

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ, СОДЕРЖАЩИХ
ФУЛЛЕРЕНА C₆₀**

Шпилевский¹ Э.М., Филатов¹ С.А., Шилагарди² Г., Тувшинтур² П.

¹*Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь, eshpilevsky@rambler.ru*

²*Национальный университет Монголии, г. Улан-Батор, Монголия,
gshilagardi@yahoo.com, tuvshinee_99@yahoo.com*

Фуллерены часто рассматривают как инструмент и основу для создания перспективных материалов с новыми свойствами [1]. Свойства наноматериалов и наноструктур активно изучаются и уже сегодня многое известно. Исследованию наноматериалов и разработке нанотехнологий посвящен ряд обзоров и монографий, например [2-4]. В настоящей работе приведены результаты исследования механических свойств материалов на основе металлических матриц, допированных малыми количествами фуллерена C₆₀. В качестве металлических матриц использовали алюминий, титан и сталь марки С45.

Композитные пленки получали в вакууме на установке «ВУП-4» конденсацией совмещенных атомно-молекулярных потоков при давлении остаточных паров воздуха $1 \cdot 10^{-4}$ Па. Поскольку фуллерены начинают сублимировать при температурах менее 700 К, а температура испарения металлов выше 1500 К, то для получения тметалл-фуллереновых плёнок использовались два испарителя. Разогрев испарителей обеспечивался пропусканием электрического тока. В качестве испарителей для металлов использовались молибденовые «лодочки», для C₆₀ — танталовые. Получение пленок с различным содержанием фуллеренов обеспечивалось различными плотностями атомно-кластерных потоков компонентов, что в свою очередь достигалось регулированием температуры испарителей и изменением их расположения относительно подложки. Реальная концентрация фуллеренов в металл-фуллереновых пленках определялась методом рентгеновского микроанализа по интенсивности характеристического рентгеновского излучения K_α-линий атомов металла и углерода в пленках заданной толщины.

Размер и форма зерен сплава зависят от типа металла, его концентрации и температуры подложки. Так, для системы Al-C₆₀ зерна преимущественно имеют вид пирамид, для системы Ti-C₆₀ - полусфер, а для системы Сталь-C₆₀ - вытянутых куполов. Их линейные размеры составляют 30...3000 нм., в зависимости от типа металла и концентрации фуллеренов.

Механические свойства композитов определяли р несколькими методами: для толстых слоев (2-3 мкм) - на разрывной машине «Инстрон» при скорости движения подвижных захватов 60 мм/мин, путем построения диаграмм $\sigma=f(\delta/l)$ и на микротвердомере ПМТ-3, для тонких пленок - на нанотвердомере Nano Indenter II (фирма MTS Systems, США).

Нанотвердомер Nano Indenter II оснащен алмазным индентором, заточенном в форме трехгранной пирамиды (индентор Берковича). Применение индентора Берковича позволяет проводить испытания тонких пленок (100-200 нм) при намного более низких нагрузках, чем в случае применения индентора Виккерса.

В нашем случае при каждом испытании индентор Берковича нагружался трижды. Первый раз нагрузка на индентор возрастала до тех пор, пока не достигалась глубина в 50 нм. При этой нагрузке индентор выдерживался 10 с и нагрузка уменьшалась на 90%. После этого нагрузку увеличивали внедрения индентора до 100 нм и до 150 нм., то есть, твердость определялась на трех глубинах за один раз. При этом задавалась

не нагрузка, а глубина контакта. Скорость внедрения индентора была равна 5 нм/с, 1 мН = 0,1 грамма.

На рис. 1 представлена типичная диаграмма внедрения индентора Берковича для фуллеритовых плёнок.

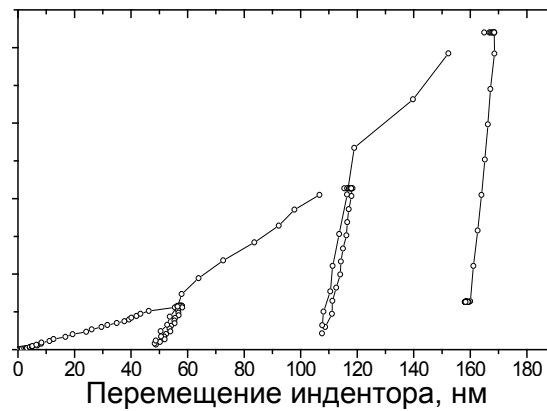


Рисунок 1 - Диаграмма внедрения индентора Берковича для фуллеритовых плёнок

Установлено, что для металл-фуллереновых плёнок с увеличением содержания металла упругость и нанотвёрдость возрастают, возрастает также их износостойкость, что объясняется изменением наноструктуры.

Аналогичные результаты получены для тонких металл-фуллереновых плёнок, сформированных в дуговом разряде в гелиевой среде на стальном аноде при использовании графитового катода и характерных для образования фуллеренов режимов горения дуги. Такие плёнки отличаются высокими значениями твердости и износостойкости [5]. Зависимость микротвёрдости углероднометалл-фуллереновой плёнки и исходного материала (сталь С45) от расстояния от центра образца приведены на рисунке 2.

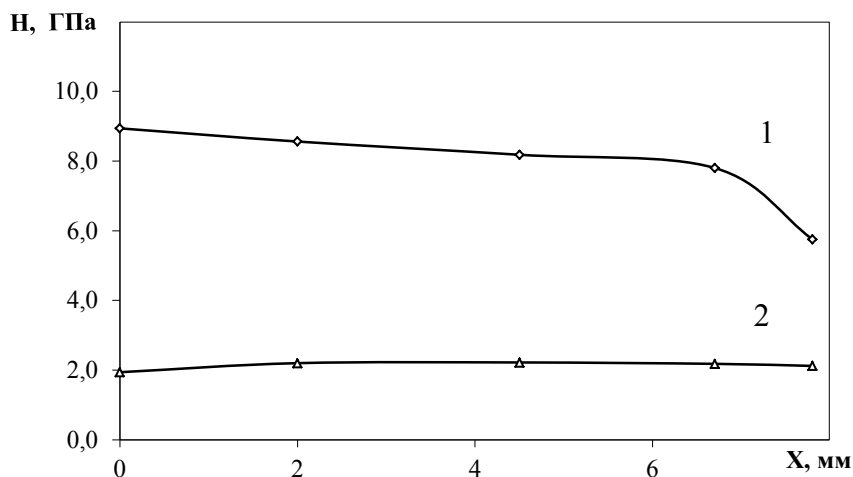


Рисунок 2 - Изменение микротвёрдости металл-фуллереновой плёнки (1) и подложки (сталь С45) (2) от центра электрода к его периферии

Увеличение микротвёрдости плёнки в сравнении с микротвёрдостью исходной подложки (сталь С45), более чем в 4 раза объясняется формированием наноразмерной структуры и образованием углеродных фаз.

В приведенной таблице приведены механические характеристики композитов исследованных металл-фуллереновых систем

Таблица - Механические свойства композита сталь С45+С₆₀

Масс. доля С ₆₀ , %	Предел упругости при растяж., σ_y , МПа	Прочн. при разрыве, σ_p , МПа	Относ. удлинение при пределе упругости, ε_y , %	Модуль Юнга, ГПа
0,0	520	88	6,1	6,31
0,01	543	101	2,2	7,47
0,05	602	106	2,1	8,66
0,1	621	90	2,0	9,47
0,25	610	94	2,9	9,13

Таким образом, показано, что ведение фуллеренов в металлическую матрицу значительно изменяет их механические свойства: повышает предел прочности, микротвёрдость, внутренние механические напряжения. Упрочнение металлов введением фуллеренов вызвана структурными изменениями, приводящими к увеличению дисперсности и повышением внутренних механических напряжений за счет внедрения крупноразмерных (превышающие размеры атомов металла в 14-16 раз) молекул С₆₀ в металлические кристаллиты.

Полученные результаты указывают на перспективность применения металл-фуллереновых плёнок в электронной технике, поскольку трещинообразование и отслаивание плёнок не наблюдалось вплоть до толщины 2 мкм, а титан-фуллереновых плёнок для биомедицинских целей, например, при изготовлении эндопротезов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пул Ч.(мл.), Оуэнс Ф. Нанотехнологии. М.: Техносфера., 2006. – 336 с.
2. Витязь П.А., Свидуневич Н.А. Основы нанотехнологий и наноматериалов. Мн.: Выш.шк., 2010.- 302.
3. Vityaz P.A., Shpilevsky E.M. Fullerenes in matrices of different substances //Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2012, Volume 85, Issue 4, Page 780-787.
4. Шпилевский Э.М., Пенязьков О.Г., Шилагарди Г., Тувшинтур П. Материалы, содержащие фуллерены: достижения и надежды. //Наночастицы в конденсированных средах. Сб. науч. Статей. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси. 2015. С. 3-13.
5. Shpilevsky E.M., Zhdanok S.A., Schur D.V. Containing carbon nanoparticles materials in hydrogen energy. Hydrogen Carbon Nanomaterials in clean Energy Hydrogen Systems- II. Dordrecht: Springer Science, 2011. PP. 23-39.