

Г. Фагани<sup>1</sup>, С. М. Рабии<sup>2, \*</sup>, С. Ноуроузи<sup>2</sup>,  
Х. Эльмхаг<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Технологический университет им. Бабола Ноширвани,  
Инженерно-механический факультет, Баболь, Иран

<sup>2</sup>Технологический университет им. Бабола Ноширвани,  
Отдел материаловедения, Баболь, Иран

<sup>3</sup>Университет Буали-Сина, Отдел материаловедения,  
Хамедан, Иран

\*rabiee@nit.ac.ir

## **Наномасштабное многослойное тонкое покрытие, изготовленное методом катодного дугового испарения**

*Исследованы однослойные покрытия TiN и CrN, а также наноразмерные многослойные тонкие покрытия TiN/CrN, нанесенные на подложки из нержавеющей стали 420С методом катодного дугового испарения. Тест наноиндентированием показал, что твердость наноразмерного многослойного тонкого покрытия TiN/CrN была 30 ГПа, что больше, чем однослойных покрытий TiN ( $H_{TiN} = 23$  ГПа) и CrN ( $H_{CrN} = 19$  ГПа). Методы индектирования трибометром типа “шарик на диске” и по Роквеллу-С показали лучшую износостойкость при трении наноразмерного многослойного покрытия TiN/CrN и лучшую адгезионную прочность однослойного покрытия CrN по сравнению с другими исследованными образцами. Наноразмерное многослойное тонкое покрытие TiN/CrN на нержавеющей стали 420С может быть использована в трибологических системах, где требуется высокая твердость и износостойкость, а также низкий коэффициент трения.*

**Ключевые слова:** многослойное покрытие TiN/CrN, наноиндентирование, твердость, износостойкость, нержавеющая сталь 420С.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Нержавеющая сталь 420С является наиболее широко используемым материалом в медицинской и автомобильной промышленности из-за низкой стоимости и совершенной пластичности. Однако этот материал имеет недостаточные износостойкость и твердость [1], поэтому необходимо улучшать его свойства с помощью защитных покрытий, имеющих соответствующие механические и трибологические свойства. Срок службы и износостойкость различных инструментов и промышленных деталей могут быть улучшены за счет осаждения твердого тонкого покрытия на поверхности [2]. Тонкие износостойкие твердые покрытия, как правило, наносят с использованием способа напыления конденсацией из газовой фазы (physical vapour deposition – PVD) [3, 4]. Катодное дуговое испарение (КДИ) – это эффективный метод PVD для создания тонких покрытий, обладающий высокой скоростью осаждения. С другой стороны, покрытия, осажденные с помощью этого метода, плотные и имеют высокую адгезию к подложке [5, 6]. Покрытия из

TiN и CrN – два покрытия, которые используются в промышленности из-за высокой твердости, хорошего износа и коррозионной стойкости. Однако исследования этих двух материалов, проведенные в [7–11], показали, что твердость и износостойкость этих покрытий могут быть увеличены. Одним из лучших способов для достижения этой цели является изготовление многослойных покрытий – новой группы современных покрытий с оптимальными износостойкостью и твердостью [12]. Наномасштабные многослойные покрытия состоят из чередующихся слоев двух или более различных материалов с разнородными физическими и механическими свойствами, которые осаждаются друг на друга, а двухслойный период находится в нанометровом диапазоне [13, 14]. Было доказано, что многослойные покрытия обладают лучшими механическими и трибологическими свойствами, чем однослойные покрытия. Основным преимуществом такой последовательности является увеличение вязкости разрушения, при этом твердость сохраняется. Мягкие металлические слои действуют как барьеры для распространения трещин. Еще одно преимущество – это снятие внутренних напряжений, что повышает прочность сцепления [15–17]. Основная цель этой работы – выбор жесткого и износостойкого покрытия на нержавеющую сталь 420С для увеличения срока службы упомянутого сплава путем сравнения твердости и трибологических характеристик наноразмерных многослойных TiN/CrN покрытий с однослойными TiN и CrN покрытиями.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

### Приготовления образцов

Нержавеющая сталь 420С толщиной 3 мм была выбрана в качестве основного металла. Искровой оптико-эмиссионный спектрометр подтвердил химический состав этого сплава (табл. 1).

**Таблица 1. Химический состав испытываемой нержавеющей стали 420С**

Элементы	C	Mn (max)	P (max)	S (max)	Si (max)	Cr	Ni (max)	Fe
Состав, % (по массе)	0,45	0,31	0,018	0,003	0,61	14,3	0,33	Остаток

Сначала происходило поверхностное упрочнение (аустенизация) образца нержавеющей стали в соляной печи при 1037 °С и закаливание в теплом масле. Затем образец выдерживали при 150 °С в течение 20 мин для снятия остаточных напряжений. Далее образец разрезали на меньшие образцы размером 40×60 мм и с помощью супер сверла сверху каждого образца высверливали отверстие диаметром 2 мм для того, чтобы подвесить их в системе КДИ. Образцы подвергали поверхностной шлифовке и зеркальной полировке до средней шероховатости  $Ra \approx 0,05$  мкм. Пассивацию поверхности осуществляли электрогидравлическим методом полировки, а затем образцы мыли моющим средством. Твердость подложки составляла 52Rc.

### Процесс осаждения

Перед началом процесса осаждения непокрытые образцы очищали ультразвуком в растворах ацетона и этанола в течение 30 мин. Затем закрепляли их в держателях, подвергали травлению и предварительному нагреву в плазме Ag тлеющего разряда в течение 15 мин, чтобы очистить от большого за-

грязнения поверхности и повысить адгезию покрытия на подложке. Рабочее давление в системе осаждения поддерживали на уровне  $10^{-3}$  Торр. Для нанесения многослойного покрытия TiN/CrN в один этап использовали специальную модель системы КДИ. Металлические мишени Ti и Cr высокой (99,99 %) чистоты были смонтированы на противоположных вертикальных катодах. Газообразный азот подавали в камеру, источник переменного тока, соединенный с держателями подложки, использовали в качестве выходного сигнала смещения, зафиксированного на  $-100$  В во время процесса осаждения. Температура подложки составляла  $200$  °С. Подложка из нержавеющей стали вращалась перед мишенями на расстоянии  $150$  мм. Для улучшения адгезии, ударной вязкости и снижения коэффициента трения нанесли нанометрический слой Ti и Cr между однослойными покрытиями TiN и CrN соответственно и подложкой. В многослойном покрытии TiN/CrN, поскольку первым слоем был TiN, наносили межслойный Ti. Для формирования однослойных покрытий TiN или CrN активировали одну из мишеней Ti или Cr, а затем в камеру вводили газообразный азот. Для осаждения многослойного TiN/CrN покрытия мишени Ti и Cr периодически покрывали стальной переборкой. Общее время осаждения для всех образцов было  $90$  мин, общая толщина составляла  $\sim 1,5$  мкм. Параметры осаждения приводятся в табл. 2.

**Таблица 2. Параметры осаждения покрытий**

Параметры	Однослойное	Однослойное	Многослойное
	TiN	CrN	TiN/CrN
Рабочее давление, Торр	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$
Ток мишени, А	100	100	100
Время осаждения, мин	90	90	90
Температура подложки, °С	200	200	200
Рабочий цикл, %	50	50	50
Напряжение смещения, В	$-100$	$-100$	$-100$

После завершения процесса нанесения покрытия, образцы должны оставаться в камере в течение  $30$  мин, чтобы предотвратить быстрое охлаждение покрытий. Наконец, образцы без покрытия и с покрытием были разрезаны на проволочно-вырезном станке до размеров  $10 \times 10$  мм и  $20 \times 20$  мм для микроструктурных и механических испытаний.

### Характеристика покрытий

Фазовый состав образцов определяли с помощью рентгеновского дифрактометра JEOL JDX-8030 с ускоряющим напряжением  $30$  кВ, током  $20$  мА и с использованием  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ) излучения. Морфологию поверхности и поперечного сечения, а также толщину покрытий анализировали с помощью сканирующего электронного микроскопа FESEM (модели TESCAN Mira3), который был снабжен картой и детектором энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Нанотвердость и модуль упругости покрытий измеряли с помощью наномеханического испытательного прибора Hysitron Inc. TriboScope® с 2D-датчиком, укомплектованным программным обеспечением и индентором в виде вершины куба или стандартным алмазным индентором Берковича после надлежащей калибровки в соответствии с руководством пользователя TriboScope. Площадь сканирования поверхности для наноиндентирования со-

ставляла  $5 \times 5$  мкм, а приложенная нагрузка – 8 мН. Диапазон времени начала нагружения, постоянного нагружения и разгружения составлял 15 с. Длина хода наноцарапания, на которой нагрузка линейно увеличивалась от 0 до 6 мН (линейная нагрузка), составляла 4 мкм, а глубина проникновения составляла 360 нм. В указанном выше испытании площадь сканирования поверхности составляла  $7 \times 7$  мкм, а приложенная нагрузка была равна 6 мН. Специальное программное обеспечение использовало полученные данные о нагрузке и перемещении для расчета твердости и модуля упругости на основе модели Оливера и Фарра [3].

Термин адгезии относится к взаимодействию между тесно соприкасающимися поверхностями смежных тел, т. е. между пленкой и подложкой. Адгезия обусловлена межмолекулярными взаимодействиями в поверхностном слое, при которых две поверхности удерживаются вместе валентными силами или механическим сцеплением. Адгезия пленки к подложке, безусловно, является важным свойством, необходимым для создания покрытий с заданными свойствами [18]. Адгезионную прочность покрытий оценивали по методу Роквелла-С с помощью твердомера Instron Wolpert Macro.

Скорость износа и коэффициент трения не являются характеристиками материала, но они демонстрируют отклик трибосистемы. Износостойкость покрытий исследовали с использованием трибометра типа “шарик на диске” с шариком  $Al_2O_3$  диаметром 4 мм и приложенной нагрузкой 10 Н, скорость скольжения была  $10 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ , расстояние скольжения – 300 м и влажность – 35 %. Во время теста силы трения измеряли с помощью датчика. Данные динамически передавались на компьютер и автоматически были преобразованы в коэффициент трения с помощью программного обеспечения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Структурный анализ

После подготовки однослойных TiN и CrN и многослойного TiN/CrN покрытий был сделан структурный анализ образцов. На рис. 1 представлены рентгенограммы образцов. Кристаллические плоскости фазы TiN на основе ICSD 00-006-0642 состоят из плоскостей (111), (200), (220), (311) и (222), а для фазы CrN на основе ICSD 01-076-2494 – из (111), (200) и (311), которые наблюдали на рентгенограммах однослойных TiN, CrN и многослойных TiN/CrN покрытиях. Можно сделать вывод о том, что многослойные покрытия состоят из однослойных TiN и CrN фаз. Из-за малой толщины покрытий острота пиков слабо выражена.

На рис. 2 показаны поверхностные FESEM-изображения образцов с покрытием, на которых видны макрочастицы и точечные дефекты. Эти особенности обусловлены особенностями метода КДИ, который может влиять на износостойкость покрытий. Количество макрочастиц, образованных на поверхностях TiN и TiN/CrN, намного больше, чем на покрытии CrN. Это может быть связано с быстрым плавлением материала мишени дугой во время процесса КДИ. Исследователи предположили, что точки плавления и кипения материалов мишени являются существенными факторами, влияющими на количество и размер макрочастиц [2].

Анализ поверхности многослойного покрытия TiN/CrN приведен на рис. 3, который показывает, что дисперсия элементов N, Cr, Ti и Fe на поверхности является однородной. ЭДС-анализ десяти выбранных точек на поверхности многослойного тонкого покрытия наноразмерного TiN/CrN показан на рис. 4. Количественные результаты этого анализа приведены в табл. 3.

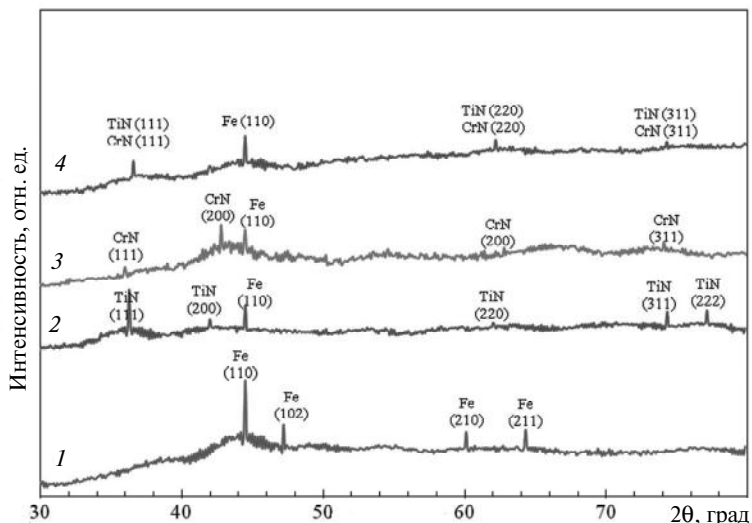


Рис. 1. Рентгенограммы образцов из нержавеющей стали (1), TiN (2), CrN (3), TiN/CrN (4).

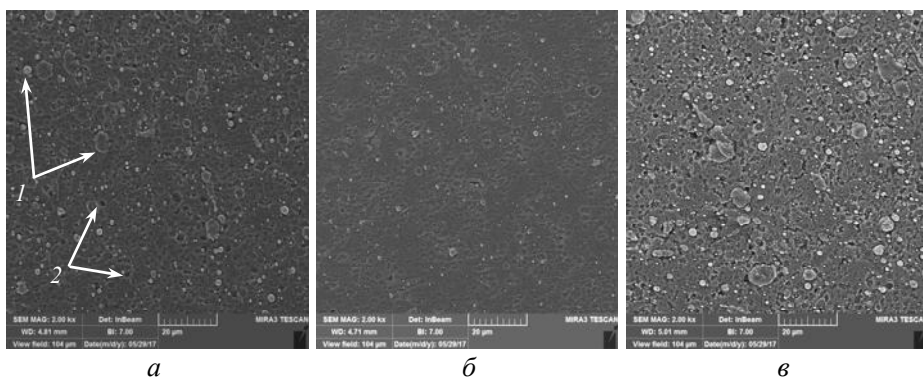


Рис. 2. Поверхностные FESEM-изображения образцов с покрытием: однослойным TiN (а) и CrN (б), многослойным TiN/CrN (в); 1 – макрочастицы; 2 – точечные дефекты.

Изображения FESEM в поперечном сечении образцов с покрытием показаны на рис. 5. Согласно этим изображениям все покрытия имеют одинаковую толщину  $\sim 1,5$  мкм. Изображения поперечного сечения многослойного покрытия TiN/CrN с различным увеличением показаны на рис. 6, что подтверждает образование плотной и однородной структуры с четкой границей раздела между слоями даже при меньших увеличениях. Темные и светлые слои относятся к TiN и CrN соответственно. Многослойное покрытие TiN/CrN состоит из 15 слоев с периодом 100 нм. Анализ профиля многослойного покрытия TiN/CrN был сделан методом линейного сканирования (рис. 7). Сканирование в направлении от подложки до верха уровня покрытия в пределах 1,63 мкм в 30 точках показало равномерное распределение N, Cr, Ti и Fe по толщине покрытия. Этот метод является еще одним основанием для проверки формирования многослойной структуры. В табл. 4 приведены средние результаты анализа линейного сканирования поперечного сечения наноразмерных многослойных покрытий TiN/CrN, которые показывают средний атомный вес и процентное содержание основных элементов в этом покрытии.

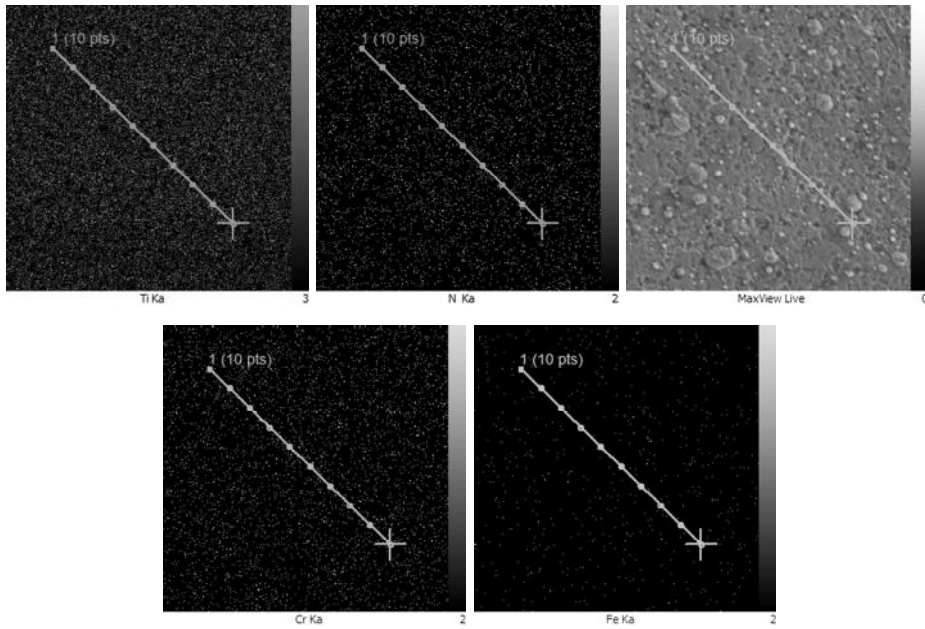


Рис. 3. Анализ поверхности наноразмерного многослойного тонкого покрытия TiN/CrN.

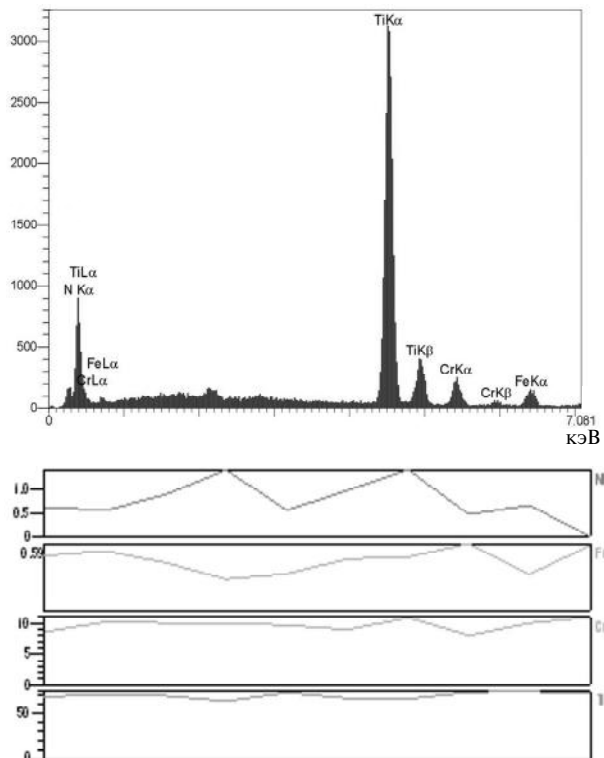


Рис. 4. ЭДС-анализ поверхности наноразмерного многослойного тонкого покрытия TiN/CrN.

**Таблица 3. Поверхностный ЭДС-анализ наноразмерного многослойного тонкого покрытия TiN/CrN**

Elт	Line	Int	Error	K	Kr	W, %	A, %	ZAF	Pk/Bg	Class	LConf	HConf
N	Ka	151,0	18,97	0,256	0,22	30,51	60,48	0,7223	23,65	A	29,32	31,70
Ti	Ka	1115,2	1,29	0,625	0,54	57,68	33,43	0,9313	80,78	A	56,85	58,51
Cr	Ka	78,9	1,29	0,059	0,051	6,02	3,21	0,8509	9,17	A	5,69	6,34
Fe	Ka	53,3	1,29	0,058	0,05	5,79	2,88	0,8620	7,51	A	5,41	6,17
				1,000	0,86	100,00	100,00					

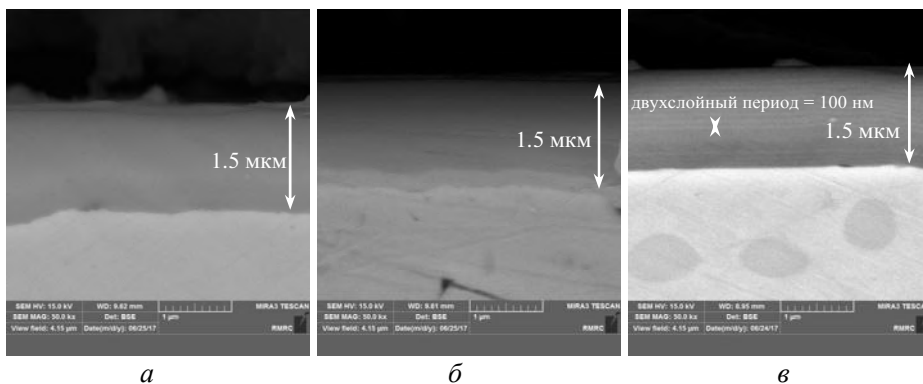


Рис. 5. Поперечное сечение FESEM-изображений образцов с однослойным TiN (а), CrN (б) и многослойным TiN/CrN (в) покрытием.

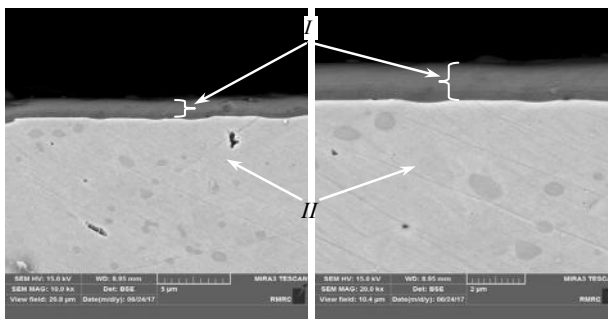


Рис. 6. FESEM-изображения в разрезе многослойного покрытия TiN/CrN с различным увеличением: I – покрытие; II – подложка.

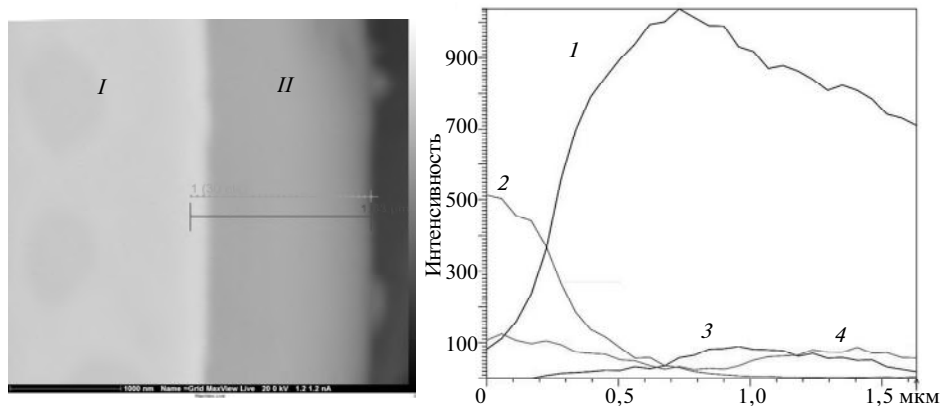


Рис. 7. Анализ методом поперечного сечения наноразмерного многослойного тонкого покрытия TiN/CrN: подложка (I), покрытие (II), Ti (1), Fe (2), N (3), Cr (4).

**Таблица 4. Линейный сканирующий анализ наноразмерного многослойного тонкого покрытия TiN/CrN**

Elт	Line	Int	Error	K	Kr	W, %	A, %	ZAF
N	Ka	41,4	3,5490	0,1063	0,0961	13,56	32,66	0,6612
Ti	Ka	747,0	0,6156	0,6403	0,5873	60,55	45,35	0,9830
Cr	Ka	65,5	0,6156	0,0762	0,0714	7,71	5,91	0,9084
Fe	Ka	111,8	0,6156	0,1773	0,1736	18,17	16,08	0,9019
				1,0000	0,9283	100,00	100,00	

### Наномеханические свойства – твердость и модуль упругости

И твердость, и модуль упругости измеряли с помощью теста наноиндентирования, потому что многие исследователи полагают, что улучшение трибологических свойств покрытий зависит от модификации этих двух механических параметров.

Данные наноиндентирования показывают, что значения твердости наноразмерного многослойного тонкого покрытия многослойной тонкой пленки TiN/CrN составляют 30 ГПа, что значительно выше, чем у однослойных покрытий TiN и CrN (23 и 19 ГПа соответственно). На рис. 8 приведены кривые зависимости силы от перемещения. Твердость определяет глубину проникновения стандартного индентора Берковича внутрь покрытия. Для самого мягкого покрытия (однослойного CrN) максимальная глубина вдавливания была равна 150 нм, что составляет приблизительно 1/10 толщины покрытия. Для самого твердого покрытия (многослойного TiN/CrN) максимальная глубина вдавливания составляла всего 120 нм, а для покрытия TiN эта величина равнялась 140 нм.

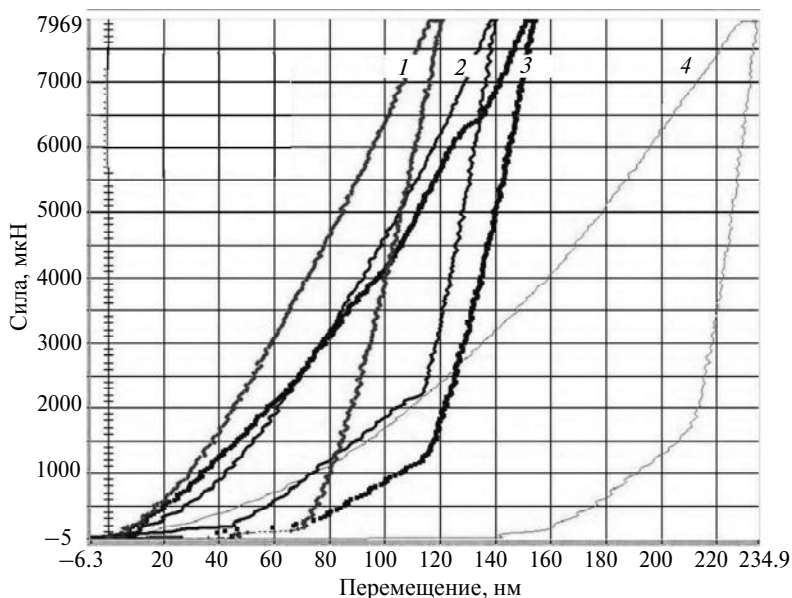


Рис. 8. Кривые нагрузки и перемещения образцов при наноиндентировании: TiN/CrN (1), TiN (2), CrN (3), нержавеющая сталь (4).

В табл. 5 представлены наномеханические свойства образцов, измеренные методом наноиндентирования. Измерение модуля упругости оказывает силь-



ное влияние на расслаивание, отрыв и разрушение покрытий, а также на состояние остаточного напряжения внутри покрытий [4]. Наибольшее значение модуля упругости было у наноразмерного многослойного покрытия TiN/CrN. У однослойных покрытий TiN и CrN и нержавеющей стали без покрытия были более низкие значения модуля упругости. Одним из наиболее важных аргументов, объясняющих очень высокую твердость многослойного покрытия TiN/CrN по сравнению с однослойными покрытиями TiN и CrN, является ограниченное движение дислокаций между слоями. Разница в энергии линии дислокации между двумя слоями, которая соответствует разнице в модуле упругого сдвига двух материалов, обеспечивает барьер для движения дислокации через границу. Энергия, необходимая для перемещения дислокации через границу, зависит от толщины слоев. Узкая или острая граница требует больше энергии, чем диффузная граница. Таким образом, она предопределяет пик твердости, когда существует разница в модуле сдвига между двумя слоями материалов и резкая граница раздела между слоями [19].

**Таблица 5. Механические свойства образцов**

Образец	Модуль упругости, ГПа	Твердость, ГПа
Без покрытия	199±10	6±1
TiN	340 ±20	23±2
CrN	260±15	19±1
TiN/CrN	415±30	30±3

Из-за очень низкой (200 °С) температуры процесса нанесения покрытий взаимная диффузия между TiN и CrN может быть проигнорирована, следовательно, единственным фактором, который определяет природу границ раздела, является шероховатость поверхности. Результаты теста наноиндентирования в настоящем исследовании были очень похожи на результаты некоторых авторов [2–5, 13, 14]. Увеличение твердости и модуля упругости, наблюдаемое для покрытия TiN/CrN, согласуется с большинством литературных данных, показывающих, что, несмотря на различия, которые существуют в различных процессах КДИ, может быть полезным использование комбинации наноструктурированных многослойных слоев.

### Адгезия покрытия

Выполняя испытания на индентирование по Роквеллу-С, можно добиться приемлемости адгезии покрытия [13]. Адгезионную прочность покрытий измеряли методом Роквелла-С под нагрузкой 150 кгс. Схема процедуры испытания показана на рис. 9. Сферический индентор проникает внутрь покрытия, и картина разрушения определяет, является ли покрытие приемлемым.

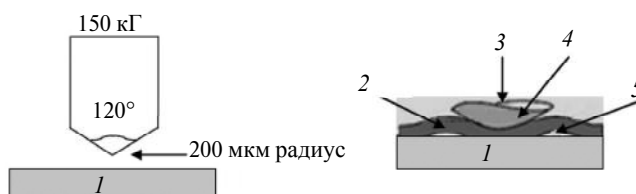


Рис. 9. Схема метода испытаний по Rockwell-C, использованного в настоящем исследовании: 1 – подложка; 2 – покрытие; 3 – приложенная нагрузка; 4 – индентор; 5 – межфазное расслоение.

Изображения покрытий, полученное с помощью оптической микроскопии при испытании по Роквеллу-С, показаны на рис. 10. Как видно, однослойное покрытие CrN имеет меньшее повреждение межслоевого расслоения по сравнению с другими образцами. Однослойные TiN и многослойные TiN/CrN тонкие покрытия ведут себя одинаково при испытании по Роквеллу-С. Сравнивая эти изображения со стандартными, можно сказать, что все покрытия имеют приемлемую адгезию к подложке. Меньшее повреждение поверхности покрытия CrN может быть связано с наличием толстого и плотного межслойного Cr между этим покрытием и подложкой и низким напряжением в межслойном CrN/Cr.

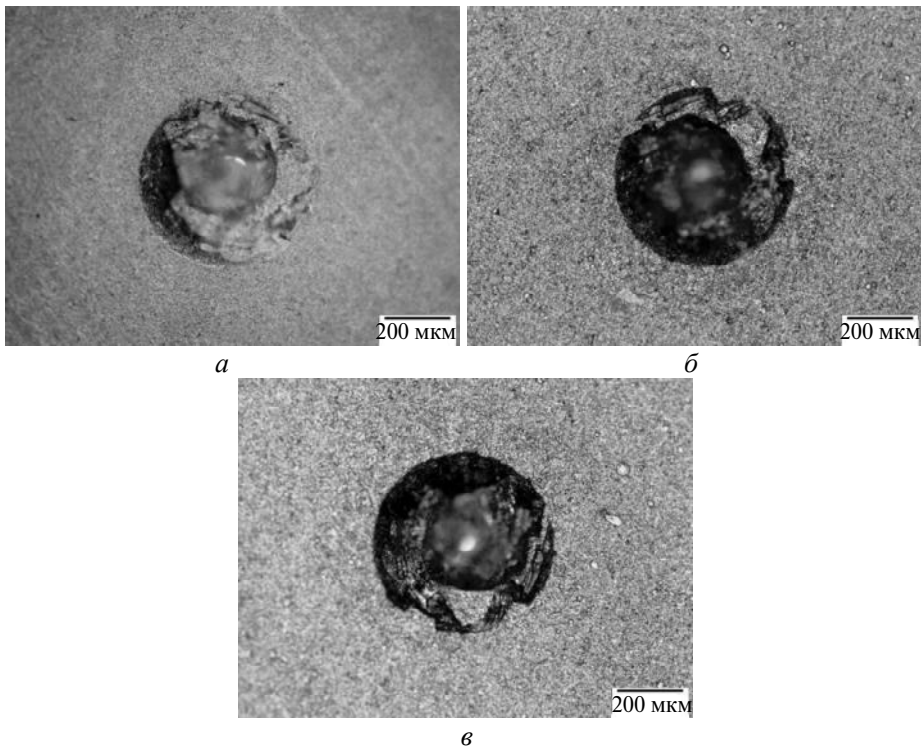


Рис. 10. Изображение образцов с покрытием, полученное с помощью оптической микроскопии при испытании по Роквеллу-С: однослойные TiN (а), CrN (б) и многослойное TiN/CrN (в) покрытия.

### Характеристика износа

Трибометр типа “шарик на диске” использовали для оценки скорости износа образцов, которая контролируется его программным обеспечением для ПК при измерении коэффициента трения. Шарик  $Al_2O_3$  с твердостью 65Rc нагружали против направления вращения образца в виде диска по круговой траектории радиусом 1 см при нормальной нагрузке 10 Н и влажности 35 % при комнатной температуре со скоростью скольжения 0,1 м/с. Для расчета скорости износа образцов было использовано уравнение

$$K = \frac{M}{SF},$$

где  $M$  – масса уменьшения веса, мкг;  $S$  – общее расстояние скольжения, см;  $F$  – сила, Н. Как видно на рис. 11, многослойное покрытие TiN/CrN имеет мак-

симальное, а нержавеющая сталь без покрытия – минимальное сопротивление износу. Основной причиной лучшего сопротивления износостойкости наноразмерного многослойного тонкого покрытия TiN/CrN являются более высокая твердость и меньшая шероховатость поверхности, которые могут вызвать меньшее взаимодействие с абразивным штифтом в испытании на износ.

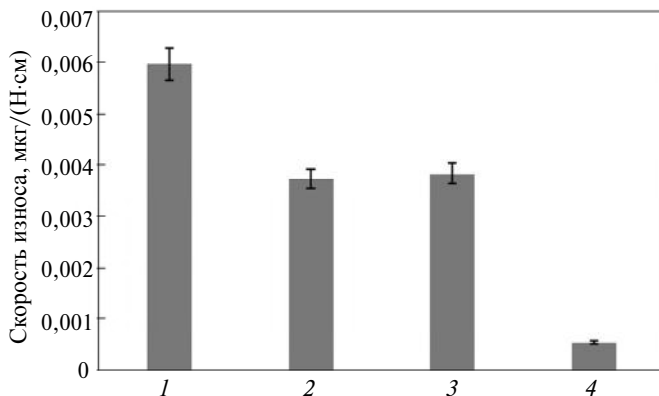


Рис. 11. Значения скорости износа образцов нержавеющей стали без покрытия (1), с покрытием CrN (2), TiN (3), TiN/CrN (4).

На рис. 12 показана зависимость коэффициента трения от расстояния скольжения для разных образцов. Как видно, у нержавеющей стали без покрытия был минимальный коэффициент трения. В образцах с покрытием, как правило, с увеличением расстояния скольжения коэффициент трения растет незначительно. Среди образцов с покрытием самый низкий (0,3–0,4) коэффициент трения был у многослойного образца TiN/CrN и его вариации были меньше, чем у других образцов во время испытания на износ. Однослойный образец TiN имел самый высокий коэффициент трения в диапазоне 0,4–0,6. Этот параметр для однослойного образца CrN также составлял ~ 0,4.

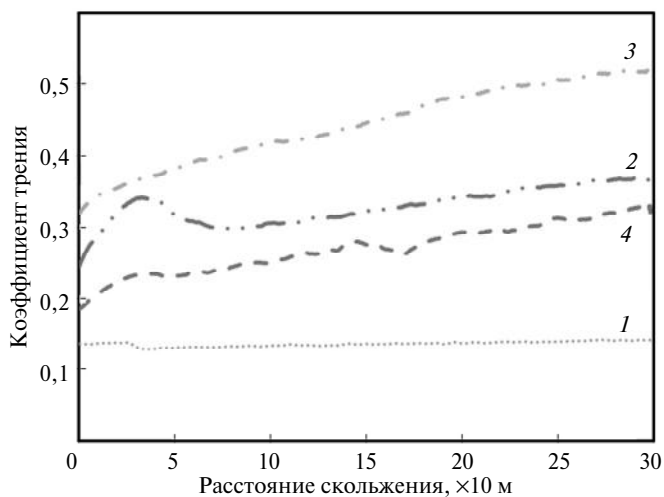


Рис. 12. Зависимость коэффициента трения образцов от расстояния скольжения: нержавеющая сталь без покрытия (1), с покрытием CrN (2), TiN (3), TiN/CrN (4).

Основной причиной снижения коэффициента трения является наличие слоев смазочного оксида. Если приложенная нагрузка была небольшой, а окисление металла происходило самопроизвольно, скорость износа оставалась относительно низкой [20]. Действительно, износ снижает прочность на сдвиг поверхности оксид–металл, а оксидный слой действует как смазка, которая может вызывать снижение коэффициента трения и создавать умеренный износ. Умеренный износ – особенность сухих скользящих материалов. В скользящих поверхностях защитный оксид действует как сухая смазка. Разница в образующемся оксидном слое обусловлена различием в стойкости образцов к окислению.

Характеристики износа и трения этих образцов хорошо объясняются влиянием шероховатости, твердости, пластичности, оксидной пленки, реакционного слоя и переноса. Лучшее управление износом возможно за счет лучшего сочетания характеристик [21]. Однако это также показывает, что адгезия покрытия к подложке положительно влияет на износостойкость. Это противоречит утверждению Mercado-Solis и др. [10]. Хотя однослойный TiN был более твердым, чем покрытие CrN, но из-за более высокого значения коэффициента трения и меньшей адгезии покрытия износостойкость однослойного CrN была немного выше, чем однослойного TiN. В конечном счете, нержавеющая сталь без покрытия из-за отсутствия оксидного слоя и хорошей шероховатости имеет минимальный коэффициент трения, но из-за слабости влияния твердости и пластичности, измеренных в настоящем исследовании, его износостойкость по сравнению с другими образцами была ниже.

## ВЫВОДЫ

Исследование наноразмерного многослойного тонкого покрытия TiN/CrN, нанесенного на подложки из нержавеющей стали 420C с использованием КДИ в полупромышленной PVD-системе и сравнение ее микроструктурных и механических свойств со свойствами однослойных покрытий TiN и CrN позволило сделать следующие выводы.

Из-за сходства свойств TiN и CrN предотвращается несоответствие профилей в многослойной структуре TiN/CrN и, таким образом, снижается рост трещин, вследствие чего улучшаются механические свойства покрытия.

Наноразмерное многослойное тонкое покрытие TiN/CrN имело наибольшую (30 ГПа) твердость по сравнению с однослойными покрытиями TiN и CrN из-за диффузионной способности кристаллических дефектов, наноразмерной толщины слоев и послойной устойчивости от проникновения разрушения внутрь.

Из-за очень низкой температуры процесса нанесения покрытия взаимная диффузия между однослойными покрытиями TiN и CrN и шероховатость поверхности были единственными факторами, определяющими характер поверхностей раздела.

Наноразмерное многослойное тонкое покрытие TiN/CrN имело минимальный коэффициент трения в диапазоне 0,3–0,4 и максимальную износостойкость по сравнению с другими исследованными образцами с покрытием. Хотя нержавеющая сталь без покрытия имела минимальный коэффициент трения, но из-за слабого влияния твердости и пластичности, измеренных в настоящем исследовании, ее износостойкость по сравнению с образцами с покрытием была самой низкой.

Г. Фагані<sup>1</sup>, С. М. Рабіє<sup>2, \*</sup>, С. Ноуроузі<sup>2</sup>, Х. Ельмхаг<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Технологічний університет ім. Бабола Ношірвані,  
Інженерно-механічний факультет, Баболь, Іран

<sup>2</sup>Технологічний університет ім. Бабола Ношірвані,  
Відділ матеріалознавства, Баболь, Іран

<sup>3</sup>Університет Буалі-Сіна, Відділ матеріалознавства,  
Хамедан, Іран

Наномасштабне багат шарове тонке покриття,  
виготовлене методом катодного дугового випаровування

*Досліджено одношарові покриття TiN і CrN, а також нанорозмірні багат шарові тонкі покриття TiN/CrN, нанесені на підкладки з нержавіючої сталі 420С методом катодного дугового випаровування. Тест наноіндентуванням показав, що твердість нанорозмірного багат шарового тонкого покриття TiN/CrN була 30 ГПа, що більше, ніж одношарових покриттів TiN ( $H_{TiN} = 23$  ГПа) і CrN ( $H_{CrN} = 19$  ГПа). Методи індентування трибометром типу "кулька на диску" і по Роквеллу-С показали кращу зносостійкість при терті нанорозмірного багат шарового покриття TiN/CrN і кращу адгезійну міцність одношарового покриття CrN в порівнянні з іншими дослідженими зразками. Нанорозмірне багат шарове тонке покриття TiN/CrN на нержавіючій сталі 420С може бути використане в трибологічних системах, де потрібна висока твердість і зносостійкість, а також низький коефіцієнт тертя.*

**Ключові слова:** багат шарове покриття TiN/CrN, наноіндентування, твердість, зносостійкість, нержавіюча сталь 420С

G. Faghani<sup>1</sup>, S. Ma. Rabiee<sup>2, \*</sup>, S. Nourouzi<sup>2</sup>, H. Elmkhah<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering,  
Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

<sup>2</sup>Department of Material Engineering,  
Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

<sup>3</sup>Department of Materials Engineering, Bu-Ali Sina University,  
Hamedan, Iran

Nanoscale multi-layer coating fabricated by a cathodic arc  
evaporation

*In the present study, TiN- and CrN single-layer and TiN/CrN nanoscale multi-layer coatings have been deposited on 420C stainless steel (SS) substrate using cathodic arc evaporation (CAE) method. The nanoindentation test showed that hardness of TiN/CrN nanoscale multi-layer coating was 30 GPa that is harder than TiN ( $H_{TiN} = 23$  GPa) and CrN ( $H_{CrN} = 19$  GPa). Ball-on-disk tribometer and Rockwell-C indentation methods showed respectively better sliding wear performance for TiN/CrN nanoscale multi-layer coating and better adhesion strength for CrN single-layer coating in comparison to all samples. Finally it was found that the TiN/CrN nanoscale multi-layer coating can be used for tribological applications on 420C SS where high hardness and wear resistance and low friction coefficients are essential.*

**Keywords:** TiN/CrN multi-layer, nanoindentation, hardness, wear, 420C stainless steel

1. Scheuer C.J., Cardoso R.P., Zanetti F.I. Low-temperature plasma carburizing of AISI 420 martensitic stainless steel: Influence of gas mixture and gas flow rate. *Surf. Coat. Technol.* 2012. Vol. 206. P. 5085–5090.
2. Akbarzadeh M., Shafyei A., Salimijazi H.R. Characterization of TiN, CrN and (Ti, Cr) N coatings deposited by cathodic ARC evaporation. *Inter. J. Eng.* 2014. Vol. 27, no. 7. P. 1127–1132.
3. Fukui H. Evolutional history of coating technologies for cemented carbide inserts – chemical vapor deposition and physical vapor deposition, *Sci Technical Review*. 2016. No. 82. P. 39–45.

4. Lin S., Zhou K., Dai M. Effects of surface roughness of substrate on properties of Ti/TiN/Zr/ZrN multilayer coatings. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2015. Vol. 2, P. 451–456.
5. Mendibide C., Steyer P., Fontaine J., Goudeau P. Improvement of the tribological behaviour of PVD nanostratified TiN/CrN coatings – An explanation. *Surf. Coat. Technol.* 2006. Vol. 201. P. 4119–4124.
6. Thamotharan J., Sarala R. Characterization of CrN/TiN PVD coatings on 316L stainless steel. *Inter. J. Chem. Tech. Resh.* 2014. Vol. 6, no. 6. P. 3284–3286.
7. Ormanova M., Dechev D., Bezdushnyi R., Petrov P. Phase composition of multilayer system TiN/CrN deposited by DC magnetron sputtering, *Bulg. Chem. Commun.*, 2017. Vol. 49. P. 98–102.
8. Lackner J.M., Waldhauser W., Major L. Nanocrystalline Cr/CrN and Ti/TiN multilayer coatings produced by pulsed laser deposition at room temperature, *Bull Pol Acad Sci Tech Sci*. 2006. Vol. 54, no. 2. P. 175–180.
9. Cao J.L., Choy K.L., Sun H.L. Syntheses of nano-multilayered TiN/TiSiN and CrN/CrSiN hard coatings. *J. Coat. Technol. Res.* 2011. Vol. 8. P. 283–288.
10. Mercado-Solis R.D., Mata-Maldonado J.G., Quinones-Salinas M.A. Micro-scale abrasive wear testing of CrN duplex PVD coating on pre-nitrided tool steel. *Mater. Res.* 2017. Vol. 20. P. 1092–1102.
11. Podchernyaeva I.A., Yurechko D.V., Panashenko V.M. Some trends in the development of wear-resistant functional coatings. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2013. Vol. 52. P. 176–188.
12. Han B., Wang Z., Devi N. RBS depth profiling analysis of (Ti, Al)N/MoN and CrN/MoN multilayers, *Nanoscale Res. Lett.* 2017. Vol. 12. P. 161–169.
13. Bhushan B. Depth-sensing nanoindentation measurement techniques and applications. *Microsyst Technol.* 2017. Vol. 23. P. 1595–1649.
14. Lackner J., Major L., Kot M. Microscale interpretation of tribological phenomena in Ti/TiN soft-hard multilayer coatings on soft austenite steel substrates. *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.* 2011. Vol. 59. P. 343–355.
15. Bei G.P., Gautheir-Brunet V., Tromas C. Synthesis, characterization, and intrinsic hardness of layered nanolaminate  $Ti_3AlC_2$  and  $Ti_3Al_{0.8}Sn_{0.2}C_2$  solid solution. *J. Am. Ceram. Soc.* 2012, Vol. 95. P. 102–107.
16. Sui X., Liu J., Zhang S. Microstructure, mechanical and tribological characterization of CrN/DLC/Cr-DLC multilayer coating with improved adhesive wear resistance. *Appl. Surf. Sci.* 2018. Vol. 439. P. 24–32.
17. Wang, J., Zhou Y. Recent progress in theoretical prediction, preparation, and characterization of layered ternary transition-metal carbides. *Annu. Rev. Mater. Res.* 2009. Vol. 39. P. 415–443.
18. Twu M.J., Hu C.C., Liu D.W. Effects of TiN, CrN and TiAlN coatings using reactive sputtering on the fatigue behaviour of AA2024 and medium carbon steel specimens. *J. Exp. Nanosci.* 2016. Vol. 11. P. 581–592.
19. Araujo J.A., Souza R.M., Lima N.B. Thick CrN/NbN multilayer coating deposited by cathodic arc technique. *Mater. Res.* 2017. Vol. 20. P. 200–209.
20. Cai L., Huang Z., Hu W. Fabrication, mechanical properties, and tribological behaviors of  $Ti_2AlC$  and  $Ti_2AlSn_{0.2}C$  solid solutions. *J. Adv. Ceram.* 2017. Vol. 6. P. 90–99.
21. Kato K. Wear in relation to friction – a review. *Wear.* 2000. Vol. 241. P. 151–157.

Поступила в редакцию 05.11.18

После доработки 11.03.19

Принята к публикации 27.03.19