

УДК 621.793.182

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК MoS₂ ПРИ МАГНЕТРОННОМ НАНЕСЕНИИ

Антон Вадимович Сиков⁽¹⁾, Александр Иванович Семочкин⁽¹⁾, Александр Доломанжи⁽²⁾

*Студент 1 курса магистратуры⁽¹⁾, Студент 2 курса магистратуры⁽²⁾,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»*

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель: А.И.Беликов,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Технологии тонкопленочных покрытий широко используются в современном мире. Тонкие пленки позволяют увеличить прочность, износостойкость, твердость, коррозионную стойкость поверхностей, получить на поверхностях микро- и наноструктуры для формирования электронных схем [1]. Тонкие пленки находят свое применение в машиностроении, самолетостроении, космической отрасли, медицине, энергетике и электронике. Одним из перспективных методов нанесения тонких пленок является метод магнетронного распыления мишени в вакууме. Широкое распространение метода обусловлено его простотой реализации, высоким качеством покрытий, достаточно высокой скоростью формирования пленок, а также возможностью масштабирования для промышленного использования.

В зависимости от требуемых свойств и характеристик тонких пленок к ним предъявляются различные требования по толщине, неравномерности, шероховатости, а также структуре. Так, для уменьшения коэффициента трения в парах механизмов, а следовательно, снижения износа поверхностей, тонкие пленки должны иметь слоистую структуру и сохранять свои эксплуатационные свойства на протяжении многих циклов работы [2]. Достигается это путем использования в качестве материала мишени слоистого материала (такого, как дисульфид молибдена – MoS₂) и дальнейшего определения технологических режимов нанесения, которые позволят сформировать покрытие оптимальной структуры и заданной толщины, обеспечивающие требуемый коэффициент трения для контактирующих деталей.

Однако, в некоторых случаях, размеры поверхности, на которую требуется нанести покрытие, больше размеров распыляемой мишени, что является причиной неравномерного нанесения пленок. Также неравномерность покрытия может быть существенной, если нанесение осуществляется на несколько поверхностей детали, расположенных вне рабочей области магнетрона. В связи с этим целью данной работы является исследование неравномерности тонких пленок при магнетронном нанесении.

Для достижения поставленной цели проводились эксперименты по нанесению тонкопленочных покрытий дисульфида молибдена (MoS₂). Эксперименты проводились на установке с вакуумной камерой колпакового типа, двумя магнетронами и автономным источником ионов. Система откачки состоит из диффузионного и пластинчато-роторного насосов. Установка включает систему подачи рабочего газа с электронным управлением, источники питания обеспечивают распыление мишеней на постоянном токе (DC), в импульсном (LF) и высоко-импульсном (HiPIMS) режиме.

В каждом эксперименте предварительно подготавливались и очищались пять кремниевых пластин размерами 15x15x0.5 мм. Пластины располагались в разных зонах плоскости подложкодержателя (рисунок 1): как под рабочей областью магнетрона

(образцы №3 и №4), так и за ее пределами (образцы №№ 1, 2 и 5). Непосредственно перед нанесением пленок подложки подвергались ионной обработке. Нанесение покрытий выполнялось при следующих неизменных параметрах: время нанесения – 180 минут, время предварительной ионной обработки – 30 минут, режим работы источника питания – DC, ток разряда – 0.07 А, мощность – 30 Вт, расстояние между магнетроном и подложкодержателем – 100 мм. Варьировалось давление рабочего газа (аргона). В первом эксперименте давление составляло 1 Па, во втором – $5.6 \cdot 10^{-1}$ Па.

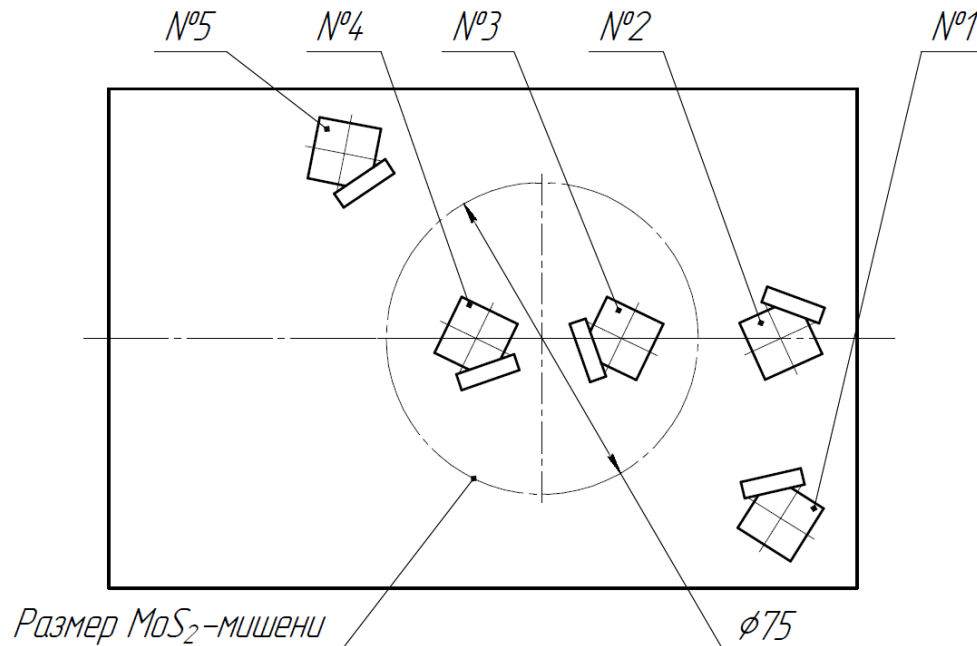


Рисунок 1 – Схема размещения образцов относительно области проекции мишени

Измерение толщины покрытия на образцах осуществлялось по “ступеньке”, которая формировалась путем использования специальной маски, закрывающей часть пластины. Толщины покрытий определялись при помощи профилометра TR220, позволяющего измерять перепад высот в диапазоне от 0.05 до 40 мкм, точность измерений составляет 10% [3].

Теоретические значения неравномерности были рассчитаны по формуле (1) [4]:

$$\Delta = \frac{h}{h_0} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\delta}{r}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}, \quad (1)$$

где h_0 – максимальная толщина пленки, h – толщина пленки на любом расстоянии δ от центра подложки; r – расстояние от источника до подложки.

Расстояния r для зон размещения образцов приведены на рисунке 2.

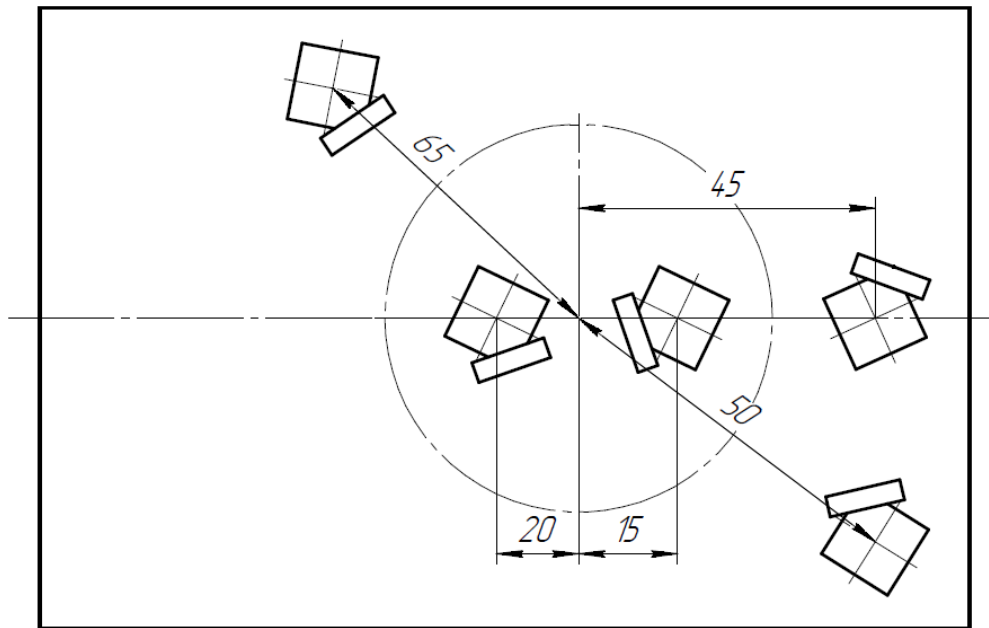


Рисунок 2 – Расположение образцов относительно центра магнетрона

За максимальную толщину пленки принималась толщина покрытия образца №3.

В таблице 1 представлены результаты измерений толщин покрытий для всех десяти образцов из двух экспериментов, теоретически рассчитанные значения толщин, а также расхождение результатов для соответствующих образцов.

Таблица 1 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений толщины

№ образца (расстояние, мм)	Эксперимент 1 ($p = 1 \text{ Па}$)			Эксперимент 2 ($p = 5.6 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$)		
	Эксп. значение, мкм	Теор. значение, мкм	Расхождение, %	Эксп. значение, мкм	Теор. значение, мкм	Расхождение, %
1 (50)	1.31	1.75	25.1	1.48	1.58	6.3
2 (45)	1.68	1.85	9.2	1.83	1.67	-9.5
3 (0)	2.44	-	-	2.21	-	-
4 (20)	1.99	2.05	2.9	2.02	1.85	-9.1
5 (65)	1.24	1.43	13.3	1.38	1.30	-5.7
Max-Min	1.20	-	-	0.83	-	-

В работе использовался упрощенный расчет, без учета распределения плотности тока в разряде над мишенью и площади области распыления, которые существенно зависят от конструкции магнитной системы магнетрона. Фактически, в рассматриваемом упрощении, результаты экспериментов свидетельствуют о том, что неравномерность толщин покрытий в первом эксперименте (при более высоком давлении) оказалась выше теоретически рассчитанной, при этом абсолютная разница между максимальной и минимальной толщиной покрытий составила 1.20 мкм. Во втором эксперименте измеренные значения толщины покрытий оказались больше расчетных, за исключением одной области (образец № 1), и наблюдалось повышение фактической равномерности, в сравнении с первым экспериментом, разница между максимальным и минимальным значениями составила намного меньшую величину - 0.83 мкм. Следовательно, для получения более равномерного покрытия на крупногабаритных образцах целесообразно использовать более низкое давление рабочего газа, при этом незначительно снижается скорость роста покрытия.

Литература

1. *Gwan-Hyoung Lee, Young-Jun Yu, Xu Cui, Nicholas Petrone* Flexible and Transparent MoS₂ Field-Effect Transistors on Hexagonal Boron Nitride-Graphene Heterostructures // ACS Nano. - 2013. - №7. - С. 7931-7936
2. *Моргунов А.П., Масагин В.Б., Деркач Вал. В., Матвеев Н.А.* Исследование физико-механических свойств и структуры слоистых смазок // динамика систем, механизмов и машин. - 2016. - №1. - С. 200-207.
3. Измеритель шероховатости TR220 // Компания ООО "ГЕО-НДТ" Режим доступа: <https://www.geo-ndt.ru/pribor-268-izmeritel-sherohovatosti-tr220.htm> (дата обращения: 17.03.2019).
4. *Панфилов Ю.В.* Расчет режимов процесса нанесения тонких пленок в вакууме и параметров оборудования. - М.: 1988.