

на 2-3 атмосферы, что позволяет обеспечить оптимальные условия работы узлов трения.

Недостатком является то, что при таком давлении, смазка падает вместе с газом в газовые магистрали и оседает на её стенках. Это приводит к раннему износу, засорению и уменьшению диаметра трубопровода, что значительно влияет на условную проходимость. В результате повышается сопротивление и возрастает энергопотребление для достижения заданного давления в сети магистрали.

Для устранения сопротивления необходимо проводить чистку магистралей специальными поршнями диаметром 1200 мм, каждые 5 лет. Данная операция весьма не выгодна с экономической точки зрения.

Единственным выходом является модернизация компрессорной станции «Минская» и установка центробежных и роторных компрессоров, поскольку действующее оборудование было установлено ещё в 70-х годах и является морально устаревшим.

УДК 621.793

Гладкий В.Ю.

УЛУЧШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ НАНЕСЕНИЕМ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

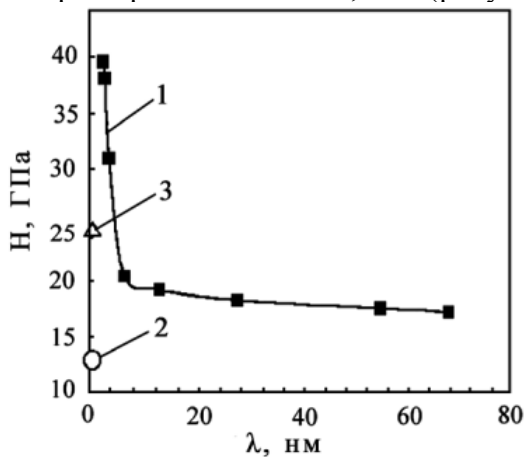
БНТУ, Минск

Научный руководитель: Комаровская В.М.

Увеличить прочность покрытий возможно за счёт создания слоистых покрытий с чередующимися слоями металлов, с сильно различающимися упругими свойствами и близкими коэффициентами термического расширения. Имеется несколько подходов для объяснения эффекта сверхтвёрдости в нанослойных композиционных покрытиях: распределение деформаций внутри нанослоев; различие модуля упругости нанослоев; несоответствие решеток нанослоев и т.п.

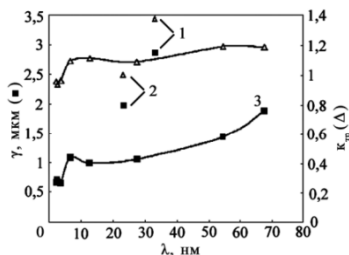
Нанослойные композиционные покрытия, состоящие из периодически повторяющихся двух высокопрочных материалов, обладают высокой твердостью потому, что чередующиеся поля напряжений в нанослоях являются барьерами для любого движения дислокаций. Несоответствие решеток двух фаз также является фактором, препятствующим движению дислокаций, что приводит к тому, что один из слоев должен быть растянут, а другой – сжат [1].

В случае с нанослойными покрытиями, осажденными из материалов с твердостью ≥ 20 ГПа, таких, как нитриды переходных металлов, было достигнуто двукратное увеличение твердости. Максимальная твердость, полученная для TiN/NbN с периодом 4 нм, составила 50 ГПа, для TiN/VN – около 55 ГПа [1]. Покрытия TiN/AlN, осажденные магнетронным способом, показали существенное увеличение твердости, адгезии и износа при периодах слоёв $\leq 3,6$ нм (рисунок 1, 2) [2].



1 – TiN/AlN; 2 – TiN; 3 – AlN

Рисунок 1 – Зависимость твердости (по Кнупу) покрытий от периода слоёв [2]



1 – подложка без покрытия; 2 – покрытие TiN; 3 – покрытие TiN/AlN
 Рисунок 2 – Зависимость износа (■) и коэффициента трения (Δ) от периода величины слоев в покрытии TiN/AlN

Наноструктурные многослойные покрытия TiN/AlN, осаждённые магнетронным способом, показали хорошие результаты при микросверлении и точении по сравнению с однослойными TiN. В частности, при сверлении стеклопластика свёрлами диаметром 0,3 мм ($n=100000 \text{ мин}^{-1}$, $s=6,8 \text{ м/мин}$) стойкость свёрл с покрытиями TiN/AlN (период 3,6 нм) оказалась на 40 % больше, чем у свёрл без покрытий, и на ~25 % больше, чем у свёрл с однослойными покрытиями TiN [1].

Поскольку характеристики плёнок, кроме прочих условий, зависят от периода слоёв, при их нанесении на конкретные изделия сложной формы появляются трудности с обеспечением равномерности их свойств. С этой точки зрения более удобны монослойные нанокompозитные покрытия.

Двухфазные твёрдые и сверхтвёрдые нанокompозиционные покрытия можно разделить на два типа: первый тип нанокompозиций – нк-MeN/твёрдая фаза (например, $\alpha\text{-TiB}_2$, $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$) – и второй тип - нк-MeN/мягкая фаза (например, Cu, Ag, Ni), где нк- и α - соответственно нанокристаллическая и аморфная фазы; Me– металлы Ti, W, Zr, Cr, Al и др., образующие твёрдые нитриды. Твёрдость плёнок в обеих группах, то есть нанокompозитов типа нк-MeN/ α -твёрдая фаза и нк-MeN/металл может составлять от ~10 до 70 и 55 ГПа соответственно.

Рассмотрим *покрытия типа нк-MeN/металл*. Согласно [3] при добавлении в покрытие TiN в процессе осаждения

1,5 ат. % Cu размеры зёрен сохраняются на уровне 22 нм, сохраняется и ориентация зёрен (111) (рисунок 3).

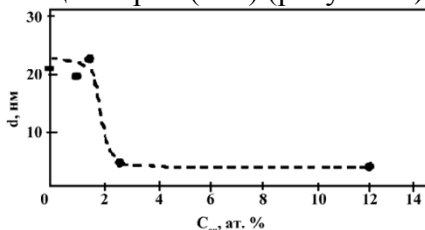


Рисунок 3 – Размеры зёрен TiN/Cu в зависимости от содержания меди [3]

При этом увеличивается твёрдость от 22 до 30 ГПа. При концентрации меди в количестве 1,5 % покрытие имеет наибольшую твёрдость и упругость, а при увеличении содержания меди покрытия становятся менее твёрдые и более пластичные.

В системе ZrN/Cu максимальная твёрдость 54 ГПа достигается при 1-2 ат. % Cu [1]. При этом размеры зёрен ZrN составляют около 35-38 нм, их ориентация (111), структура столбчатая, высокий коэффициент упругого восстановления (около 80 %). При повышении содержания меди до 5-6 ат. % механические характеристики снижаются незначительно. При дальнейшем увеличении содержания меди все механические характеристики существенно снижаются.

В *нанокompозитах нк-MeN/твёрдая фаза* вторая фаза может быть аморфной ($a\text{-Si}_3\text{N}_4$) или нанокристаллической (Si_3N_4 , BN, AlN, Ti (B, O) и др.). Они обладают сверхвысокой твёрдостью, большими коэффициентами упругого восстановления и отношением H^3/E^{*2} , высокой термостойкостью. Такими типичными покрытиями, достаточно легко реализуемым вакуумно-дуговым способом, являются покрытия систем Ti-Si-N и Ti-Al-Si-N.

Структура, свойства и эксплуатационные характеристики покрытий TiN/ $a\text{-Si}_3\text{N}_4$ в значительной степени зависят от содержания в них кремния. На рисунке 4 приведена зависимость твёрдости этого покрытия, осаждённого магнетронным способом.

При содержании кремния менее 0,1 % структура представляет собой столбчатые зёрна диаметром 100-150 нм, проходящие по всей толщине покрытия (2 мкм). При этом нанотвёрдость покрытия составляет ~ 26 ГПа. При 4,7 ат. % Si их длина ~ 60 нм и диаметр - 20 нм, при этом наблюдаются максимальная твёрдость покрытия. При дальнейшем увеличении содержания кремния твёрдость монотонно уменьшается. Данные покрытия характеризуются высоким сопротивлением к микротрещинам.

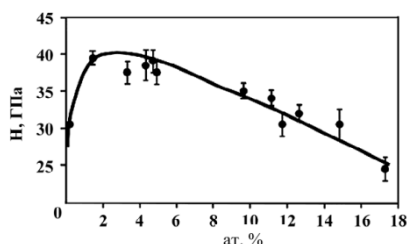


Рисунок 4 – Зависимость твёрдости покрытий TiN/a-Si₃N₄, осаждённых магнетронным способом при одновременном распылении отдельных мишеней, от содержания в них кремния [4]

Покрытия, содержащие нк-TiN/a-Si₃N₄/a- и нк-TiSi₂, могут иметь твёрдость >100 ГПа, однако в течение 6-8 месяцев она снижается до ~ 50 ГПа, главным образом из-за влияния влаги на TiSi₂ [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев, А.А. Вакуумно-дуговые покрытия / А.А. Андреев, Л.П. Саблев, С.Н. Григорьев. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2010. – 318 с.
2. Yao, S.H.. Evaluation of TiN/AlN nano-multilayer coatings on drills used for micro-drilling / S.H.Yao // Surface and Coatings Technology. – 2005. – V. 197. – P. 351-357.
3. Structure refinement and hardness enhancement of titanium nitride films by addition of copper / Surface and Coatings Technology. – 2001. – V. 137. – P. 38-42.

4. Microstructural size effects on the hardness of nanocrystallineTiN. Amorfous-Si₃N_xcoatings prepared by magnetron sputtering / Thin Solid Films. – 2005. – V. 473. – P. 114-122.

УДК 004.588

Горюнова Ю.П.

ЭЛЕКТРОННЫЕ УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ И ИХ ВАЖНОСТЬ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

БНТУ, Минск

Научный руководитель: Астанчик Н.И.

Электронное учебное пособие – программно-методический обучающий комплекс, соответствующий типовой учебной программе и обеспечивающий возможность школьнику или студенту самостоятельно или с помощью преподавателя освоить учебный курс или его раздел. Данный продукт создается со встроенной структурой, словарями, справочными материалами, возможностью поиска. И при грамотном использовании может стать мощным инструментом в изучении большинства дисциплин, особенно, связанных с информационными технологиями.

Электронное учебное пособие может быть предназначено для самостоятельного изучения учебного материала по определенной дисциплине или для поддержки лекционного курса с целью его углубленного изучения.

Одним из основных элементов электронного пособия являются фрагменты «живых» лекций преподавателей. При этом изложение материала построено так, что есть возможность увидеть структуру лекции и обучаемый имеет возможность повторить любой фрагмент лекции. Использование иллюстраций эффективно вместе надписями рядом с интересующим элементом. Обязательным элементом является дополнительная видеoinформация или анимированные клипы, сопровождающие разделы курса, трудные для понимания в текстовом изложении. Вообще, внедрение в структуру электронного