

УДК 621.751.47

А.Т. БОГОРОШ¹, С.А. ВОРОНОВ¹, В.П. РОЙЗМАН², К.В. ЧАДОВА¹¹ Физико-технический институт НТУУ «КПИ», Киев, Украина² Хмельницкий национальный университет, Украина

НОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ, МОДУЛЯ ЮНГА И УПРУГОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ ТУГОПЛАВКИХ ПОКРЫТИЙ

Рассмотрены результаты экспериментов при получении новых композиций пленочных покрытий с последующей деформацией и восстановлением. К известным титановым сплавам защитных тугоплавких пленок добавляли ванадий и гафний в виде Ti-Si-V-N и HfC-TiC в соотношении 1/4. Такая технология позволяет управлять физическими свойствами в широком диапазоне для известных композиций на основе титана. При этом пленочные покрытия кристаллизуются в виде зерен игольчатой формы, плотно прилегающие между собой и сориентированные перпендикулярно поверхности. Такая структура повышает защитные свойства пленок при абразивном и ударном воздействии. В результате повышаются значения микротвердости в 2 раза, а модуля упругости – в 1,75 раза, а зернограничное скольжение при деформациях ускоряет процессы восстановления в среднем на 7%.

многокомпонентные тугоплавкие пленки, модуль упругости, упругое восстановление

Введение

Проблема повышения микротвердости, модуля Юнга (упругости) и упругого восстановления пленочных тугоплавких покрытий актуальна в авиакосмическом материаловедении.

1. Формулирование проблемы

Для экспериментального изучения микротвердости, модуля Юнга и упругого восстановления новых композиций многокомпонентных тугоплавких пленок необходимо подобрать аналогичные или подобные условия синтеза материала покрытий.

2. Решение проблемы

В работах [1, 2], где при оценке нагрузки P , необходимой для начала пластической деформации наноструктурных пленок (НП), когда недеформируемый шарик Роквелла радиуса r вдавливаются в полубесконечное твердое тело для определения микротвердости H , было получено выражение

$$P = 0,78r^2(H^3/E^2), \quad (1)$$

из которого следует, что пластическая составляю-

щая упругого восстановления W_e , в случае негомогенно деформированных НП покрытий, выше, чем в случае покрытий тугоплавкими НП. Поэтому параметр W_e %, отражающий образование полос ступеней, в выражение не входит.

Для системного анализа значения микротвердости, модуля Юнга и упругого восстановления многокомпонентных пленочных тугоплавких известных композиций Ti-Si-N, Ti-Zr-C-O, Ti-B-N, Ti-Ca-C-O, Ti-Ca-C-O-Ti-Al-N и Ti-Mo-N дополнительно были получены пленочные покрытия с включением в композицию ванадия и гафния в виде Ti-Si-V-N и HfC-TiC в соотношении 1/4.

Микроисследования пленок в виде фольги проводили по стандартным методикам [1] на электронном сканирующем микроскопе типа Hitachi S-4200 и просвечивающем электронном микроскопе Hitachi-9000 NAR.

Сопоставления топографии поверхностей пленок до деформации рельефа поверхности НП внутри отпечатка пирамидки Виккерса и после снятия нагрузки показали, что оба механизма деформации осуществляются путем скольжения отдельных зерен

столбчатых и игольчатых кристаллических элементов структуры, которые выступают наружу при снятии нагрузки.

Следовательно, отдельные зерна столбчатых и игольчатых кристаллических элементов структуры являются вершинами отдельных столбчатых и игольчатых зерен или объемов материала НП. При этом зернограницное скольжение открывает основной механизм деформации в исследуемых тугоплавких и высокопрочных пленках вследствие более сильной энергии связи между иголками или столбцами, где и происходит неомогенная деформация.

Во-первых, деформация протекает с сохранением объема и сопровождается выталкиванием деформированного материала с образованием бугорков от упругого сжатия.

Во-вторых, после снятия нагрузки наружу выталкиваются отдельные зерна столбчатых и игольчатых кристаллических элементов структуры и идет релаксация упругих напряжений непосредственно игольчатых кристаллов вследствие пластичности материала НП.

В-третьих, в ходе исследований образование полос сдвига наблюдалось только у НП с большой величиной пластической деформации.

Основным результатом исследований является доказательство, что преимуществом многокомпонентных тугоплавких НП является возможность получать сверхтвердые и термически стойкие материалы с почти одинаковыми значениями упругого восстановления, но с различной микротвердостью и модулями Юнга в сторону повышения (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение микротвердости, модуля Юнга и упругого восстановления многокомпонентных пленок, полученных другими авторами и в данной работе

Состав пленок	Твердость H , ГПа	Модуль Юнга E , ГПа	Упругое восстановление, W_e , %	H^3/E^2 , ГПа	Литературные ссылки
Ti-Si-N	42,3	273	78	1,02	[1]
Ti-Zr-C-O	41,9	289	77	0,88	[1]
Ti-B-N	42,0	300	77	0,82	[1]
Ti-Ca-C-O	41,4	325	68	0,67	[1]
Ti-Al-N	41,9	397	74	0,46	[3]
Ti-Mo-N	43,0	442	68	0,41	[4]
Ti-Si-V-N	44,0	390	84	0,56	
HfC-TiC (1/4)	84,0	480	75	2,57	

Заключение

Представленные результаты сравнительного анализа литературных данных и новых экспериментальных данных по решению проблемы повышения микротвердости, модуля Юнга (упругости) и упругого восстановления пленочных тугоплавких покрытий, применяемых в авиационно-космической технике и технологиях, показали подобные результаты, сопоставимые с исследованиями других авторов [1, 3, 4].

Наиболее важным является результат, позволяющий управлять физическими свойствами много-

компонентных защитных пленок в широком диапазоне для известных композиций на основе титана.

К известным композициям Ti-Si-N, Ti-Zr-C-O, Ti-B-N, Ti-Ca-C-O, Ti-Ma-C-O, Ti-Al-N и Ti-Mo-N в результате проведенных исследований с пленками, состоящими из титана, кремния, ванадия и азота, а также гафния, углерода и углеродистого титана. Такие новые композиции исследовали в различных соотношениях, сочетаниях и внешних физических воздействиях на подложки образцов.

Так, например, при увеличении азота в исследуемых композициях и вибрации подложки струк-

тура пленки получается неоднородной с образованием кластеров разных величин, дисперсность которых колеблется в широких пределах от 12 до 390 нм. Встречаются также отдельные скаленоэдры размерами до 800 нм и более.

На микрофотографиях такие скаленоэдры имеют округлую форму, а в промежутках между отдельными крупными кластерами толщина пленки менялась в сторону уменьшения. Местами пленка имела микротрещины. Микротвердость непосредственно крупных кластеров была в 2 – 3 раза больше основной пленки, но при этом хрупкость в точках исследований и модуль упругости Юнга уменьшалась. Одновременно с этими характеристиками снижалась пластическая деформация упругого восстановления.

Среди значительного набора опытных покрытий, на наш взгляд, обнаружен наиболее приемлемый вариант для практического внедрения.

В результате исследований и системного анализа полученных результатов предлагаются пленочные покрытия с включением в состав сплавов ванадия и гафния в виде Ti-Si-V-N и HfC-TiC в соотношении 1/4.

Главное достоинство таких пленочных покрытий в том, что применение ванадия и гафния в титановых пленочных сплавах позволяет получать зерна игольчатой формы, сориентированные перпендикулярно поверхности. Управлением синтезом таких игольчатых кристаллов и их ориентацией в пространстве было осуществлено еще в 1980 году с последующей публикацией за рубежом [5, 6].

Такая структура повышает защитные свойства пленок при абразивном и ударном воздействии по кристаллической оси «с» иголок. Особое значение имеют при этом сверхпрочные волокна [6]. Прочность и пластичность таких волокнистых структур с ростом температур от 20 до 1400° резко возрастает [7].

При этом зернограницное скольжение при деформациях улучшает процессы восстановления. В результате повышаются значения микротвердости в 2 раза, а модуля упругости – в 1,75 раза. При этом пластическая составляющая упругого восстановления W_e также возрастает в среднем на 7%.

Литература

1. Особенности структуры и физико-механических свойств наноструктурных тонких пленок / Д.В. Штанский и др. // ФТТ. – 2003. – Т. 45, вып. 6. – С. 1122-1129.
2. Johnson K. Contact Mechanics 1st ed. – Cambridge University Press, 1985. – P. 155.
3. Musil J., Hruby H. Thin Solid Films. – 365, 1, 104 (2000).
4. Musil J., Kune F., Zeman H., Polakova H. Surf.Coat.Technol. – 154, 2-3, 304 (2002).
5. Bogorosh A.T. The Effect of Elastik Vibrations on Monodispersity and Kinetics Crystallization of $C_{12}H_{22}O_{11}$, $CaCO_3$ -A //The Allerton Press J.Program. – 1981, Ins., 150; Fifth Avenue, N.Y., 10011. – P. 49-52.
6. Bogorosh A.T. The Effect of Elastik Vibrations on Monodispersity and Kinetics Crystallization //The Allerton Press Ins.: J.Program. – 1983, 150, Ins., 150; Fifth Avenue, N.Y., 10011. – P. 49-52.
7. Свиридовский Ю.М., Волынец Ю.М., Богорош А.Т. Прочность и пластичность непрерывных волокон из вольфрама и молибдена в интервале температур 20-1400 °C //ФХММ. – 1986. – № 762. – С. 291-293.

Поступила в редакцию 13.05.2008

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