

## Список использованных источников

1. Баран, Ю. В. Типы нагревателей для вакуумной формовки // Инженерно-педагогическое образование в XXI веке: материалы республиканской научно-практической конференции молодых ученых и студентов / Минск: БНТУ, 2021. – С. 197–198.

УДК 621.793.1

### **Морфология и свойства Cr-TiN покрытий, осажденных методом реактивного магнетронного распыления**

**Бердиев А. Г., аспирант**

*Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Гомель, Республика Беларусь*

*Научный руководитель: канд. техн. наук, доцент Пилипцов Д. Г.,  
канд. техн. наук, доцент Федосенко Н. Н.*

Аннотация:

Осаждены композиционные Cr-TiN покрытия с использованием метода реактивного магнетронного распыления. Атомно-силовая микроскопия показала изменение параметров поверхностной морфологии от давления азота. Методами инструментального наноиндентирования установлено изменение механических свойств покрытий, полученных при различном парциальном давлении азота.

С повестки важнейших научно-технических проблем не снимаются вопросы повышения эксплуатационных свойств покрытий, наносимых на инструмент с целью увеличения скорости обработки, долговечности. Широко используемые с этой целью покрытия, способные к образованию нитридных соединений, что приводит к изменению поверхностных свойств инструмента, изменению его поверхностной морфологии, фазового состава и механических свойства [1]. Однокомпонентные покрытия на основе нитридов широко используются в современном машиностроении, но стоит отметить, что при осаждении на легированные стали часто возникают проблемы с обеспечением эластичности наносимых слоев, низкой адгезионной прочностью соединения покрытие-основа (используются промежуточные

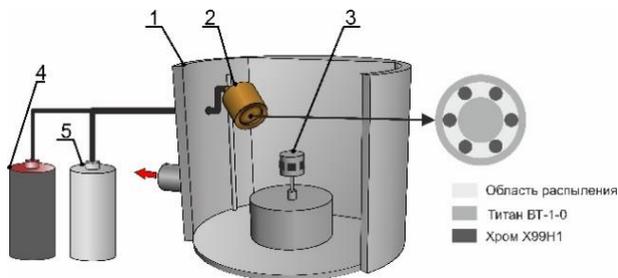
слои, нагрев), при упрочнении мелколезвийного инструмента имеет место затупление режущих кромок. Такие покрытия неэффективны при обработке резанием медных, титановых сплавов; имеет место налипание металла на режущие кромки, повышение усилий резания. Анализ литературных источников позволяет заключить, что эти недостатки могут быть устранены путем нанесения на инструмент упрочняющих покрытий из сложных нитридов, карбонитридов на основе титана, алюминия, хрома и кремния [1–3]. Оптимальный состав и технологические режимы осаждения таких покрытий могут быть определены только на основании результатов проведенных экспериментальных исследований.

### **Методика формирования и исследования.**

Схема осаждения Cr-TiN покрытий приведена на рисунке 1. Распыление композиционной хром-титановой мишени осуществляли при помощи магнетрона постоянного тока ( $I_{\text{разряда}} = 0,5 \text{ А}$ ,  $U_{\text{разряда}} = 500 \text{ В}$ ) при парциальном давлении смеси рабочих газов ( $\text{Ar} + \text{N}_2$ ) равном  $4 \times 10^{-2} \text{ Па}$ . Покрытия были получены при различном отношении  $\text{Ar} / \text{N}_2$  в рабочей смеси газов. За счет изменения расхода рабочих газов (таблица 1), подаваемых в вакуумную камеру при распылении композиционной хром-титановой мишени осуществлялись различные условия осаждения, что определяло изменение фазового состава покрытий, поверхностной морфологии и их свойств.

В качестве подложек использовали полированные пластины монокристалла кремния, предварительно очищенные в ультразвуковой ванне в ацетоне и непосредственно перед осаждением покрытия в аргонной плазме тлеющего разряда. Структуру поверхности исследовали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в полуконтактном режиме (Solver-PRO P47 (NT-MDT, Россия)). Толщину покрытий определяли с использованием профилометра Surtronic 25 (Taylor Hobson, Англия).

Измерение твердости  $H$  и модуля упругости  $E$  проводили методом наноиндентирования («НаноСкан 4D» ФГБНУ «ГИСНУМ, РФ») в режиме однократного нагружения-разгружения в 15 разных точках на поверхности образца при максимальной нагрузке на индентор 40 мН.



Режимы осаждения, толщина и параметры морфологии приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры Cr-TiN покрытий

Покрытие	Расход Ar, мл/мин	Расход N <sub>2</sub> , мл/мин	Толщина мкм	RMS, нм	Размер зерна D, нм
TiN	50	10	0,5	23,3	22,7
Cr-TiN	60	0	0,5	23,2	29,2
Cr-TiN	55	5	0,4	21,4	33,4
Cr-TiN	50	10	0,6	19,9	21,4
Cr-TiN	45	15	0,5	20,4	24,3

Как видно из данных таблицы 1, при равном времени осаждения толщина полученных покрытий одинакова. Стоит отметить, что поверхностная шероховатость RMS полученная в результате анализа данных АСМ находится в диапазоне от 19,9 нм до 23,3 нм. При этом количество азота оказывает незначительное влияние на изменение размера зерна на поверхности покрытия.

Зависимость механических свойств Cr-TiN покрытий, осажденных при различном отношении рабочего и реактивного газов приведена на рисунке 2.

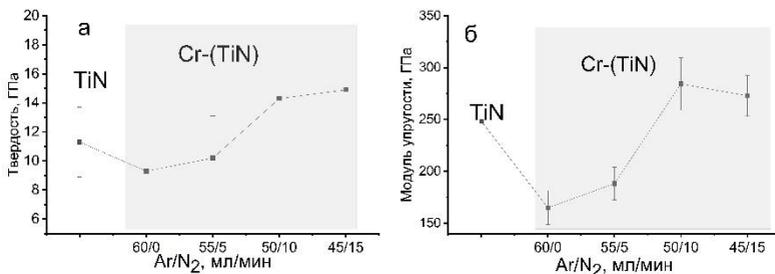


Рис. 2 – Зависимость твердости (а) и модуля упругости (б) покрытий

Увеличение твердости композиционных Cr-TiN покрытий, осажденных при высоких расходах азота, происходит за счет формирования в объеме покрытия фаз TiN и CrN, и преимущественно определяется образованием мелкодисперсной фазы CrN (рисунок 2).

Более высокая твердость и модуль упругости для покрытий, полученных при высоких расходах азота, и соответственно при его высокой концентрации в покрытии, определяют протекания процессов формирования структуры покрытия, состоящей из зерен CrN и TiN, а также минимальным содержанием хрома и титана в виде металлических включений. Как правило, фазовый состав таких покрытий представляет собой не только нитридные соединения хрома и титана, но и тернарные системы типа Cr- N-Ti. Также согласно данным АСМ, для Cr-TiN покрытий, полученных при высоких расходах азота (15 мл/мин), характерно образование на поверхности покрытий зерна меньшего размера (таблица 1), что согласно закона Холл-Петча приводит к увеличению твердости [4].

Методами реактивного магнетронного осаждения сформированы Cr-TiN покрытия. Показано изменения поверхностной морфологии покрытий в зависимости от метода осаждения. Полученные результаты определяются особенностями осаждения и роста покрытий, а также протеканием процессов химического взаимодействия между элементами в покрытии.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Wang, Q. Evaluating mechanical properties and crack resistance of CrN, CrTiN, CrAlN and CrTiAlN coatings by nanoindentation and scratch tests / Q. Wang, F. Zhou, J. Yan // Surface and Coatings Technology. – 2016. – Vol. 285. – P. 203–213.
2. Structure and mechanical properties of graded Cr/CrN/CrTiN coatings synthesized by close field unbalanced magnetron sputtering / M. S. Kabir [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2017. – Vol. 309. – P. 779–789.
3. Structure and properties of metal–carbon a–C coatings alloyed with Ti, Zr and Al with a high concentration авторы / D. G. Piliptsov, A. V. Rogachev, X.–H. Jiang, N. N. Fedosenko, E. A. Kulesh // The 19th International Conference on Global Research and Education, INTER–ACADEMIA 2021, Gomel, Belarus, 20 – 22 October, 2021. S. A. Khakhomov (chief editor) [et al.] – Gomel, Francisk Skorina Gomel State University, 2021. – P. 85–87.
4. Oliver, W. C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // J. of Materials Research. – 1992. – Vol. 7. – P. 1564–1583.

УДК 533.599

### **Анализ типовых подложкодержателей купольного типа**

**Винник И. О., студент**

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Республика Беларусь*

*Научный руководитель: канд. техн. наук, доцент Комаровская В. М.*

**Аннотация:**

В данной статье проведен анализ конструкций, существующих подложкодержателей купольного типа, которые можно внедрить в вакуумную установку «Stratnanotech Vega – C» для увеличения ее производительности.