

Рис. 3. Распределение упругих напряжений в плёнке GaN на SiC/Si (справа) и на Si (слева) при остывании от 800С до комнатной температуры.

В случае наличия пористого буферного слоя у поверхности плёнки наблюдается периодическая модуляция механических напряжений в диапазоне 30-103 МПа со средним значением ~65 МПа. При отсутствии буферного слоя механические напряжения распределены однородно вдоль поверхности плёнки, однако они значительно выше и составляют ~125 МПа. Следует отметить, что непосредственно в зоне соприкосновения буферного слоя и плёнки механические напряжения достигают величины 140 МПа, однако очень быстро спадают при увеличении толщины плёнки. Это позволяет сделать вывод о положительном влиянии системы пор на релаксацию упругих напряжений.

Авторы благодарны В.В. Кидалову и И.П. Сошникову за помощь в изготовлении и исследовании образцов.

#### Литература

1. S.A. Kukushkin, A.V. Osipov V.N. Bessolov, B.K. Medvedev, V.K. Nevolin and K.A. Tsarik// Reviews on Advanced Materials Science 16 (2008) 1.
2. S. A. Kukushkin and A. V. Osipov // J. Phys. D: Appl. Phys. 47 (2014) 313001.
3. V.N. Bessolov, D.V. Karpov, E.V. Konenkova, A.A. Lipovskii, A.V. Osipov, A.V. Redkov, I.P. Soshnikov, S.A. Kukushkin. Pendeo-epitaxy of stress-free AlN layer on a profiled SiC/Si substrate//Thin Solid Films 606 (2016) 74.

## Исследование влияния толщины тонкопленочного слоя MoS<sub>2</sub> на износостойкость покрытия системы TiC-MoS<sub>2</sub>

*В.В. Петров, А.И. Беликов, Е.А. Ивченко*

*Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ул. 2-ая Бауманская, д.5, petrov.v.v@bmstu.ru*

*В данной работе приведена сравнительная оценка влияния толщины тонкопленочного покрытия MoS<sub>2</sub> на общий упрочняющий эффект системы покрытий TiC-MoS<sub>2</sub>, выраженный через износостойкость упрочняющего покрытия TiC.*

*How the thickness of thin films layer MoS<sub>2</sub> effects the wear resistance of the system "TiC-MoS<sub>2</sub>" coating. V.V. Petrov, A.I. Belikov, E.A. Ivchenko. Comparative assessment of MoS<sub>2</sub>'s thin-film coating thickness influence on the cumulative strengthening effect of TiC-MoS<sub>2</sub>'s coating system is given. It is expressed through wear resistance of the strengthening TiC coating.*

#### Введение

Современные методы развития области тонкопленочных упрочняющих покрытий, формируемых с использованием технологий вакуумного нанесения тонких пленок, связаны с формированием наноструктурных и нанокompозитных покрытий, обладающих высокими механическими и трибологическими характеристиками. Недостатком большинства сверхтвердых

наноструктурных покрытий является высокий коэффициент трения в паре с металлами. Улучшение трибологических характеристик таких покрытий связано с добавлением в состав компонентов, которые обладают высокими антифрикционными свойствами, например, твердосмазочных материалов переходных металлов ( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ,  $\text{MoSe}_2$  и т.п.).

В твердых упрочняющих покрытиях в контакте пары трения возникают высокие локальные контактные напряжения и сдвиговые напряжения, которые увеличиваются с повышением коэффициента трения. Данные эффекты проявляются на ранних стадиях процесса, которые характеризуются как этап приработки и приводят к снижению износостойкости твердых покрытий. Для решения проблемы используют мягкие притирочные покрытия, которые наносятся поверх твердых пленок, уменьшающие негативный эффект «жесткой» приработки. Тонкопленочные покрытия дисульфида молибдена снижают коэффициент трения скольжения по стали и сохраняют значения на уровне 0.1 и менее, обеспечивают работоспособность при высоких контактных нагрузках [1].

Актуальность работы и практический интерес представляет использование дисульфида молибдена в упрочняющих покрытиях, в том числе, и в качестве вершинного притирочного слоя. Покрытие дисульфида молибдена может быть нанесено поверх твердого покрытия на поверхности технологического инструмента или деталей узлов трения.

### **Подготовка образцов для исследований**

При формировании двухслойных покрытий в качестве базового износостойкого покрытия использовалось покрытие TiC. Для сравнительной оценки влияния толщины тонкопленочного слоя  $\text{MoS}_2$  на износостойкость системы TiC- $\text{MoS}_2$  были подготовлены образцы. Толщина нижнего износостойкого слоя TiC двухслойного покрытия TiC- $\text{MoS}_2$  была одинаковой и составляла величину 2.2 мкм. Толщина вершинного слоя  $\text{MoS}_2$  выбиралась из ряда значений 0.5, 1.0, 1.5 и 2.0 мкм. Тонкопленочные покрытия  $\text{MoS}_2$  наносили одновременно как на подложки с предварительно нанесенным покрытием TiC, так и на образцы без покрытий. Параметры структуры и толщины покрытий подготовленных образцов представлен в таблице 1.

Под образцы в качестве подложек использовались вырезанные листы из стали X18H10T толщиной 1,5 мм и размером 20x20 мм. Подготовка образцов включала механическую полировку до шероховатости  $Ra=0.2$ , обработку в ультразвуковой ванне, обезжиривание спиртовым раствором.

Таблица 1. Параметры структуры полученных на подложках покрытий.

№	Покрытие	Фактическая толщина слоя TiC, мкм	Планируемая толщина слоя $\text{MoS}_2$ , мкм	Фактическая толщина слоя $\text{MoS}_2$ , мкм
1	TiC	2,2	-	-
2	TiC+ $\text{MoS}_2$	2,2	0,5	0,4
3	$\text{MoS}_2$	-	0,5	0,4
4	TiC+ $\text{MoS}_2$	2,2	1	1,1
5	$\text{MoS}_2$	-	1	1,1
6	TiC+ $\text{MoS}_2$	2,2	1,5	1,7
7	$\text{MoS}_2$	-	1,5	1,7
8	TiC+ $\text{MoS}_2$	2,2	2	2,1

Формирование износостойкого покрытия TiC осуществлялось методом электродугового осаждения титана в атмосфере ацетилена на установке PLATIT л80. Предварительно образцы очищались с использованием плазмы тлеющего разряда. В качестве мишени использовался цилиндрический титановый катод диаметром  $\varnothing 80$  мм и длиной  $L=300$  мм. В процессе формирования покрытий подложки нагревались до температуры  $T=450$  К.

Нанесение твердосмазочного покрытия осуществлялось методом магнетронного распыления пресованной мишени  $\text{MoS}_2$  диаметром 78 мм на вакуумной технологической установке кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ имени Н.Э. Баумана. Рабочая камера установки откачивалась до остаточного давления  $10^{-3}$  Па, нанесение покрытий осуществлялось при давлении аргона  $10^{-1}$  Па. Предварительно, перед нанесением покрытий, поверх-

ность образцов обрабатывалась с помощью автономного источника ионов с холодным катодом типа «Радикал».

Фактическая толщина полученных покрытий измерялась на толщиномере Calotest Compact компании CSM Instruments SA.

### **Исследование образцов**

Изучение трибологических характеристик и оценка износостойкости покрытий образцов проводились на трибометре TRB-S-CE (CSM Instruments SA) по методу «шар-плоскость» с линейным возвратно-поступательным перемещением образца относительно неподвижного индентора, в качестве которого выступал шар диаметром 6 мм из WC. Использовались следующие режимы испытаний:

- прикладываемая нагрузка – 1 Н;
- длина хода (амплитуда перемещений) – 8 мм;
- скорость перемещения – 10 см/с;
- длина пробега (путь трения) – 1500 м (31250 циклов).

В процессе измерения коэффициент трения фиксировался в виде зависимости от пути трения (в метрах). График изменения коэффициента трения от пути трения для образца с двухслойным покрытием TiC-MoS<sub>2</sub> представлен на рис. 1.



*Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от пути для образца с покрытием TiC-MoS<sub>2</sub> ( $h_{TiC}=2,2$  мкм;  $h_{MoS_2}=2,1$  мкм) в паре с контртелом - шаром из WC.*

Износостойкость образцов определялась исходя из объема потерянного во время испытания материала. Объемный износ образцов оценивался в мм<sup>3</sup>/(Н·м) с использованием среднего значения площади сечения дорожки износа по результатам измерения 5 поперечных профилей на профилометре Dektak 150.

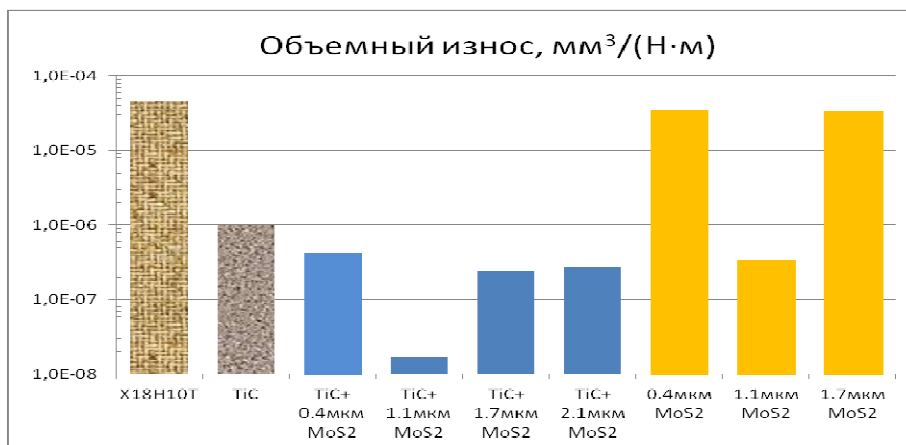


Рис. 2. Гистограмма значений объемного износа образцов.

### Обсуждение результатов

Исследования показали, что для большинства образцов происходило повышение износостойкости поверхности, однако для рассматриваемых вариантов упрочнения можно отметить следующие особенности. При нанесении покрытий дисульфида молибдена на стальную подложку наблюдалось снижение объемного износа для покрытия MoS<sub>2</sub> толщиной 1.1 мкм. Покрытие полностью не износилось за время испытаний. При одинаковых условиях испытаний износ покрытия на два порядка был ниже износа подложки. Продемонстрировав общее снижение износа на 30% по отношению к износу стальной подложки, покрытия MoS<sub>2</sub> толщиной 0.4 и 1.7 мкм полностью разрушились за время испытаний.

В свою очередь, для покрытий MoS<sub>2</sub> разной толщины на твердом покрытии TiC наблюдалось повышение износостойкости во всех случаях, по отношению к покрытиям MoS<sub>2</sub> на стальной подложке, без твердого подслоя.

Формирование тонкопленочных покрытий MoS<sub>2</sub> на поверхности твердого покрытия TiC приводило к снижению суммарного износа более чем в два раза. Максимальный эффект наблюдался для покрытия MoS<sub>2</sub> толщиной 1.1 мкм, приведший к снижению износа почти в 60 раз.

### Заключение

Результаты проведенной работы свидетельствуют о влиянии тонкопленочного покрытия MoS<sub>2</sub>, формируемого на поверхности износостойкого покрытия TiC на износостойкость последнего.

Исследования показали, что использование в качестве твердого подслоя для дисульфида молибдена покрытия TiC приводит к существенному повышению износостойкости покрытия MoS<sub>2</sub> (разница составляет до 2-х порядков).

### Литература

1. Иванов В.В., Марченко Ю.В. Перспективы применения дисульфида молибдена для формирования вибрационных механохимических твердосмазочных покрытий // Вестник ДГТУ, 2010. Т.10. № 3(46), с.381-385.
2. Беликов А.И., Шарапов М.А., Караулов Д.А., Осирко К.П. Исследование упрочняющих покрытий на основе тонких пленок, содержащих слои дисульфида молибдена // Наноинженерия, 2011. №5, с.32-35.