

частности для заготовок из стали 20ХНЗА толщина упрочненного слоя более 20 мкм, из стали 25ХГМ — около 40 мкм, из стали 20ХНР — до 60 мкм, из стали 25ХГТ — до 40 мкм. Микротвердость поверхности повышается до 2,2-2,9 раза по сравнению с микротвердостью самого материала в зависимости от марки стали и режимов иглофрезерования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е.В. Перепичка «Очистно-упрочняющая обработка изделий иглофрезами» – М: Машиностроение, 1989.–136с. 2. С.Т. Кишкин Изв. АН СССР ОНТ №1 – 1948.—87-96с.

УДК 621.793

Фролов И.С., Иващенко С.А., Гречихин Л.И., Фролов Ю.И.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МУЛЬТИСЛОЙНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Разработана теплофизическая модель формирования мультислойных ионно-плазменных покрытий. В основе модели лежит предположение о том, что определяющим фактором, от которого зависят структура и свойства таких покрытий, является температура слоя покрытия. Установлено, что оптимальный комплекс свойств мультислойного покрытия обеспечивается при температуре в слое покрытия от 0,1 до 0,8 температуры плавления материала покрытия.

В настоящее время одним из интенсивно развивающихся методов нанесения покрытий является ионно-плазменный с генерацией материала покрытия вакуумной дугой (вакуумный электродуговой или метод КИБ). Разработаны и широко используются на практике технологические процессы нанесения данным методом покрытий из нитридов и карбидов различных металлов. Покрытия такого типа используются в качестве защитно-декоративных и износостойких [1,2]. Одним из перспективных направлений развития данного метода является получение композиционных конденсатов путем создания мультислойных систем-покрытий, состоящих из большого количества нанослоев, толщина которых составляет несколько периодов кристаллической решетки. Однако вопросы формирования таких покрытий изучены явно недостаточно, что затрудняет их практическое применение. Поэтому исследование мультислойных покрытий с целью отработки технологии их получения представляется актуальным.

На первом этапе исследований, представленном в работе [3] было экспериментально установлено, что при определенных толщинах нанослоев нитрида титана (менее 50 нм) в покрытии формируется ультрадисперсная (квазиаморфная) структура, характеризующаяся высоким уровнем физико-механических и технологических свойств. Отмечено, что формирование таких нанослоев конденсата из-за их быстрого нагрева и охлаждения происходит в сильно неравновесных условиях, что приводит к образованию нанокристаллической структуры с большим количеством внутренних дефектов и искажений. При большей толщине нанослоев формируется характерная для ионно-плазменных конденсатов столбчатая структура покрытия. Была выдвинута гипотеза, что среди множества факторов, влияющих на появление аморфной фазы, определяющим, по-видимому, является толщина слоя покрытия. Так, в работе [4] образование аморфных фаз в пленках δ -NbN установлено при толщинах менее 25 нм, что согласуется с результатами, полученными выше. При толщине фазовых слоев около 30 нм обнаруживались лишь следы аморфной фазы.

Однако никаких теоретических основ этого явления в работах исследователей представлено не было, что не позволяло разрабатывать технологию формирования таких покрытий и обеспечить четкое прогнозирование их характеристик.

Поэтому на втором этапе исследований была разработана теплофизическая модель формирования мультислойных ионно-плазменных покрытий (рис. 1). В основе модели лежит предположение о том, что определяющим фактором, от которого зависят структура и свойства таких

покрытий 3, является температура слоя 2 покрытия, определяемого как совокупность атомарных монослоев 1 материала покрытия.

Установлено, что для мультислойного покрытия TiN температура слоя покрытия при нанесении i -го атомарного монослоя материала покрытия определяется зависимостью

$$T_{сли} = \frac{\dot{Q}_{ni} \cdot \tau \cdot S \cdot (C_o \cdot M_{\Gamma} + C_{\Pi} \cdot M_{\Pi} - 3 \cdot \kappa_B)}{3 \cdot \kappa_B \cdot (C_o \cdot M_{\Gamma} + C_{\Pi} \cdot M_{\Pi})} \quad (1)$$

где $T_{сли}$ – температура слоя покрытия при нанесении i -го атомарного монослоя материала покрытия, К;

\dot{Q}_{ni} – тепловой поток при формировании i -го атомарного монослоя покрытия, Вт/м²;

i – номер атомарного слоя материала покрытия;

τ – время формирования одного атомарного монослоя покрытия, с;

S – площадь одного места адсорбции основы, м²;

C_o – удельная теплоемкость материала основы, Дж/кг·К;

C_{Π} – удельная теплоемкость материала покрытия, Дж/кг·К;

M_{Π} – масса молекулы материала покрытия, кг;

M_{Γ} – масса молекулы реакционного газа, кг;

κ_B – постоянная Больцмана, Дж/К.

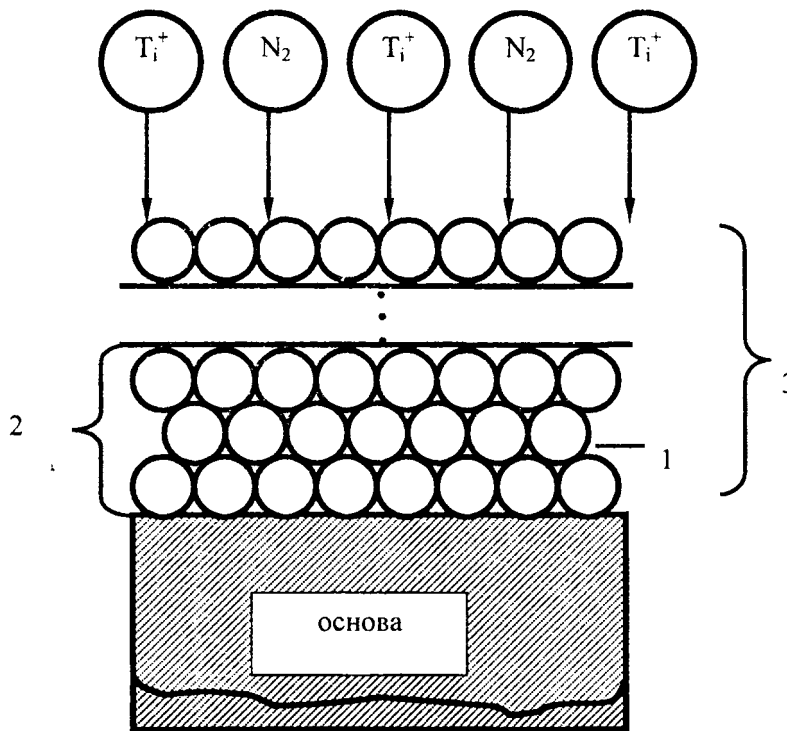


Рис. 1. - Схема формирования мультислойного ионно-плазменного покрытия

Тепловой поток в покрытии при формировании i -го атомарного монослоя рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{ni} = & \Theta_{N_2-TiN} \cdot \frac{n^2}{n + n_{Ti}} \cdot v_{над} \cdot \left(\frac{M_{N_2} v_{над}^2}{2} + E_{св.N_2-TiN} \right) + \Theta_{Ti-TiN} \cdot \frac{n_{Ti}^2}{n + n_{Ti}} \cdot v_{над} \cdot \left(\frac{M_{Ti} v_{над}^2}{2} + E_{св.Ti-TiN} \right) + \\ & + \Theta_{N_2} \cdot n \cdot v_{над} \cdot \left(\frac{M_{N_2} \cdot v_{над}^2}{2} + E_{св.N_2} \right) \end{aligned}$$

где Θ_{N_2-TiN} , Θ_{Ti-TiN} - доля передаваемой энергии при упругом ударе молекул азота и ионов титана с нитридом титана соответственно;

Θ_{N_2} - доля передаваемой энергии при упругом ударе молекул азота с атомами титана.

Доля передаваемой энергии при упругом ударе определяется по формуле:

$$\Theta = \frac{4m_1m_2K}{(m_1 + m_2K)^2},$$

где m_1 – масса падающей частицы, кг;

m_2 – масса частицы основы, кг;

K – количество молекул основы, вовлекаемых в процесс упругого взаимодействия:

$$K = \sum_{i=1}^3 N_i W_i,$$

где N_i – количество атомов в i -м координационном слое;

W_i – вероятность связи атомов основы при бинарном взаимодействии с i -м координационным слоем:

$$W_i = \int_0^{E_{св,i}} f(E, T_1) dE$$

где $f(E, T_1)$ – нормируемая функция распределения Максвелла-Больцмана частиц атомов основы по энергиям;

T_1 – температура основы, К;

$E_{св,i}$ – энергия связи с атомами i -го координационного слоя;

$E_{св,N_2-TiN}$, $E_{св,Ti-TiN}$ – энергия связи молекул азота и атомов титана с нитридом титана соответственно;

$E_{св,N_2}$ – энергия связи при физической адгезии молекул титана и атомов азота с учетом латерального взаимодействия;

Значения энергии связи определялись расчетным путем и с использованием справочных данных.

$v_{над}$ – скорость двухфазного потока, определяемая зависимостью:

$$v_{над} = \frac{v}{8 \cdot r_{TiN}^3 \cdot n},$$

где r_{TiN} – средний радиус молекул нитрида титана ($r_{TiN} = 1,4 \cdot 10^{-10}$ м);

n – общая концентрация молекул азота, которая определялась из основного уравнения кинетической теории газов, а именно:

$$n = \frac{P}{T \cdot K_6},$$

где T – температура в вакуумной камере ($T = 723$ К);

n_{Ti} – концентрация ионов титана в потоке, которая определяется по формуле:

$$n_{Ti} = \frac{i}{v_{над} \cdot \tau \cdot S}$$

В качестве конкретного примера проводился по формуле (1) расчет температуры для каждого атомарного монослоя наносимого слоя покрытия TiN на основу из стали 12X18H10T при следующих постоянных параметрах: площадь одного места адсорбции основы $S = 8,1796 \cdot 10^{-20}$ м; удельная теплоемкость стали 12X18H10T $C_0 = 745$ Дж/кг·К; удельная теплоемкость материала покрытия $C_n = 598$ Дж/кг·К; масса молекулы материала покрытия $M_{Ti} = 103 \cdot 10^{-27}$ кг; масса молекулы азота $M_N = 46,5 \cdot 10^{-27}$ кг; постоянная Больцмана $k_B = 13,8 \cdot 10^{-24}$ Дж/К; время образования одного атомарного монослоя покрытия $\tau = 0,093$ с.

В результате расчетов получена зависимость температуры слоя покрытия TiN от количества атомарных монослоев материала покрытия, представленная на рис. 2., которая позволяет сделать вывод о формировании ультрадисперсной (квазиаморфной) структуры на участке стабилизации температуры в слое покрытия, что применительно к температуре плавления материала покрытия ($T_{пл}$ для TiN равна 3220 К) составит от 0,1 до 0,8 температуры плавления. Именно этому температурному интервалу должен соответствовать оптимальный комплекс свойств покрытия в том числе, как предполагалось в работе [3], и наибольшая износостойкость.

Это можно объяснить тем, что при температуре слоя покрытия менее $0,1 T_{пл}$ температура на поверхности изделия является недостаточной для эффективного прохождения плазмохимических реакций. Поэтому покрытие осаждается в виде рыхлого слоя, характеризующегося высокой пористостью и низкой адгезией к основе, что не позволяет использовать такие покрытия в качестве защитно-декоративных и износостойких. При температуре слоя покрытия более $0,8 T_{пл}$ в покрытии начинается интенсивное формирование столбчатой структуры, что приводит к снижению износостойкости и других свойств покрытия.

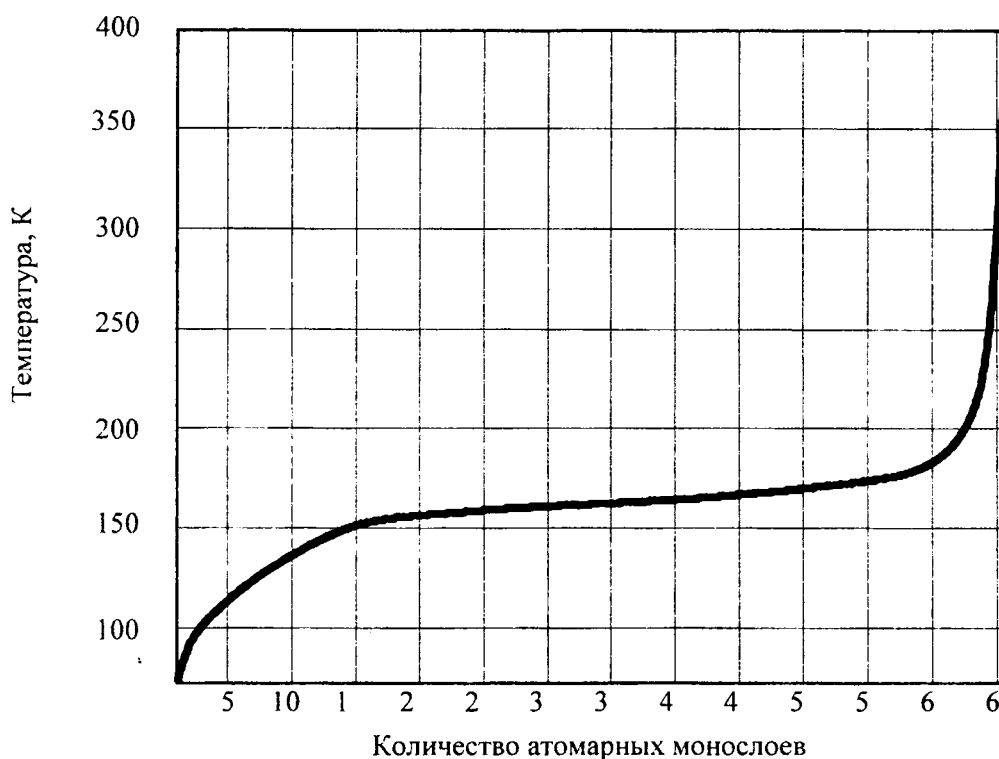


Рис. 2. - Зависимость температуры слоя покрытия TiN от количества атомарных монослоев материала покрытия

Для проверки этой гипотезы на установке вакуумного напыления УРМЗ.279.048 в импульсном режиме работы испарителя производилось осаждение мультислойного покрытия TiN на образцы из стали 12Х18Н10Т. Режимы осаждения: ток дуги $I=90$ А, напряжение на образце $U=100$ В, давление реакционного газа (азота) в вакуумной камере $P=8 \cdot 10^{-2}$ Па. Скорость осаждения покрытия для данных режимов составляет $V=0,18$ мкм/мин. Атомарные монослои 1 (рис. 1.) материала покрытия в каждом слое 2 наносились до температуры соответствующей 0,35; 0,5; 0,55; 0,6 и 0,9 температуры плавления TiN . Контроль температуры покрытия осуществлялся платино-родиевой термопарой через специальное отверстие в образце с выводом ее сигнала на регистрирующий потенциометр ПИ-63. Общая толщина покрытия 3 была принята равной 7 мкм.

Полученные образцы с мультислойным покрытием TiN испытывались на износостойкость. Испытания проводились на машине трения МТФ-1 при торцовом трении образцов по контртелу из чугуна СЧ21. Режимы испытания на износостойкость были следующими: удельное давление – 0,8 МПа, скорость относительного скольжения – 0,5 м/с, без смазки пары трения. Аналогичные испытания проводились для образцов с монослойным покрытием TiN толщиной 7 мкм. Результаты испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты испытания покрытий на износостойкость

Вид упрочненного слоя	Средний линейный износ (в мкм) при пути трения					Время до катастрофического разрушения покрытия, часов
	10,5·10 3 м	21·103 м	52·103 м	73,5·10 3 м	105·10 3 м	
Монослойное покрытие TiN	0,85	1,28	1,48	1,75	2,09	38
Мультислойное покрытие при температуре слоя (количестве атомарных монослоев в каждом слое покрытия):	0,44	0,61	0,72	0,88	1,04	90
0,35 Тпл (5)						
0,5 Тпл (20)	0,41	0,55	0,67	0,81	0,94	93
0,55 Тпл (40)	0,42	0,53	0,66	0,82	0,93	95
0,6 Тпл (60)	0,46	0,6	0,73	0,86	1,08	87
0,9 Тпл (65)	0,67	0,89	1,12	1,35	1,61	52

Анализ результатов показывает, что износостойкость стали 12Х18Н10Т с мультислойным покрытием TiN при оптимальной температуре слоя (количестве атомарных слоев в каждом слое покрытия) в 1,9 – 2,2 раза выше, чем износостойкость образцов с монослойным покрытием TiN . Это объясняется формированием в покрытии слоистой квазиаморфной структуры с неупорядочено-ориентированными зернами, которая вследствие большей твердости и адгезии в сочетании с необходимой пластичностью обладает большей износостойкостью. Кроме того, в условиях сухого трения и высоких удельных нагрузок в паре трения, приводящих к схватыванию и заеданию, разрушение мультислойных покрытий приобретает послойный характер, т.е. в первую очередь разрываются связи между слоями покрытия, а не между покрытием и основой, что имеет место в монослойных покрытиях. А так как число слоев достаточно велико, то это приводит к увеличению износостойкости покрытия, в то время как разрыв связи между основой и монослойным покрытием практически сразу приводит к разрушению последнего и выходу изделия из строя. Следовательно, мультислойные ионно-плазменные покрытия с оптимальной толщиной слоя, рассчитанной по предложенной модели, обеспечивают повышение износостойкости изделий, в том числе при самых жестких условиях эксплуатации, характеризующихся недостатком или полным отсутствием смазки в паре трения.

К дополнительным преимуществам, которые обеспечит применение разработанной модели, можно отнести повышение качества покрытий за счет увеличения твердости и адгезии при снижении пористости покрытий; возможность автоматизации процесса нанесения покрытия путем управления температурой поверхностного слоя; исключение перегрева поверхностного слоя изделия, что позволяет наносить покрытия гарантированного качества на легкоплавкие материалы и материалы с низкой температурой отпуска; возможность нанесения покрытий большей толщины без их отслаивания и разрушения вследствие больших внутренних напряжений.

Таким образом, разработанная теплофизическая модель создает надежную основу для разработки технологии получения мультислойных ионно-плазменных покрытий с высоким уровнем функциональных свойств и эксплуатационных характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Верещака А.С., Третьяков И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1989. – 192 с.
2. Емельянов В.А., Иванов И.А., Мрочек Ж.А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий. – Мн.: Издательство НПО «Интеграл», 1998. – 285 с.
3. Упрочнение деталей мультислойными покрытиями в вакууме / И.С. Фролов, С.А. Иващенко, Ж.А. Мрочек // Материалы МНТК «Машиностроение 2010: технологии – оборудование – инструмент - качество». – Мн., 2010. – С. 68-70.
4. Палатник Л.С., Черемской П.Г., Фукс М.Я. Поры в пленках. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.