

УДК 621.751.47

А.Т. БОГОРОШ¹, С.А. ВОРОНОВ¹, И.Ю. ЧЕРНЫЙ¹, А. БУБУЛИС²¹ Физико-технический институт НТУ «КПИ», Украина² Каунасский технический университет, Литовская Республика

ПРО УПРУГОСТЬ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТУГОПЛАВКИХ ПЛЕНОК

Рассмотрены результаты экспериментов при деформации наноразмерных тугоплавких пленок (НП), напыляемых на поверхности деталей, работающих в экстремальных условиях. Раскрыта наноструктура пленок и механизм полного восстановления деформации. Проблема обеспечения восстановления деформации поверхности летательных аппаратов стала особенно острой с увеличением высоты, скорости полета и прямых попаданий абразивных частиц. Решение её в значительной степени зависит от тугоплавких наноразмерных прочных пленок, которые могут обеспечить безопасность полетов в сложных условиях. Столбчато-игольчатое строение пленок содержит множество равноосных мелких зерен и субзерен в виде иголок. Поэтому истинный размер кристаллитов значительно меньше, чем ширина микрочерен, и составляет 12-30 нм, а образование игольчатой структуры, каждый элемент которой содержит множество кристаллитов сечением от 3 до 8 нм. Управляемый синтез защитных пленок показал оптимальный режим, когда поверхность пленки получается более гладкой с шероховатостью до 8-12 нм при ультразвуковом воздействии на подложку частотой от 21 до 42,5 кГц.

Ключевые слова: граница раздела, тугоплавкие пленки, деформация, атомно-силовая микроскопия.

Введение

Проблема обеспечения восстановления деформации поверхности летательных аппаратов стала особенно острой с увеличением высоты, скорости полета и прямых попаданий абразивных частиц. Решение её в значительной степени зависит от тугоплавких наноразмерных пленок, которые могут обеспечить безопасность полетов в сложных условиях.

1. Формулирование проблемы

Для экспериментального изучения случайных деформаций в локальных точках пленочных покрытий с последующим восстановлением первоначальной формы необходимо подобрать сопоставимые с микроударами абразивных частиц внешние воздействия. Кроме того, необходимо определить изменение структуры материала покрытия и прочность границ раздела.

2. Решение проблемы

Прочность границ раздела, объемная доля которых может достигать 50% материала, становится одним из ключевых факторов при деформации наноматериалов и появления микротрещин. В связи с этим предполагается, что НП и материалы не под-

вергаются пластической деформации, а нанотрещины не могут вырасти выше критического значения, определяемого размером кристаллитов. При снятии нагрузки эти микротрещины закрываются, что приводит к частичному или полному восстановлению деформации.

Эта гипотеза находится в противоречии с рядом экспериментальных результатов. Известны работы, где показано, что деформация НП носит гомогенный и негомогенный локализованный характер с образованием полос сдвига. Атомно-силовая микроскопия (АСМ) показала, что в НП и наноматериалах критический размер трещины совпадает с размером кристаллитов в несколько нанометров, а пластическая деформация в локальных участках характерна для известных аморфных, ряда нанокристаллических и керамических материалов. Наличие различных моделей деформации материалов путем образования полос сдвига не дают полного объяснения этого явления.

Например, микроструктура однофазных НП, полученных в условиях низкой подвижности адсорбированных атомов [1], обладают сильно анизотропной столбчатой или игольчатой структурой и хорошо описываются моделью структурных зон [2]. Такая структура НП, полученная методом физического осаждения, приводит к возникновению нежелательных напряжений, параллельно поверхности подложки [3, 4].

Считается, что в пленках с ярко выраженной столбчатой структурой локализованная деформация протекает гомогенно, тогда как образование полос сдвига характерно для пленки с равноосной структурой. При соотношении напыляемых карбидов, как четыре части TiC к одной части HfC, образуется прочная игольчатая НП с температурой плавления 4200 °С.

В качестве удара в локальной точке использовали пирамидки Виккерса, которые падали на поверхность НП вместе с держателем массой 10, 25 и 50 г с высоты 100 мм. Отпечатки пирамидки Виккерса при ударных нагрузках на НП Ti-B-N, Ti-Cr-B-N, Ti-Si-V-N, TiC-HfC обрабатывали с помощью АСМ и растрового сканирующего электронных микроскопов. В диапазоне исследованных нагрузок образования полос сдвига и радиальных трещин не наблюдалось, что свидетельствует о гомогенном характере деформации пленок (рис. 1, а).

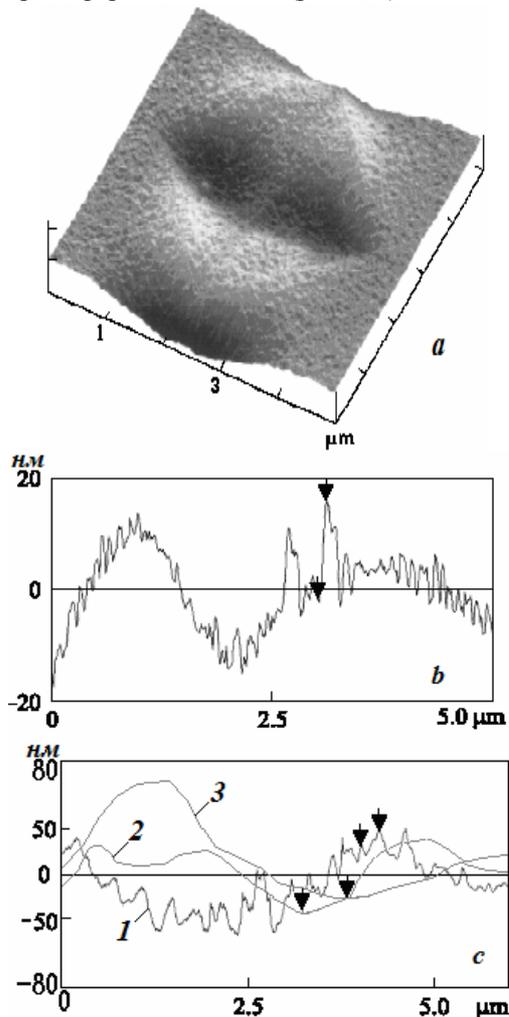


Рис. 1. АСМ – изображение (а) и строчные развертки областей локализованной деформации (б) в пленках Ti-B-N при индентировании пирамидкой Виккерса с нагрузкой 50 (а, б); 10 г – кривая (б); 25 г – кривая 1(с); 50 г – кривая 2(с) и 80 г – кривая 3(с) в пленке Ti-Si-V-N

Анализ строчных разверток вертикального сечения отпечатков пирамидки (рис. 1, б, с) показал, что рельеф поверхности НП внутри области деформации и шероховатость исходной поверхности НП фактически имеют один масштаб.

Следовательно, механизм локальной деформации осуществляется скольжением столбчатых или игольчатых элементов структуры параллельно приложенной нагрузке.

Механизм локальной деформации НП при наиндентировании позволяет прогнозировать склонность материала к пластической деформации, а игольчатая природа НП играет важную роль при деформации от скольжения поликристаллов параллельно приложенной нагрузке [5].

Дальнейшие исследования были направлены на управление синтезом тугоплавких пленок. С этой целью на подложки (монокристаллы SiO₂ {001}, никеля, нержавеющей стали и сплав типа ВК) магнетронным распылением в атмосфере аргона или смеси с азотом наносили плёнки.

Структуру плёнок исследовали на сканирующем микроскопе Hitachi S-4200 и просвечивающем электронном микроскопе Hitachi –9000 NAR.

Фольги для исследований высокого разрешения на поперечных срезах готовились по стандартным методикам [6]. PCA пленок проводили на дифрактометре типа Geigerflex, а послойный элементный состав определяли методом оже-электронной спектроскопии на установке LHS-10 SAM.

Твердость, модуль упругости и упругое восстановление пленок измеряли на установке TriboScope (Hysitron, Snc., USA) и нанотвердомере (CSM Instruments Swerzland) методом Оливера и Фарра [7]. Локализованная деформация инициировалась с помощью четырехгранной пирамиды Виккерса при нагрузках 10, 25 и 50 г.

Исследование топографии осуществляли на атомно-силовом микроскопе (АСМ) NanoScan (Россия).

В работе приведены среднеквадратичные значения шероховатости поверхности пленок R_{rms}, полученные с помощью АСМ с точностью 5% и результаты структурного анализа пленок.

Структура и морфология пленок значительно отличались при различных видах физико-механического и химического воздействия.

Пленки Cr – В и Ti – Si – N имеют четко выраженную игольчатую структуру с диаметром колонн соответственно 10 – 30 нм и 0,1 мкм, а при УЗК воздействии на образование пленки с примесями ванадия иглолки уменьшаются до размеров от 0,12 до 0,8 нм и достигают высоты в среднем от 3 до 8 нм (есть экземпляры – до 30 нм) (рис. 2)

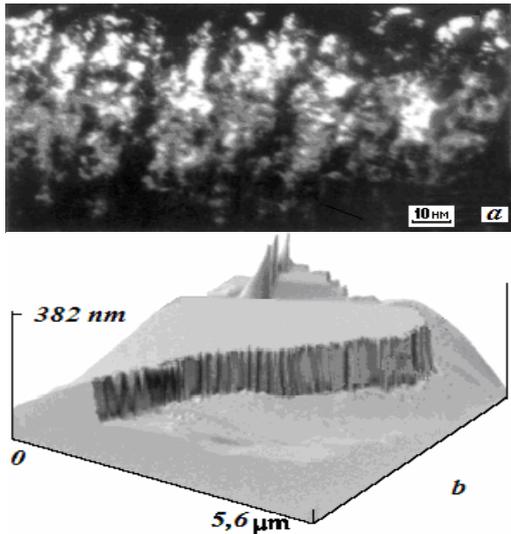


Рис. 2. Пленки со столбчатой структурой: а – АСМ изображение поперечного сечения пленки Ti-Si-N; б – фрактограмма излома пленки CrB₂

Столбчато-игольчатое зерно содержит множество равноосных мелких зерен и субзерен. Поэтому истинный размер кристаллитов значительно меньше, чем ширина микрозерен, и составляет 12-30 нм. Образование игольчатой структуры, каждый элемент которой содержит множество кристаллитов, наблюдалось ранее [8], но с размерами значительно большими. Кроме того, приведенные электронно-микроскопические исследования пленок Ti – B – N и Ti – Cr – B – N на срезах, перпендикулярных поверхности подложки, не выявляют игольчатую структуру (рис. 2, а), которую выявили на изломах (рис. 2, б) или при исследовании на растрово-сканирующем микроскопе (РСМ) типа JSM-U3 со сканирующим лучом диаметром не более 3 Å (рис. 3, с, d).

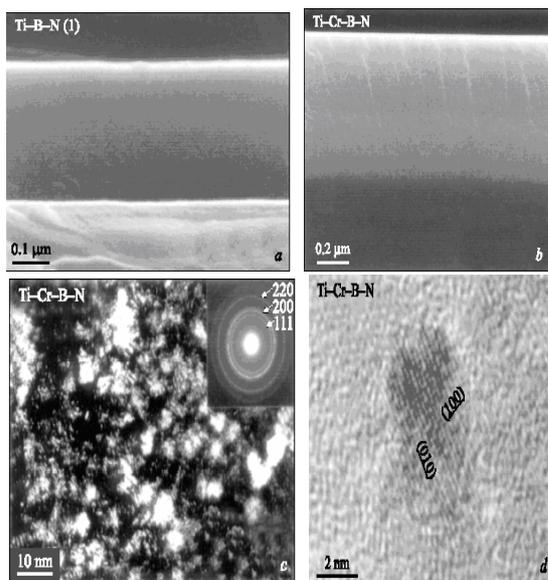


Рис. 3. АСМ (а, б) и РСМ (с, d) изображения пленок с кристаллографической ориентацией {010}, {100}

Поверхность пленки получается более гладкой с шероховатостью до 8-12 нм при ультразвуковом воздействии на подложку частотой от 21 до 42,5 кГц (иногда до 30 нм).

Исследования показали пути управления структурой и свойствами наноструктурных пленок за счет ориентации игольчатых кристаллов (теплопроводностью, твердостью, прогнозировать склонность материала к пластической деформации) и др.

Заключение

Представленная методика моделирования абразивного удара частиц в упрочняющие и самовосстанавливающиеся деформации тугоплавкие пленочные покрытия с помощью пирамидки Виккерса, показала возможность проведения подобных исследований, сопоставимых с абразивными микроударами. Проблема обеспечения восстановления деформации поверхности летательных аппаратов в значительной степени зависит от состава тугоплавких наноразмерных пленок, которые могут как один из вариантов использоваться для обеспечения безопасности полетов в сложных условиях. Столбчато-игольчатое строение пленок содержит множество равноосных мелких зерен и субзерен в виде иголок. Поэтому истинный размер кристаллитов значительно меньше, чем ширина микрозерен, и составляет 12-30 нм, а образование игольчатой структуры, каждый элемент которой содержит множество кристаллитов сечением от 3 до 8 нм.

Управляемый синтез защитных пленок показал оптимальный режим, когда поверхность пленки получается более гладкой с шероховатостью до 8-12 нм при ультразвуковом воздействии на подложку частотой от 21 до 42,5 кГц.

Литература

1. Богорош А.Т. Управление формированием приповерхностного слоя растущего монокристалла при ионной имплантации примесей / А.Т. Богорош // ДНАНУ. – 1999. – №1. – С. 70-81.
2. Богорош А.Т. Формирование приповерхностного слоя материала при ионной имплантации примесей / А.Т. Богорош // ДНАНУ. – 1999. – № 2. – С. 80-91.
3. Богорош А.Т. Влияние физических воздействий на скопление и миграцию примесных кластеров / А.Т. Богорош // ДНАНУ. – 1999. – № 3. – С. 75-79.
4. Bogorosh A. Thermal control of transitional and turbulent boundary layers under centrifugal forces / A. Bogorosh, G. Voropaev, N. Yurchenko / 5th International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, September 16-18, 2002, Mallorca, Spain, 2002. – P. 309-314.

5. Bogorosh A. *Diagnostics of defects in navigation electronics devices operating under extreme conditions* / A. Bogorosh, S. Voronov, S. Novickij, D. Ščekaturovienė *ets* // ISSN 1648–7788 AVIATION. – 2006. – Vol. X, No. 1. – P. 246-255.

6. Штанский Д.В. *Особенности структуры и физико-механических свойств наноструктурных тонких пленок* / Д.В. Штанский и др. // ФТТ. – 2003. –

Том 45, вып. 6. – С. 1122-1129.

7. Oliver W., Pharr G. // *J. Mater. Res.* – 1992. – 6. – P. 1564.

8. Богорош А.Т. *Управляемый синтез игольчатых кристаллов* / А.Т. Богорош, Н.В. Белов, И.М. Федоткин, И.С. Гульй, П.А. Сандомирский, М.А. Симонов // ДАН СССР, 1976. – 224, №3. – С. 928-931.

Поступила в редакцию 12.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ПРО ПРУЖНІСТЬ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ТУГОПЛАВКИХ ПЛІВОК

О.Т. Богорош, С.О. Воронов, І.Ю. Черний, А. Бубулис

Розглянуті результати експериментів при деформації нанорозмірних тугоплавких плівок (НП), що напильються на поверхні деталей, що працюють в екстремальних умовах. Розкрита наноструктура плівок і механізм повного відновлення деформації. Проблема забезпечення відновлення деформації поверхні літальних апаратів стала особливо гострою із збільшенням висоти, швидкості польоту і прямих попадань абразивних частинок. Рішення її в значній мірі залежить від тугоплавких нано розмірних міцних плівок, які можуть забезпечити безпеку польотів в складних умовах. Столбчато-голчату будова плівок містить безліч рівновісних дрібних зерен і субзерен у вигляді голок. Тому дійсний розмір кристалітів значно менший, ніж ширина мікрозерен, і складає 12-30 нм, а утворення голчатої структури, кожен елемент якої містить безліч кристалітів перетином від 3 до 8 нм. Керований синтез захисних плівок показав оптимальний режим, коли поверхня плівки виходить гладшою з шорсткістю до 8-12 нм при ультразвуковій дії на підложку частотою від 21 до 42,5 кГц.

Ключові слова: межа розділу, тугоплавкі плівки, деформація, атомний-силова мікроскопія.

ABOUT THE RESILIENCY OF MULTICOMPONENT REFRACTORY TAPES

A.T. Bogorosh, S.A. Voronov, I.Yu. Cherniy, A. Bubulis

The results of experiments are considered during deformation of refractory tapes of nanodimension, evaporated on the surface of details, workings in extreme terms. The nanodimension of tapes and mechanism of complete renewal of deformation is exposed. The problem of providing of renewal of deformation of surface of aircrafts became especially sharp with an increase height, speed of flight and direct hits of particles of abrasives. The decision of her largely depends on refractory nanodurable tapes of sizes, which can provide safety of flights in difficult terms. The columnar needle-shaped structure of tapes is contained by the great number of homaxonic of shallow corns and subcorns as needles. The veritable size of crystallites considerably less, than width of micrograin therefore, and 12-30 nm makes, and formation of needle-shaped structure every element of which is contained by the great number of crystallites a section or 3 to 8 nm. The guided synthesis of protective tapes was shown by the optimum mode, when the surface of tape turns out more smooth with a roughness to 8-12 nm at the ultrasonic affecting substrate by frequency of 21 to 42,5 KHz.

Key words: border of section, refractory tapes, deformation, atomic-power microscopy.

Богорош Александр Терентьевич – д-р техн. наук, проф., профессор кафедры прикладной физики, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, e-mail: fondfti@ntu-kpi.kiev.ua.

Воронов Сергей Александрович – д-р техн. наук, проф., проректор, зав. кафедрой прикладной физики, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», e-mail: s_voronov@ntu-kpi.kiev.ua.

Черний Игорь Юрьевич – студент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев.

Бубулис Альгимантас – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой прикладной механики, Национальный технический университет Литвы, Каунас, e-mail: algimantas.bubulis@ktu.lt.