время не более 5 мкс [28]. Для эффективной компенсации необходимы частоты выше 1 кГц [28]. Еще одним положительным эффектом использования отрицательного импульсного напряжения смещения при синтезе покрытий является широкий диапазон регулировки параметров, в пределах которого возможно получение различного структурно-фазового состояния и, следовательно, различных физико-механических характеристик у конденсатов.

Синтез покрытий

В качестве материала подложек использовался твердый сплав ВК-8 и нержавеющей сталь 12Х18Н10Т. Образцы перед осаждением были механически отполированы с использованием алмазной пасты до шероховатости $R_a \sim 0,02$ мкм. После чего, все образцы промылись в ультразвуковой ванне в бензине и спирте в течение 10 мин перед непосредственным помещением в вакуумную камеру. Остаточное давление, которое обеспечивалось работой турбомолекулярного насоса, составляло $\sim 10^{-3}$ Па. Непосредственно перед напылением покрытий поверхность образцов очищалась за счет ее бомбардировки ускоренными ионами аргона от оксидных пленок и адсорбированных газов при отрицательном потенциале подложки ≈ 1 кВ. В результате ионной бомбардировки поверхностный слой подложек активировался для обеспечения прочности сцепления покрытия с подложкой, и образцы нагревались до температуры ~ 300 – 400 °С. Формированию нитридного покрытия предшест-

вовала конденсация переходного слоя толщиной ~100 нм из материала катода в аргоновой плазме. Многокомпонентные нитридные покрытия при испарении композиционных катодов систем Ti-Cu, Ti-Al, Ti-Si получали в среде технически чистого азота в следующих диапазонах основных параметров: ток разряда дугового испарителя $I_d=50\div 100$ А, давление рабочего газа $p_{N_2}\sim 0,1$ Па, напряжение смещения $U_b=-(100\div 300)$ В. В зависимости от параметров процесса и материала испаряемого катода скорость роста покрытий была 0,5–3 мкм/ч. Длительность процесса осаждения подбиралась таким образом, чтобы толщина покрытий составила ≈ 3 мкм.

Для исследования свойств сформированных покрытий использовалось следующее оборудование: растровый электронный микроскоп, оснащенный микроанализатором элементного состава, просвечивающий электронный микроскоп, рентгеновский дифрактометр, микро- и нанотвердомер, скретч-тестер, прибор для измерения толщины пленок и покрытий, высокотемпературный трибометр, трехмерный бесконтактный профилометр.

Результаты и их обсуждение

Результаты измерений физико-механических характеристик полученных покрытий: твердости (HV), модуля Юнга (E), степени остаточной деформации (ϵ_{min}), критической нагрузки ($L_{c,max}$), коэффициента трения (μ_{min}), а также концентрация легирующего элемента в покрытии (n), определенная с помощью энергодисперсионного (ЭДА) и рентгенофлуоресцентного (РФА) анализа, средний диаметр кристаллитов основной фазы (d_{av}), приведены в табл.

Все трехкомпонентные покрытия обладают нанокристаллической структурой (рис. 2).

Основной фазой во всех случаях является δ -TiN, средний размер кристаллитов <20 нм. Концентрация добавочного элемента в покрытии и испаряемом катоде одинакова в случае его принадлежности к металлам (Cu, Al). В случае Ti-Si-N-покрытия концентрация кремния уменьшается в 5 раз, по сравнению с его концентрацией в катоде.

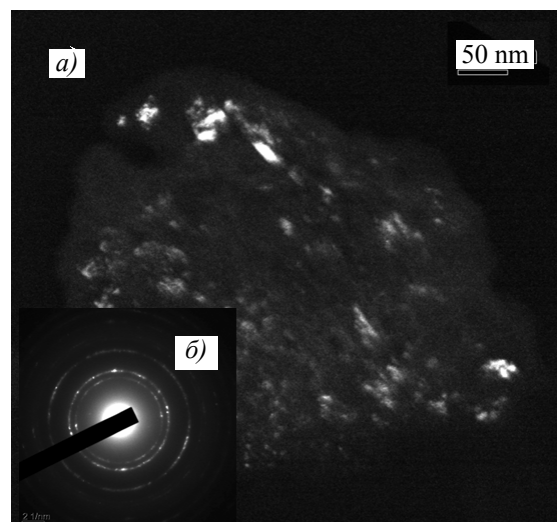


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры покрытия Ti-Si-N: *a* – темное поле, полученное в рефлексе кольца типа [111] TiN; *б* – микроэлектронограмма

Нанокристаллические многокомпонентные покрытия обладают высокой твердостью, превышающей твердость TiN-покрытия в $\sim 1,5\text{--}2,5$ раза, причем при оптимальных условиях осаждения покрытия переходят в разряд сверхтвердых (≥ 40 ГПа). Наибольшая степень остаточной деформации наблюдается у покрытия нитрида титана, наименьшая – у Ti-Si-N-покрытия. Степень упругого восстановления у покрытий, формируемых при испарении порошковых катодов, в 2–3 раза выше, чем у TiN-покрытий.

Таблица

Характеристики покрытий, формируемых вакуумно-дуговым методом при испарении композиционных катодов различного состава

Состав катода	n, ат. %		d_{av} , нм (ПЭМ)	HV, ГПа	E, ГПа	ϵ_{min} , %	$L_{c,max}$, Н	μ_{min}
	(ЭДА)	(РФА)						
Ti	–	–	~ 100	20–25	300–350	≈ 75	3,6	0,40
Ti-12 ат. % Cu	≈ 2	≈ 12	18	38–42	350–400	≈ 50	10,7	0,22
Ti-10 ат. % Si	–	≈ 2	7	34–52	400–800	≈ 20	5,8	0,41
Ti-40 ат. % Al	≈ 20	–	5–6	31–40	450–650	≈ 35	3,6	0,23

Модуль Юнга многокомпонентных покрытий находится в диапазоне значений 350÷800 ГПа. Лучшей адгезией к металлической подложке обладают Ti-Cu-N-покрытия, их разрушение начинается при критической нагрузке на индентер 10,7 Н, что в три раза больше, чем для TiN-покрытия на подложке из твердого сплава. Наименьшим коэффициентом трения обладают покрытия с добавкой меди и алюминия, его значение уменьшается до 0,2, что говорит об увеличении износостойкости данных покрытий.

Заключение

Исследования во время эксплуатации установки после модернизации показали, что все внесенные изменения перспективны для применения в ионно-плазменных процессах: для очистки и активации подложек перед напылением, для ионно-плазменного азотирования и для плазменно-ассистированного синтеза многокомпонентных покрытий с нанокристаллической структурой.

Проведенные исследования покрытий позволили выявить влияние добавочного элемента на структурные характеристики, фазовый и элементный состав, а также физико-механические характеристики покрытий Ti-Cu-N, Ti-Al-N, Ti-Si-N, синтезированных вакуумно-дуговым методом с плазменным ассистированием.

Работа выполнена при содействии РФФИ, по проекту № 11-08-00625-а.

Литература

- Musil J., Vlcek J. // Surf. Coat. Technology. № 112 (1999). P. 162–169.
- Veprek S. et al. // Thin solid Films. № 476 (2005). P. 1–29.
- Martin P. J. et al. // Surf. Coat. Technol. № 200 (2005). P. 2228–2235.
- Flink A. et al. // Surf. Coat. Technol. № 200 (2005). P. 1535–1542.
- Hyun S. Myung et al. // Surf. Coat. Technol. № 163–164 (2003). P. 591–596.
- Martin P. J. et al. // Surf. Coat. Technol. № 163–164 (2003). P. 245–250.
- Anders A. // Vacuum. № 67 (2002). P. 673–686.
- Шулаев В. М., Андреев А. А. // ФИП. 2008. Т. 6. № 1–2. С. 4–19.
- Ribeiro E. et al. // Surf. Coat. Technol. № 151–152 (2002). P. 515–520.
- Шулаев В. М. и др. // ФИП. 2007. Т. 5. № 1–2. С. 94–97.
- Штанский Д. В., Кирюханцев-Корнеев Ф. В. и др. // Физика твердого тела. 2005. Т. 476. Вып. 2, С. 242–251.
- Наноструктурные покрытия / под ред. А. Кавалейро, Д. де Хоссона. М.: Техносфера, 2011. 752 с.
- Zeman P., Capek J., Cerstvy R., Vlcek J. // Thin Solid Films. № 519 (2010). P. 306–311.
- Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления / В. А. Барвинок, В. И. Богданович. М.: Машиностроение, 1999. 309 с.
- Винтизенко Л. Г. и др. // Изв. вузов. Физика. 2001. № 9. С. 28–35.
- Pribytkov G. A., Savitskii A. P., Korosteleva E. N. // Изв. вузов. Физика. 2006. № 8. С. 466–469.
- Coll B. F. Plasma and Deposition Interactions with an Enhanced Arc // Thin Films. (Ed.) Hecht G., Richter F., Hahn J. 1994. DGM Informationsgesellschaft mbH Verlag.
- Хороших В. М. // ФИП. 2005. Т. 2. № 4. С. 200–213.
- Андреев А. А., Саблев Л. П., Шулаев В. М., Григорьев С. Н. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. Харьков: НИЦ ХФТИ, 2005. 236 с.
- Pribitkov G. A., Korostelyeva E. N. et al. // Proceedings: Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk, 2004. P. 167–170.
- Крысина О. В. // Материаловедение, технологии и экология в III тысячелетии: мат-лы IV Всерос. конф. молодых ученых (19–21 октября 2009 г.). Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2009. С. 229–232.
- Щанин П. М. и др. // ФиХОМ. 2001. № 3. С. 16–19.
- Коротаев А. Д. и др. // ФиХОМ. 2004. № 1. С. 22–27.
- Schanin P. M. et al. // J. Tech. Phys. 2000. Vol. 41. № 2. Special Issue. P. 177–184.
- Schanin P. M. et al. // Proc. 1st Int. Congr. on Radiation Physics, High Current Electronics and Modification of Materials. Vol. 3. Tomsk, 2000. P. 438–441.
- Берлин Е. В., Сейдман Л. А. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. М.: Техносфера, 2010. 528 с.
- Kelly P. J. et al. // Surf. Coat. Technol. 2001. № 142–144. P. 635–641.
- Barnat E. and Lu T.-M. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1999. Vol. 17. № 6. P. 3322–3326.