

## НАГРУЗКА ПОЛНОГО ОТСЛАИВАНИЯ ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ TiN, СФОРМИРОВАННЫХ НА РАЗЛИЧНЫХ ПОДЛОЖКАХ

А.В. Кушнеров<sup>1)</sup>, С.В. Константинов<sup>2)</sup>, Т.В. Шелковая<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
ул. Академическая 12, Минск 220072, Беларусь, *kushnerou@mail.ru*

<sup>2)</sup>Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко  
Белорусского государственного университета,  
ул. Курчатова 7, Минск 220045, Беларусь, *my@mail3000@tut.by*

<sup>3)</sup>НПЦ НАН Беларуси по материаловедению,  
ул. П. Бровки 19, Минск 220072, Беларусь, *shoukavaya\_@mail.ru*

Проведено исследование адгезионных свойств вакуумно-дуговых покрытий TiN, нанесенных на подложки из отожженной инструментальной стали 9XC и твердых сплавов T5K10 (TiC-Co) и BK10 (WC-Co). Установлено, что исследуемые покрытия содержат фазу TiN с ГЦК решеткой и включения титана. Нанотвердость покрытий составила  $\approx 29$  ГПа. Показано, что нагрузка полного отслаивания ( $L_{c3}$ ) покрытия TiN для случая подложек из твердых сплавов составляет 70-100 Н, что в 2.3-3.3 раз превышает  $L_{c3}$  для стали 9XC (30 Н). Сделано заключение, что высокий уровень нагрузки отслаивания для покрытий, сформированных на подложках из твердых сплавов, обусловлен их высокой твердостью, что предотвращает пластическую деформацию подложки в процессе скретч-тестирования. Структурная совместимость TiN с карбидной фазой TiC, содержащейся в твердом сплаве T5K10, обеспечивает дополнительное увеличение  $L_{c3}$  для покрытия TiN, сформированного на подложке из твердого сплава T5K10.

**Ключевые слова:** покрытие TiN; твердые сплавы; фазовый состав; нагрузка полного отслаивания.

## LOAD OF COMPLETE PEELING OF VACUUM-ARC TiN COATINGS FORMED ON DIFFERENT SUBSTRATES

A.V. Kushnerou<sup>1)</sup>, S.V. Konstatinov<sup>2)</sup>, T.V. Shelkovaya<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus,  
12 Akademicheskaya Str., 220072 Minsk, Belarus, *kushnerou@mail.ru*

<sup>2)</sup>Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University,  
7 Kurchatov Str., 220045 Minsk, Belarus, *mymail3000@tut.by*

<sup>3)</sup>Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus  
for Materials Science, 19 Petrusya Brovki Str., 220072 Minsk, Belarus, *shoukavaya\_@mail.ru*

The adhesive properties of TiN vacuum-arc coatings deposited on substrates of annealed 9XC tool steel and hard alloys T5K10 (TiC-Co) and WK10 (WC-Co) have been studied. It was established that the investigated coatings contain a TiN phase with a FCC lattice and titanium inclusions. The nanohardness of the coatings was  $\approx 29$  GPa. It is shown that the total peeling load ( $L_{c3}$ ) of the TiN coating for the case of hard alloy substrates is 70-100 N, which is 2.3-3.3 times higher than  $L_{c3}$  for 9XC steel (30 N). It is concluded that the high level of peeling load for coatings formed on hard alloy substrates is due to their high hardness, which prevents plastic deformation of the substrate during scratch testing. The structural compatibility of TiN with the TiC carbide phase contained in the T5K10 hard alloy provides an additional increase in  $L_{c3}$  for the TiN coating formed on the T5K10 hard alloy substrate.

**Keywords:** TiN coating; hard alloys; phase composition; complete peeling load.

### Введение

В современных промышленных техно-

логиях активно используются износостойкие покрытия для повышения свойств ин-

струментов и деталей машин. Перспективным способом получения наноструктурных высокопрочных покрытий являются метод вакуумно-дугового осаждения [1].

Среди вакуумно-дуговых покрытий особое место занимает нитрид титана (TiN), который благодаря высокой твердости (до 2500 HV), химической стойкости и низкому коэффициенту трения широко применяется для защиты от износа режущего инструмента из инструментальных сталей и твердых сплавов [2]. Вместе с тем эффективность применения TiN-покрытий в значительной степени определяется их адгезией к подложке, которая зависит от комплекса факторов, включая состав, структуру и свойства, покрытия и подложки [3].

Особый интерес представляет исследование адгезии TiN к инструментальным сталям типа 9ХС и твердым сплавам, которые широко используются в металлообработке. В работе [4] показано, что твердость подложки оказывает сильное влияние на сопротивление разрушению тонких высокопрочных модифицированных слоев при трении, что связано с развитием пластических сдвигов в подложке в процессе фрикционного взаимодействия.

В связи с этим целью данной работы является сравнительное исследование влияния твердости и химического состава подложки (сталь 9ХС и твердые сплавы Т5К10, ВК10) на нагрузку полного отслаивания (разрушения) TiN-покрытий, полученных методом вакуумно-дугового осаждения.

#### Методики и материалы исследований

Объектом исследования являются образцы покрытий TiN, сформированных методом вакуумно-дугового осаждения на подложках из предварительно отожженной стали 9ХС (твердость 270 HV 10), а также твердых сплавов Т5К10 и ВК10 с твердостью  $\approx 1400$  HV 10. Нанесение покрытий проводилось на специализированной установке модели PVM-0.5FN.

Режим нанесения: ток – 85 А, температура – 190 °С, давление –  $3 \cdot 10^{-3}$  МПа, время нанесения покрытия – 30 мин. Толщина покрытий составляет порядка  $\sim 2$  мкм.

Рентгеноструктурный анализ фазового состава покрытий проводился на дифрактометре POWDIX 600 в монохроматизированном  $\text{CoK}\alpha$  излучении, при напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА. Нанотвердость покрытий измерялись на нанотвердомере Nano Hardness Tester (NHT2) фирмы CSM Instruments с применением алмазного индентора Берковича. Нагрузка на индентор составляла 5 г.

Для определения нагрузки полного отслаивания ( $L_{сз}$ ) покрытий TiN от подложки, проводились испытания методом скретч-тестирования на трибометре MFT-5000. К поверхности образца с покрытием подводился индентор Роквелла (алмазный наконечник с радиусом при вершине 20 мкм и углом 120°). Далее индентор перемещался по испытуемой поверхности и одновременно прикладывалась постепенно увеличивающаяся нагрузка в пределах от 1 до 50 Н для подложки стали 9ХС, и от 5 до 200 Н для сплавов Т5К10 и ВК10. Нагрузка полного отслаивания ( $L_{сз}$ ) покрытия от подложки определялась по резкому увеличению значений коэффициента трения и анализу микроструктуры царапины [5].

#### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлена характерная рентгеновская дифрактограмма от образца с покрытием TiN, нанесенным на подложку из твердого сплава Т5К10. На дифрактограмме, наряду с дифракционными линиями от материала подложки, регистрируются линии от нитрида титана TiN с ГЦК решеткой типа NaCl и титана Ti с ГПУ решеткой. Параметр кристаллической решетки фазы TiN составляет  $a = 0.4240$  нм.

Присутствие на дифрактограммах линий от фазы Ti связано с наличием капельной фракции в распыляемом при формировании покрытия титане. Нанотвердость

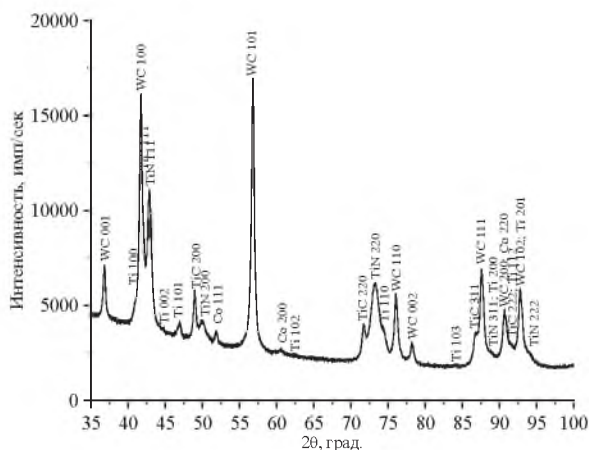


Рис. 1. Характерная рентгеновская дифрактограмма ( $\text{CoK}_\alpha$ ) от поверхностного слоя вакуумно-дугового покрытия TiN, осажденного на твердый сплав T5K10

покрытий TiN составляет  $H \approx 29$  ГПа.

Значения нагрузки полного отслаивания  $L_{сз}$  покрытий TiN, нанесенных на различные подложки, представлены в таблице 1. Можно видеть, что значения  $L_{сз}$  для TiN-покрытий на твердых сплавах в 2.3-3.3 раз выше, чем для покрытий, сформированных на подложке из отожженной стали 9ХС.

Табл. 1. Значения нагрузки полного отслаивания  $L_{сз}$  покрытий TiN, нанесенных на различные подложки

Подложка	$L_{сз}$ , Н
9ХС	$30 \pm 1.5$
T5K10	$100 \pm 7.5$
BK10	$70 \pm 7.0$

Для понимания природы указанного различия в  $L_{сз}$  необходимо принимать во внимание, что на прочность связи покрытия с подложкой существенное влияние оказывает как образование молекулярных или химических связей между атомами контактирующих поверхностей [6], так и их напряженно-деформированное состояние. Как показано в работе [4], в процессе трения композиционного материала с тонким упрочненным слоем в подложке возникают мощные сдвиговые напряжения, которые в случае низких механических свойств подложки приводят к протеканию

в ней пластических сдвигов и к формированию растягивающих напряжений в покрытии, что способствует его растрескиванию и отслаиванию.

Наиболее вероятно протекание таких процессов в случае испытаний (скретч – тестирования) покрытия TiN, осажденного на мягкой отожженной стали 9ХС. В подложках из высокопрочных твердых сплавов T5K10 и BK10 пластические сдвиги при прохождении индентора по покрытию маловероятны, что обеспечивает существенно более высокую адгезионную прочность покрытия в указанных композициях. Наиболее высокое сопротивление отслаиванию регистрируется в случае покрытия TiN, осажденного на твердом сплаве T5K10, содержащем в своем составе карбидную фазу TiC. Поскольку фазы TiN и TiC изоморфны и способны формировать ряд непрерывных твердых растворов, а также карбонитрид  $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$ , то можно полагать, что высокое сродство между фазами TiN и TiC, содержащимися в покрытии и подложке, обеспечивает сильные межатомные связи между контактирующими поверхностями, что и приводит к наиболее высокому значению  $L_{сз}$  для TiN, осажденного на подложку из твердого сплава T5K10.

## Заключение

Исследовано влияние твердости и состава подложки на нагрузку полного отслаивания ( $L_{сз}$ ) для осажденных TiN покрытий. Установлено, что покрытия содержат фазу TiN с ГЦК решеткой (параметр  $a = 0.4240$  нм) и включения титана. Нанотвердость покрытия TiN составила  $\sim 29$  ГПа.

Показано, что максимальное значение  $L_{сз}$ , составляющее 100 Н, достигается для покрытия TiN, сформированного на подложке из твердого сплава T5K10. Для сплава BK10 нагрузка полного отслаивания составила 70 Н, а для стали 9ХС – 30 Н.

Сделано заключение, что высокие значения  $L_{сз}$  для покрытий TiN, осажденных

на твердых сплавах, связаны с высокой прочностью подложки и структурной совместимостью TiN с карбидом титана TiC, содержащимся в сплаве T5K10.

#### Библиографические ссылки

1. Андреев А.А., Саблев Л.П., Шулаев В.М., Григорьев С.Н. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. Харьков: ННЦ ХФТИ; 2005. 236 с.
2. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. Москва: Машиностроение; 2008. 311 с.
3. Holmberg K., Matthews A. Coatings Tribology. Elsevier; 2009. 576 p.
4. Кукареко В.А., Можаровский В.В., Кушнеров А.В., Марьин С.А. Износостойкость модифицированных азотом высоколегированных сталей в условиях трения без смазочного материала. *Трение и износ* 2024; 45(6): 473-485.
5. Siddiqui S.A., Favaro G., Berkes Maros M. Investigation of the Damage Mechanism of CrN and Diamond-Like Carbon Coatings on Precipitation-Hardened and Duplex-Treated X42Cr13/W Tool Steel by 3D Scratch Testing. *Journal of Materials Engineering and Performance* 2022; 31(10): 7830-7842.
6. Адамсон А.У. Физическая химия поверхностей: пер. с англ. Москва: Мир; 1979. 568 с.