

chenija izdelij iz raznorodnyh materialov v litejnom proizvodstve. Penza: Penzenskij gosudarstvennyj universitet, 161.

10. Demin, D. A. (2005). Optimizacija tehnologičeskogo processa v cehe predpriyatija. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6/1 (18), 48–59.

11. Kovalenko, B. P., Demin, D. A., Bozhko, A. B. (2006). Optimizacija sostava holodnotverdejušhjih smesej (HTS) s propilenkarbonatom. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6/1 (18), 59–61.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук, професор Дьомін Д. О.
Дата надходження рукопису 12.04.2016*

Макаренко Дмитро Миколайович, старший викладач, кафедра автомобілів та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», вул. Чкалова, 17, м. Харків, Україна, 61070
E-mail: makaronesi@ukr.net

УДК 621.793

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.69622

ЭРОЗИЯ ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛ-НИТРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ Ti, Zr, Cr, Mo ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КАВИТАЦИИ

© А. А. Андреев, В. И. Коваленко, В. Г. Маринин, Л. И. Мартыненко, В. А. Столбовой

Многослойные, многокомпонентные покрытия синтезированы методом вакуумно-дугового осаждения металлов и их нитридов на основе Ti, Zr, Cr, Mo. Установлено, что скорость эрозии покрытий при действии кавитации уменьшается с увеличением микротвердости ($H\mu$) от 20 до 32 ГПа, а с ростом до 45 ГПа – увеличивается. Установлена квазилинейная зависимость параметра $\alpha = H\mu^3/E^2$ от микротвердости покрытий

Ключевые слова: покрытие, многослойность, многокомпонентность, нитриды, титан, цирконий, хром, молибден, кавитация, эрозия

Multilayered and multicomponent coatings are synthesized by a method of vacuum-arc sedimentation of metals and their nitrides on the basis of Ti, Zr, Cr, Mo. It is established, that erosion rate of coatings under cavitation decreases with increase in microhardness ($H\mu$) from 20 up to 32 GPa and with growth up to 45 GPa - increases. It is established almost linear dependence of parameter $\alpha = H\mu^3/E^2$ from microhardness of coatings

Keywords: coating, multilayer, multicomponent, nitrides, titan, zirconium, chromium, molybdenum, cavitation, erosion

1. Введение

Нанесение покрытий на поверхности деталей может осуществляться различными способами, в частности, ионно-плазменным с применением вакуумного дугового разряда (ВДР). При реализации технологии с ВДР имеется возможность получать покрытия не только на основе отдельных металлов, но и комбинированные на основе нитридов, карбидов, боридов различных металлов и сплавов. Такие покрытия используются для решения ряда промышленных и научно-технических задач по защите поверхностей деталей машин и механизмов при различных видах нагружения. Наиболее часто применяется защита от низко- и высокотемпературной коррозии, воздействия жестко закрепленных абразивных частиц и воздушноабразивных потоков, износа при трении и существенно меньше от возникшей в последние десятилетия потребности в защите от микроударного воздействия. Особенностью такого воздействия является высокая скорость нагружения, малая его продолжительность, локальность, многократность, стохастичность. При этом в поверхностных слоях возникают напряжения, которые могут быть сравнимы с

пределом прочности материала и сосредоточены в объемах близких к размерам структурных составляющих, что приводит к интенсивному разрушению материала.

В связи с отсутствием методов прогнозирования прочности (стойкости) материалов в условиях такого нагружения возникает необходимость в получении данных для различных материалов, в том числе материалов с модифицированными различными способами поверхностными слоями для повышения их износостойкости. На практике часто это означает определение наиболее эффективного упрочнения поверхности посредством нанесения покрытия. При этом требуется повышенная надежность и долговечность покрытий в эксплуатационных условиях, что связано со знанием, в частности, величины и специфики их разрушения. Получение соответствующих данных для многослойных вакуумно-дуговых металл-нитридных покрытий, легированных при осаждении различными химическими элементами, представляет значительный научно-технический интерес и является предметом настоящих исследований.

2. Анализ литературных данных

Физические процессы формирования эрозионных плазменных потоков из катодов вакуумного дугового разряда и синтезирование на их основе различных покрытий описаны в работах [1–3]. В этих работах представлены исследования преимущественно однокомпонентных покрытий. Исследованы структура, фазовый состав, твердость, трибологические и коррозионные характеристики. В ряде случаев приведены также эксплуатационные характеристики. Однако в последнее время сформировалось представление о более эффективном повышении эксплуатационных характеристик покрытий посредством создания многослойных, многокомпонентных систем, включающих карбиды, нитриды, оксиды [4–6]. В работах [5, 6] рассмотрены многослойные покрытия системы TiN-ZrN-TiN. Исследованы структуры и ряд свойств, в частности, трибологические и механические. Многослойные покрытия имели число слоев от 134 до 533 и средней толщиной 20–125 нм. Получена микротвердость покрытий до 45 ГПа при наименьшей толщине слоев 20 нм. Для этих покрытий при трибологических испытаниях получен износ равный по величине $(1,3 \dots 1,5) \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3 \text{ Н}^{-1} \text{ мм}^{-1}$. В процессе испытаний не наблюдалось скалывания, растрескивания и отслоения покрытий. Коэффициент трения изменяется от 1 до 1,3 в зависимости от условий получения покрытий. Наиболее низкое значение коэффициента наблюдается для покрытия с толщиной слоя около 20 нм. Исследовано изменение свойств покрытий при отжиге в атмосфере кислорода при 700 °С. Показано, что в отличие от однослойного в многослойном покрытии воздействие активной кислородной среды при высокой температуре приводит к фазовым изменениям только в поверхностном слое, не изменяя основное структурное состояние внутренних слоев. Также исследовано влияние величины периода двухслойной композиции типа TiN/ZrN, TiN/CrN и типа Cr/CrN на структуру и ряд механических свойств [7–9]. Влияние микроударного нагружения на покрытия, осаждаемые с применением такой технологии, не исследовалось. Однако получение таких данных представляет значительный практический интерес, обусловленный возможностью использования покрытий с более высокими свойствами для защиты элементов энергетического оборудования и, соответственно, повышения их эксплуатационного ресурса.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является получение данных о величине скорости эрозии (разрушения) многослойных, многокомпонентных вакуумно-дуговых покрытий при микроударном нагружении, обусловленном кавитацией.

Задачи исследования:

- получить на базе металлов Ti, Zr, Cr, Mo многослойные, многокомпонентные металл-нитридные покрытия;
- измерить скорость эрозии покрытий;
- определить связь скорости разрушения с механическими свойствами покрытий.

4. Материалы и методика эксперимента

Покрытия формировали на установке типа «Булат» из эрозионной плазмы катодов вакуумного дугового разряда при различных токах дугового разряда, обеспечивающих устойчивое горение дуги. Для катодов из титана, циркония, хрома ток дугового разряда равен 100 А, для молибдена – 130 А, а для катода сложного состава типа TiZrAlCrMo – 120 А. Покрытия осаждали на подложки, изготовленные из нержавеющей стали 12Х18Н9Т. Размер подложек 18×18×2 мм. Перед осаждением покрытий подложки полировали и проводили химическую очистку в ультразвуковой ванне в щелочном растворе. Затем подложки помещали в вакуумную камеру, откачивали ее до давления $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па, включали испаритель и производили очистку их поверхности бомбардировкой ионами эрозионной плазмы путем подачи на них отрицательного потенциала 1300 В в течение 5 мин.

Покрытия на основе одного металла системы Me-MeN-Me-MeN- получены осаждением исходного «чистого» металла (Me) в течение 1 минуты при давлении в камере $5,3 \cdot 10^{-3}$ Па, а нитридного покрытия в течение последующих 5 минут при давлении 0,53 Па. Процесс проводили многократно до получения заданной толщины покрытия. Более сложные покрытия, например, системы Me_1Me_2 - Me_1NMe_2N - Me_1Me_2 - осаждали при двух непрерывно работающих катодах и непрерывном вращении поворотного устройства с установленными на нем подложками при изменении давления в вакуумной камере по указанной схеме. При формировании покрытия стационарный отрицательный потенциал на подложке равен 200 В. Перечень исследованных покрытий представлен в табл. 1.

Таблица 1

Исследованные покрытия

Номер покрытия	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Тип покрытия*	I	I	I	I	I	II	II	II	II	II	IV	C	C	III
Тип металла	Zr	Ti	Cr	Mo	Cr	Ti,Mo	Zr,Cr	Ti,Cr	Ti,Zr	Zr,Mo	**	Zr	Cr	Ti

Примечание: * I – Me-MeN-Me-; II – $Me_1Me_2 - Me_1NMe_2N - Me_1Me_2$; III – MeN; ** IV – Mo, Ti, Cr, Al, V – MoN TiN CrN AlN VN-...

Эрозионную стойкость образцов измеряли на установке, описанной в работе [10]. Для создания кавитационной зоны использованы ультразвуковые волны. При этом сигнал от генератора подается на магнестрикционный преобразователь механически соединенный с концентратором экспоненциального профиля, что обеспечивает увеличение амплитуды колебаний торцевой поверхности концентратора до 30 ± 2 мкм при частоте 20 кГц. Под торцевой поверхностью концентратора, установленного в сосуде с водой, формируется зона с развитой кавитацией. Образец устанавливается на расстоянии 0,50 мм от поверхности концентратора. Эрозию образцов измеряли гравиметрическим методом. Точность измерения весовых потерь, обусловленных эрозией, равна $\pm 0,015$ мг. Измеряли зависимость потерь от времени воздействия кавитации и по этим данным строили кинетические кривые разрушения материала образцов. На квазилинейных участках кинетических кривых определяли скорость разрушения.

Абразивный износ измеряли по схеме плоскость-диск. Диск изготовляли из материала с жестко закрепленными частицами абразива. Скорость движения поверхности диска, которая контактирует с плоскостью образца, равна 4,38 м/с, при нагружении образца 2,2 Н. Измеряли весовые потери образца за фиксированный промежуток времени. Микротвердость (H_{μ}) образцов измеряли на приборе ПМТ-3. Характер разрушения исследовали с помощью оптического микроскопа ММР-4.

5. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Величины эрозии покрытий, определяемые убылью массы, измерены на стенде МСВ [10] и представлены в виде кинетических кривых для некоторых покрытий на рис. 1.

Анализ характера изменения кинетических кривых, полученных для покрытий, представленных в табл. 1, показывает, что кривые имеют два участка. Протяженность первого участка зависит от вида покрытия и изменяется от небольших значений до 5,4 кс. Скорость разрушения на этом участке выше по сравнению со скоростью на втором, величина которой близка к некоторому постоянному значению для каждого покрытия. Значения этой величины (V_m) вычислены для исследованных покрытий.

Полученные данные для V_m покрытий типа I (табл. 1), осажденных из эрозионной плазмы Ti, Zr, Cr, Mo катодов и структурно имеющих прослойки из исходного «чистого» металла показывают, что они в зависимости от используемого металла обладают значениями V_m в 15–20 раз большими по сравнению с покрытиями типа MeN (№ 12–14, табл. 1). При сравнении величин V_m покрытий № 1,2,9, полученных на основе Ti и Zr, установлено, что покрытие № 1 имеет скорость разрушения \sim в 2 раза большую по сравнению с V_m для покрытия № 2, а V_m покрытия № 9 принимает промежу-

точные значения, зависящие от состава покрытия. Такая тенденция в характере изменения скорости разрушения этих покрытий соответствует установленной ранее для высоковакуумных Ti и Zr покрытий и нитридов на их основе [11]. При формировании металл-нитридных покрытий с использованием Ti и элементов VIa подгруппы (Cr, Mo) по описанному способу с прослойками из исходного «чистого» металла скорость разрушения покрытия с Mo в 2,05 раза меньше по сравнению с использованием хрома. Замена Ti на Zr существенно ухудшает стойкость покрытий. Покрытия на основе только элементов VIa подгруппы также имеют высокую скорость разрушения при микроударном нагружении, создаваемом кавитацией.

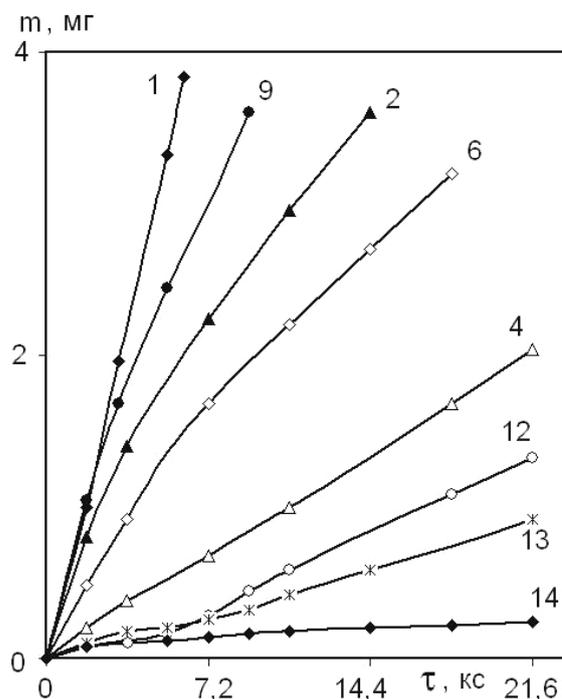


Рис. 1. Зависимость массовых потерь (m) покрытий от времени кавитационного воздействия (τ). Номера кинетических кривых соответствуют номерам покрытий, представленных в табл. 1

Для полученных покрытий проведены измерения их микротвердости (H_{μ}), модуля упругости (E) и определена величина $\alpha = H_{\mu}^3 / E^{*2}$, где $E^* = E / (1 - \nu)$, а ν – коэффициент Пуассона. Величина α в соответствии с данными работы [12] со ссылкой на работу [13] характеризует сопротивление покрытий пластической деформации. Зависимости величины α и скорости разрушения исследованных покрытий V_m от микротвердости H_{μ} представлены на рис. 2.

Верхняя линия на рис. 2 представляет взаимосвязь α и H_{μ} в интервале значений H_{μ} от 20 до 45 ГПа, что соответствует кривой на рис. 4, б работы [12]. Темными маркерами обозначены экспериментальные значения величины α для исследованных покрытий.

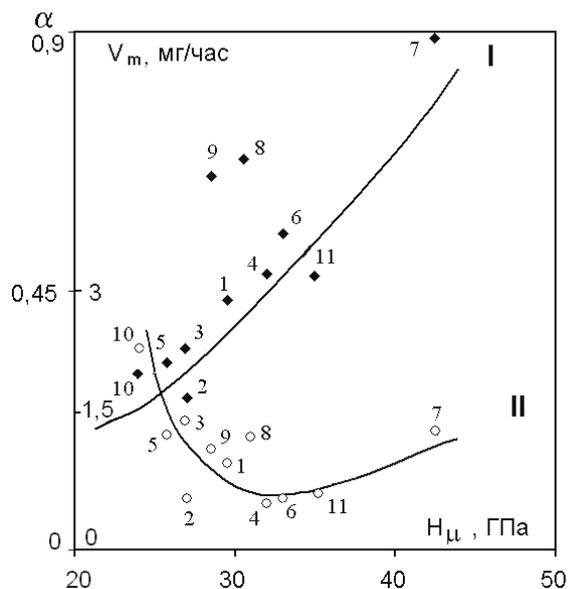


Рис. 2. Зависимость α (I) и V_m (II) от микротвердости покрытий H_{μ} . Кривая I соответствует данным работы [12]. Черные и светлые маркеры – экспериментальные значения для покрытий, номера которых соответствуют приведенным в табл. 1

Видно, что взаимосвязь α и H_{μ} подобна представленной в работе [12], но значения α для фиксированного H_{μ} выше на 10–15 %, за исключением образцов покрытий № 8, 9, у которых значения α больше 22 %. Для зависимости V_m от H_{μ} наблюдается интервал значений микротвердости, которому соответствуют минимальные значения V_m . Эти покрытия имеют значения α близкие к 0,5 и содержат в своем составе Mo. Из рис. 2 также однозначно следует, что покрытия, содержащие хром, имеют низкую стойкость к воздействию кавитации.

Результаты исследований абразивного износа покрытий, представленные на рис. 3 (кривая А) показали, что за фиксированное время эксперимента износ уменьшается с увеличением H_{μ} от 20 до 32 ГПа, а затем вновь возрастает.

Эта зависимость аналогична зависимости скорости эрозии покрытий V_m от H_{μ} при кавитации. Интегральные величины V_m и V_a имеют минимальные

значения для одного и того же покрытия, в составе которого присутствует Mo.

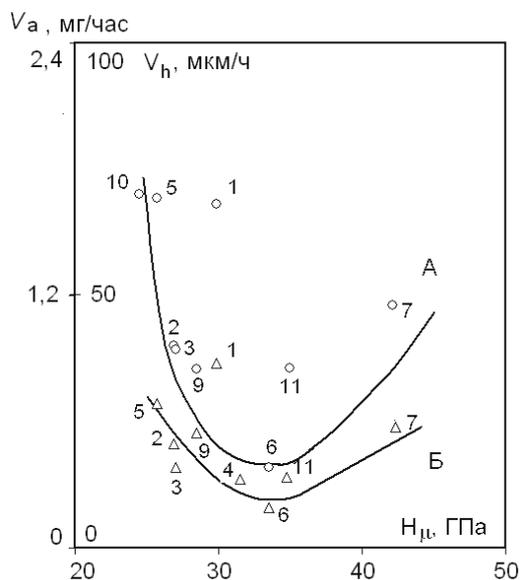


Рис. 3. Зависимость величины разрушения (V_a) покрытий при воздействии жестко закрепленными абразивными частицами (кривая А) и максимальной скорости разрушения в глубину на дефектах покрытий (V_h) от H_{μ} при воздействии кавитации (кривая Б). Маркеры соответствуют номерам покрытий в табл. 1

Измерения максимальной скорости разрушения покрытий в зоне расположения дефектов (кривая Б) показывают, что скорость (V_h) на порядок больше интегральной скорости V_m представленной в тех же единицах измерения для одних и тех же покрытий.

Анализ фотографий зоны разрушения покрытий при воздействии кавитации, типичные образцы которых приведены на рис. 4, позволяет сделать заключение о наличии двух видов разрушения.

В первом случае (рис. 4, а, б) имеет место высокая прочность связи между слоями, при этом разрушение вначале концентрируется возле дефектов, которые создаются капельной фазой покрытия. При малой адгезии между слоями к этому виду дополнительно присоединяется макроразрушение слоев (рис. 4, в).

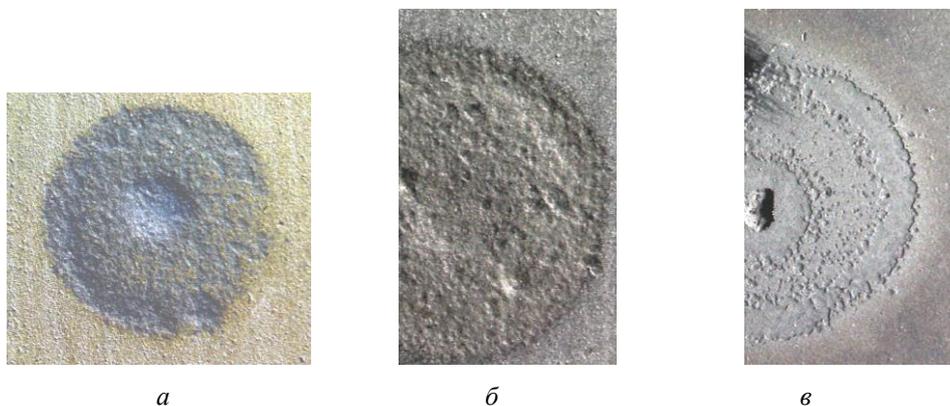


Рис. 4. Зоны разрушения покрытий:
а – покрытие № 2 ×7; б – покрытие № 6 ×10; в – покрытие № 4 ×10

6. Выводы

Результаты проведенных исследований показали, что использование вакуумно-дугового метода нанесения покрытий позволяет получать покрытия, представляющие многокомпонентную многослойную систему на основе Ti, Zr, Cr, Mo металлов (Me) и их нитридов (MeN). Установлено, что зависимость α от $H_{\text{д}}$ в интервале от 20 до 45 ГПа близка к линейной, а средняя массовая скорость эрозии покрытий при кавитации убывает от 20 до 32 ГПа, а затем возрастает. Аналогичный характер имеют зависимости скорости разрушения в глубину покрытия в зоне расположения дефектов и скорости износа при воздействии жестко закрепленными абразивными частицами. Сравнение стойкости покрытий при данных видах нагружения показывает, что максимальную стойкость имеют покрытия, содержащие одновременно Ti, Mo и их нитриды.

Покрытия системы Me-MeN- при использованном способе формирования имеют более низкие прочностные характеристики по сравнению с покрытиями типа MeN (Me-Ti, Zr, Cr, Mo). Примененный способ нанесения покрытий позволяет регулировать состав покрытия за счет программируемого изменения разрядного тока катодов в отличие от использования многокомпонентных катодов, генерирующих плазменные потоки неконтролируемого состава вследствие различных скоростей испарения составляющих.

Литература

1. Аксенов, И. И. Техника осаждения вакуумно-дуговых покрытий [Текст] / И. И. Аксенов, Д. С. Аксенов, В. А. Белоус. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2014. – 280 с.
2. Handbook of vacuum arc science and technology [Text] / R. L. Boxman, P. J. Martin, D. M. Sanders (Eds.). – N. J. Noyes Publ. Park Ridge, 1995. – 250 p.
3. Аксенов, И. И. Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование [Текст] / И. И. Аксенов, А. А. Андреев, В. А. Белоус, В. Е. Стрельницкий, В. М. Хороших. – Киев: Наукова думка, 2012. – 727 с.
4. Аксенов, И. И. Вакуумно-дуговые покрытия. Технологии, материалы, структура, свойства [Текст] / И. И. Аксенов, Д. С. Аксенов, В. А. Белоус, О. В. Соболев. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2015. – 379 с.
5. Анищик, В. М. Многослойные наноструктурированные покрытия TiN/ZrN: структура и механические свойства [Текст] / В. М. Анищик, В. В. Углов, С. В. Злоцкий, В. А. Емельянов, В. Н. Пономарь, В. А. Ухов // Перспективные материалы. – 2003. – № 4. – С. 75–78.
6. Chen, S.-F. The effect of Cr/Zr chemical composition ratios on the mechanical properties of CrN/ZrN multilayered coatings deposited by cathodic arc deposition system [Text] / S.-F. Chen, Y.-C. Kuo, C.-J. Wang, S.-H. Huang, J.-W. Lee, Y.-C. Chan et. al // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 231. – P. 247–252. doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.03.002
7. Lomello, F. Temperature dependence of the residual stresses and mechanical properties in TiN/CrN nanolayered coatings processed by cathodic arc deposition [Text] / F. Lomello, M. Arab Pour Yazdi, F. Sanchette, F. Schuster, M. Tabarant, A. Billard // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 238. – P. 216–222. doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.10.079
8. Соболев, О. В. Влияние толщины бислоев TiN/ZrN на структуру и свойства многослойных покрытий, полученных вакуумно-дуговым испарением [Текст] / О. В. Со-

боль, А. А. Андреев, В. Ф. Горбань, В. А. Столбовой, Н. В. Пинчук, А. А. Мейлехов // Вопросы атомной науки и техники. – 2015. – № 2. – С. 124–129.

9. Wiciriski, P., Kurzydowski. Failure and deformation mechanisms during indentation in nanostructured Cr/CrN multilayer coatings [Text] / P. Wiciriski, J. Smolik, H. Garbacz, K. J. Kurzydowski // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 240. – P. 23–31. doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.12.006

10. Коваленко, В. І. Обладнання для дослідження ерозії покриттів при мікро ударному діянні [Текст] / В. І. Коваленко, В. Г. Маринін // Вопросы атомной науки и техники. – 1998. – № 5. – С. 83–89.

11. Маринин, В. Г. Кавитационная стойкость вакуумно-дуговых покрытий, осажденных на поверхностях разной ориентации [Текст] / В. Г. Маринин, В. И. Коваленко // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. – Т. 4, № 2 (12). – С. 15–18. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/16243/13672>

12. Погребняк, А. Д. Структура и свойства твердых и сверхтвердых нанокompозитных покрытий [Текст] / А. Д. Погребняк, А. П. Шпак, Н. А. Азаренков, В. М. Берснев // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 179, № 1. – С. 35–64. doi: 10.3367/ufnr.0179.200901b.0035

13. Musiel, J. Production of Ti films with controlled texture [Text] / J. Musil, J. Vlček, V. Ježek, M. Benda, M. Kolega, R. Boomsma // Surface and Coatings Technology. – 1995. – Vol. 76–77. – P. 274–279. doi: 10.1016/0257-8972(95)02582-0

References

1. Akse nov, I. I., Akse nov, D. S., Belous, V. A. (2014). Tehnika osazhdenija vakuumno-dugovyh pokrytij. Kharkiv: NNC HFTI, 280.
2. Boxman, R. L., Martin, P. J., Sanders, D. M. (Eds.) (1995). Handbook of vacuum arc science and technology. N. J. Noyes Publ. Park Ridge, 250.
3. Akse nov, I. I., Andreev, A. A., Belous, V. A., Strel'nickij, V. E., Horoshih, V. M. (2012). Vakuumnaja duga: istochniki plazmy, osazhdenie pokrytij, poverhnostnoe modifitsirovanie. Kiev: Naukova dumka, 727.
4. Akse nov, I. I., Akse nov, D. S., Belous, V. A., Sobol', O. V. (2015). Vakuumno-dugovyje pokrytija. Tehnologii, materialy, struktura, svojstva. Kharkiv: NNC HFTI, 379.
5. Anishhik, V. M., Uglov, V. V., Zlockij, S. V., Emel'janov, V. A., Ponomar', V. N., Uhov, V. A. (2003). Mnogoslojnye nanostrukturirovannye pokrytija TiN/ZrN: struktura i mehanicheskie svojstva. Perspektivnye materialy, 4, 75–78.
6. Chen, S.-F., Kuo, Y.-C., Wang, C.-J., Huang, S.-H., Lee, J.-W., Chan, Y.-C. et. al (2013). The effect of Cr/Zr chemical composition ratios on the mechanical properties of CrN/ZrN multilayered coatings deposited by cathodic arc deposition system. Surface and Coatings Technology, 231, 247–252. doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.03.002
7. Lomello, F., Arab Pour Yazdi, M., Sanchette, F., Schuster, F., Tabarant, M., Billard, A. (2014). Temperature dependence of the residual stresses and mechanical properties in TiN/CrN nanolayered coatings processed by cathodic arc deposition. Surface and Coatings Technology, 238, 216–222. doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.10.079
8. Sobol', O. V., Andreev, A. A., Gorban', V. F., Stolbovoj, V. A., Pinchuk, N. V., Mejlehov, A. A. (2015). Vlijanie tolshhiny bisloev TiN/ZrN na strukturu i svojstva mnogoslajnyh pokrytij, poluchennyh vakuumno-dugovym ispareniem. Voprosy atomnoj nauki i tehniki, 2, 124–129.
9. Wiciriski, P., Smolik, J., Garbacz, H., Kurzydowski, K. J. (2014). Kurzydowski. Failure and deformation mechanisms during indentation in nanostructured Cr/CrN multilayer coatings. Surface and Coatings Technology, 240, 23–31. doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.12.006

10. Kovalenko, V. I., Marynin, V. G. (1998). Obladnannja dlja doslidzhennja erozii' pokryttiv pry mikro udarnomu dijanni. Voprosy atomnoj nauky y tehnyky, 5, 83–89.

11. Marinin, V. G., Kovalenko, V. I. (2013). Cavitation resistance of vacuum-arc coverings deposited on substrate of different orientation. Technology audit and production reserves, 4/2 (12), 15–18. Available at: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/16243/13672>

12. Pogrebnjak, A. D., Shpak, A. P., Azarenkov, N. A., Beresnev, V. M. (2009). Struktura i svojstva tverdyh i sverhtverdyh nanokompozitnyh pokrytij. Uspehi fizicheskikh nauk, 179 (1), 35–64. doi: 10.3367/ufnr.0179.200901b.0035

13. Musiel, J., Vlček, J., Ježek, V., Benda, M., Kolega, M., Boomsma, R. (1995). Production of Ti films with controlled texture. Surface and Coatings Technology, 76-77, 274–279. doi: 10.1016/0257-8972(95)02582-0

Дата надходження рукопису 18.04.2016

Андреев Анатолий Афанасьевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник отдела, Отдел интенсивных вакуумно-плазменных технологий, Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», ул. Академическая, 1, г. Харьков, Украина, 61108
E-mail: aandreev@kipt.kharkov.ua

Коваленко Владимир Иванович, научный сотрудник отдела, Отдел интенсивных вакуумно-плазменных технологий, Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», ул. Академическая, 1, г. Харьков, Украина, 61108
E-mail: kartmazov@kipt.kharkov.ua

Маринин Владимир Григорьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, Отдел интенсивных вакуумно-плазменных технологий, Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», ул. Академическая, 1, г. Харьков, Украина, 61108
E-mail: marinin@kipt.kharkov.ua

Мартыненко Людмила Ивановна, заместитель начальника отдела, Отдел интенсивных вакуумно-плазменных технологий, Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», ул. Академическая, 1, г. Харьков, Украина, 61108

Столбовой Вячеслав Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела, Отдел интенсивных вакуумно-плазменных технологий, Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», ул. Академическая, 1, г. Харьков, Украина, 61108

УДК 519.64.539.3

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.69828

МЕТОД ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРИМЕНЕНИИ К ДИФРАКЦИИ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛОСКИХ УПРУГИХ ВОЛН

© А. М. Назаренко, В. О. Мищенко

Энергетический метод использует теорему взаимности работ и преобразование возникающих гиперсингулярных интегралов для получения системы уравнений, состоящей из сингулярных интегральных уравнений первого и второго рода. Алгоритмы численного решения получаются методом дискретных особенностей. Точность вычислений контролируется за счёт алгоритмической диверсности. Показано приложение к численному моделированию дифракции стационарных плоских волн на конечных и периодических системах неоднородностей разных типов

Ключевые слова: дифракция упругих волн, неоднородности, метод энергетического моделирования, плоская деформация, напряжения

The energy method uses reciprocity works theorem and transformation of occurring hypersingular integrals for a system of equations consisting of singular integral equations of the first and second kind. Algorithms for the numerical solution are obtained by the method of discrete singularities. Precision of calculations is controlled due to algorithmic diversity. Application to the numerical modeling of diffraction of stationary plane waves on finite and periodic systems of different inhomogeneities is shown

Keywords: diffraction of elastic waves, inhomogeneities, energy modeling method, plane strain, stresses