

КОНДЕНСАЦИЯ ЛАНГАН КҮЙДІҢ ФИЗИКАСЫ ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 538.95.405

С.А.Гученко, В.Ч.Лауринас, О.Н.Завацкая, В.М.Юров

*Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова
(E-mail: guchen@mail.ru)*

Влияние азотирования на механические свойства многофазных покрытий

В статье при нанесении покрытий использовались композиционные катоды, полученные методом индукционного плавления. Количественный анализ элементного состава композиционных катодов проводился на электронном микроскопе JEOL JSM-5910. Для измерения микротвердости применялся микротвердомер HVS-1000A. Микроструктура покрытий до и после азотирования исследовалась на оптическом металлографическом микроскопе «Эпиквант». Отмечено, что азотирование приводит к образованию нитридных фаз, которые обуславливают изменение структуры покрытия и его физико-механических свойств. Показана роль азотирования в упрочнении ионно-плазменных покрытий. Особое значение при этом приобретают высокоэнтропийные покрытия.

Ключевые слова: азотирование, плазма, покрытие, микротвердость, структура, коэффициент трения, фазовый состав.

Введение

Для повышения эксплуатационных свойств деталей механизмов и машин применяют специальные стали и сплавы, объем мирового производства которых неуклонно падает. Это связано как с высокой их стоимостью, так и с разработкой новых технологий, позволяющих повысить твердость, износостойкость и другие свойства деталей из более дешевых сортов стали.

К таким технологиям относятся методы химико-термической обработки деталей и нанесение на них специальных покрытий. Одним из методов химико-термической обработки стальных деталей является метод ионно-плазменного азотирования. В последние годы этот метод активно исследуется как теоретически, так и экспериментально [1–5]. Создан ряд промышленных установок ионно-плазменного азотирования в разных странах [6].

Объекты и методика эксперимента

В настоящей работе при нанесении покрытий использовались композиционные катоды, полученные методом индукционного плавления. Количественный анализ элементного состава композиционных катодов проводился на электронном микроскопе JEOL JSM-5910, данные анализа приведены в таблице 1. Концентрации элементов определены с использованием аналитических сигналов Al K_{α} , Si K_{α} , Cr K_{α} , Mn K_{α} , Fe K_{α} , Cu K_{α} , имеющих максимальные интенсивности.

Для измерения микротвердости нами использовался микротвердомер HVS-1000A. Данный прибор разработан с использованием последних достижений в механике, оптике, электронике и компьютерных технологиях для проведения испытаний на твердость металлических и неметаллических материалов, особо мелких деталей или тонких закаленных слоев. В результате прибор способен обеспечивать стабильными и достоверными высокоточными результатами.

Информационно-измерительная система для трибологических исследований предложена нами в [7] и состоит из двух основных компонентов: экспериментальной установки и программного обес-

печения верхнего информационного уровня. Экспериментальная установка для определения коэффициентов трения построена по принципу модульности.

Т а б л и ц а 1

Результаты расчета стехиометрии компонентов композиционных катодов

Соединения	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	Химическая формула по данным анализа
Zn–Cu–Al	1	1,34	39,6				$ZnCu_{1,34}Al_{39,6}$
Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al	1	4,32	4,64	5,26	18,39	67,85	$CrMn_{4,32}Si_{4,64}Cu_{5,26}Fe_{18,39}Al_{67,85}$
Zn–Al	1	65,45					$ZnAl_{65,45}$
Zn–Cu–Al	1	1,10	38,49				$ZnCu_{1,10}Al_{38,69}$
Mn–Fe–Cu–Al	1	10,07	17,37	47,19			$MnFe_{10,07}Cu_{17,37}Al_{47,19}$
Al–Fe	1	43,04					$AlFe_{43,04}$

Основной принцип работы установки для определения коэффициентов трения покоя и скольжения заключается в измерении силы трения покоя и скольжения небольшого исследуемого образца материала, при перемещении его по поверхности подложки из другого материала с известным коэффициентом трения. Полученные мгновенные значения силы трения передаются программному обеспечению верхнего информационного уровня для их обработки.

Микроструктура покрытий до и после азотирования исследовалась на оптическом металлографическом микроскопе «Эпиквант» с увеличением от 400 до 1000 раз.

Результаты эксперимента

Катод Ti. На модельный образец из нержавеющей стали было нанесено ионно-плазменное покрытие нитрида титана в течение 40 мин при токе испарения $I_{и} = 80$ А, опорном напряжении $U_{оп} = 200$ В и давлении газа в камере $P = 5 \times 10^{-3}$ мм рт. ст. Затем проводилось азотирование в течение 10 мин при том же давлении газа в камере. На рисунке 1 представлены снимки покрытия до и после азотирования.

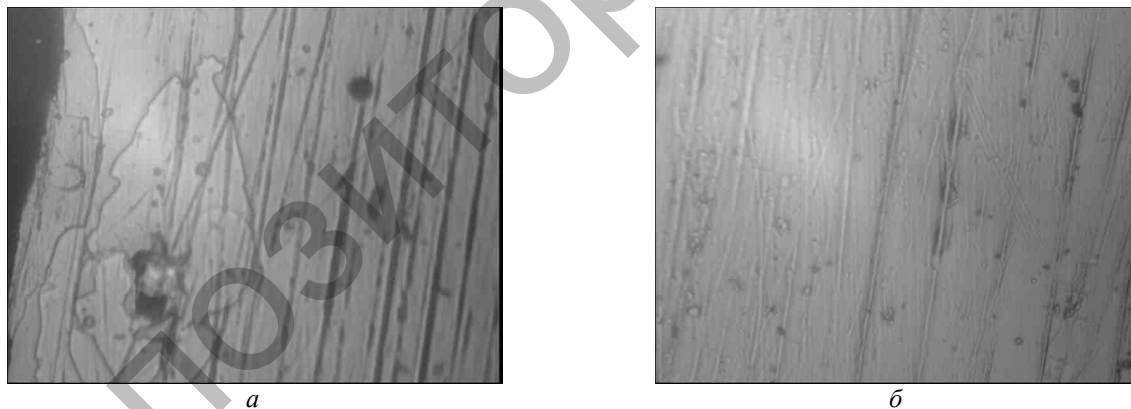


Рисунок 1. Снимки покрытия TiN до (а) и после (б) азотирования

В таблице 2 представлены результаты испытания микротвердости до и после азотирования, нагрузка испытания соответствует 0,1 кг, или 0,981 Н.

Т а б л и ц а 2

Микротвердость покрытия TiN до и после азотирования

Количество испытаний	Микротвердость покрытия TiN, МПа	
	до азотирования	после азотирования
1	2	3
1	572,8	305,9
2	527,6	344,7
3	429,9	305,2

Продолжение таблицы 2

1	2	3
4	480,1	319,9
5	426,1	304,1
6	410,0	317,0
7	450,9	293,4
8	506,1	273,4
9	484,7	265,6
Среднее	477,8	308,33

В таблице 3 представлены результаты измерения коэффициента трения.

Таблица 3

Коэффициенты трения TiN до и после азотирования

Наименование покрытия образца	Коэффициент трения покрытия TiN	
	Медная пластина	Алюминиевая пластина
Покрытие TiN до азотирования	0,508	0,434
Покрытие TiN после азотирования	0,224	0,342

Катод 12X18H10T + Ti в газовой среде аргона. На образец из нержавеющей стали послойно через каждые 10 мин в течение 40 мин было нанесено ионно-плазменное покрытие, состоящее из стали марки 12X18H10T и титана в газовой среде аргона при токе испарения $I_{и} = 80$ А, опорном напряжении $U_{оп} = 200$ В и давлении газа в камере $P = 5 \times 10^{-5}$ мм рт. ст. Затем проводилось азотирование в течение 10 мин при давлении газа в камере $P = 5 \times 10^{-3}$ мм рт. ст. На рисунке 2 представлены снимки покрытия до и после азотирования.

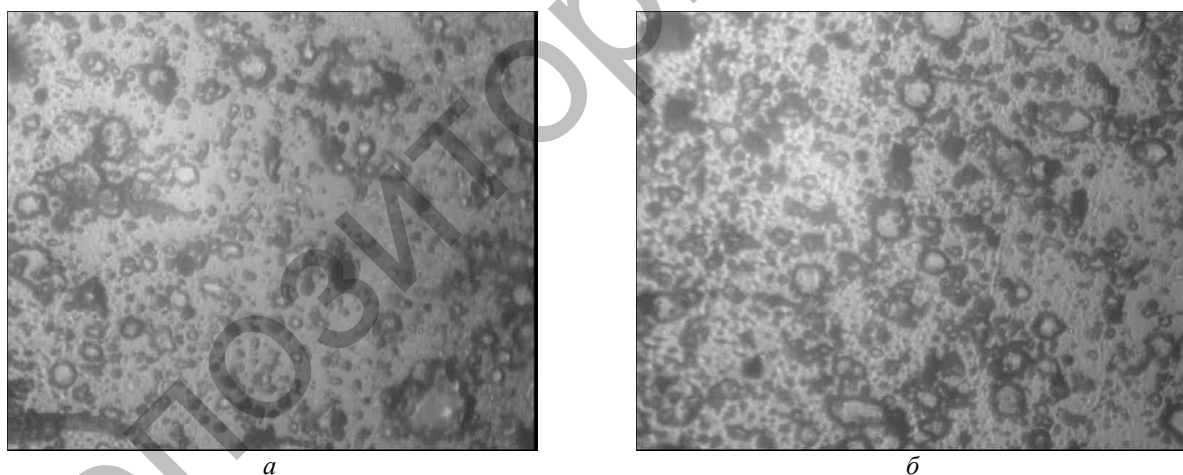


Рисунок 2. Снимки покрытия 12X18H10T + Ti до (а) и после (б) азотирования

В таблице 4 представлены результаты измерения микротвердости до и после азотирования, нагрузка испытания соответствует 0,1 кг, или 0,981 Н.

Таблица 4

Микротвердость покрытия 12X18H10T +Ti до и после азотирования

Количество испытаний	Микротвердость покрытия 12X18H10T +Ti, МПа	
	до азотирования	после азотирования
1	531,0	599,0
2	471,9	540,4
3	495,2	566,1

Продолжение таблицы 4

1	2	3
4	529,3	644,3
5	634,0	668,2
6	396,8	742,5
7	483,4	510,9
8	572,0	824,4
9	555,7	497,7
10	455,4	565,2
Среднее	542,5	615,8

В таблице 5 представлены результаты измерения коэффициента трения.

Таблица 5

Коэффициенты трения 12X18H10T +Ti до и после азотирования

Наименование покрытия образца	Коэффициент трения покрытия	
	Медная пластина	Алюминиевая пластина
Покрытие 12X18H10T +Ti до азотирования	0,329	0,491
Покрытие 12X18H10T +Ti после азотирования	0,328	0,346

Многослойное сложное покрытие. На образец из нержавеющей стали было нанесено послойно ионно-плазменное покрытие, состоящее из:

1) стали марки 12X18H10T в газовой среде аргона, время напыления 5 мин, ток испарения стального катода $I_{и} = 60$ А, опорное напряжение $U_{оп} = 200$ В и давление газа в камере $P = 1 \times 10^{-3}$ мм рт. ст.;

2) титана в газовой среде аргона, время напыления 5 мин, ток испарения титана $I_{и} = 80$ А, опорное напряжение $U_{оп} = 200$ В и давление газа в камере $P = 3 \times 10^{-3}$ мм рт. ст.;

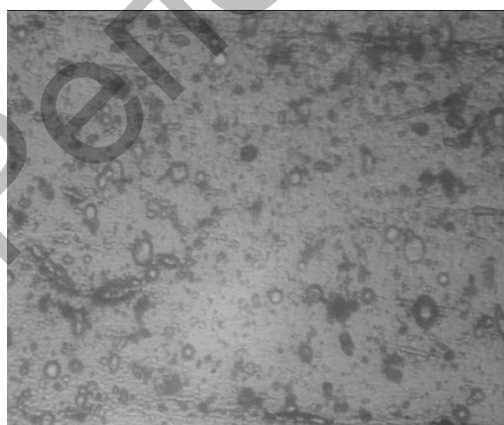
3) нитрида титана, время напыления 5 мин, ток испарения титана $I_{и} = 80$ А, опорное напряжение $U_{оп} = 200$ В и давление газа в камере $P = 7 \times 10^{-3}$ мм рт. ст.;

4) стали марки 12X18H10T в газовой среде аргона, время напыления 5 мин, ток испарения стального катода $I_{и} = 60$ А, опорное напряжение $U_{оп} = 200$ В и давление газа в камере $P = 3 \times 10^{-3}$ мм рт. ст.;

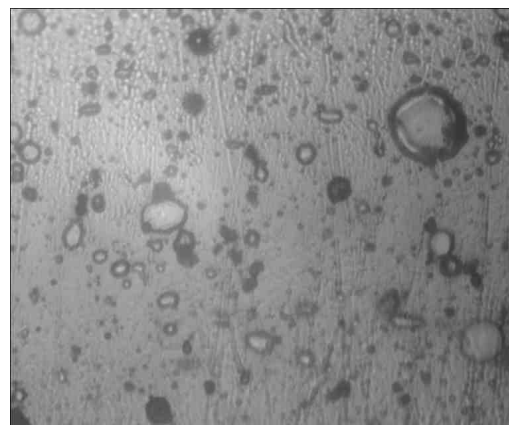
5) титана в газовой среде аргона, время напыления 5 мин, ток испарения титана $I_{и} = 80$ А, опорное напряжение $U_{оп} = 200$ В и давление газа в камере $P = 3 \times 10^{-3}$ мм рт. ст.;

6) нитрида титана, время напыления 15 мин, ток испарения титана $I_{и} = 80$ А, опорное напряжение $U_{оп} = 200$ В и давление газа в камере $P = 7 \times 10^{-3}$ мм рт. ст.

Затем проводилось азотирование в течение 10 мин при давлении газа в камере $P = 5 \times 10^{-3}$ мм рт. ст. На рисунке 3 представлены снимки покрытия до и после азотирования.



а



б

Рисунок 3. Снимки многослойного сложного покрытия до (а) и после (б) азотирования

В таблице 6 представлены результаты испытания микротвердости до и после азотирования, нагрузка испытания соответствует 0,1 кг, или 0,981 Н.

Т а б л и ц а 6

Микротвердость сложного покрытия до и после азотирования

Количество испытаний	Микротвердость сложного покрытия, МПа	
	до азотирования	после азотирования
1	553,2	327,1
2	462,6	303,9
3	422,9	359,8
4	456,3	412,1
5	477,5	318,7
6	502,2	389,1
7	463,1	366,2
8	497,0	341,5
9	491,1	404,8
10	467,7	313,8
Среднее	479,4	353,7

В таблице 7 представлены результаты измерения коэффициента трения.

Т а б л и ц а 7

Коэффициенты трения сложного покрытия до и после азотирования

Наименование покрытия образца	Коэффициент трения покрытия	
	Медная пластина	Алюминиевая пластина
Сложное покрытие до азотирования	0,402	0,416
Сложное покрытие после азотирования	0,301	0,296

Катод Zn–Cu–Al. Модельный образец с покрытием Zn–Cu–Al, нанесенным в течение 40 мин при токе испарения $I_{и} = 80$ А, опорном напряжении $U_{оп} = 200$ В и давлении газа в камере $P = 5 \times 10^{-3}$ мм рт. ст., подвергся азотированию в течение 10 мин при давлении газа в камере $P = 5 \times 10^{-3}$ мм рт. ст. На рисунке 4 представлены снимки покрытия до и после азотирования.



а



б

Рисунок 4. Снимки покрытия Zn–Cu–Al до (а) и после (б) азотирования

В таблице 8 представлены результаты измерения микротвердости до и после азотирования, нагрузка испытания соответствует 0,05 кг, или 0,49 Н.

Микротвердость покрытия Zn–Cu–Al до и после азотирования

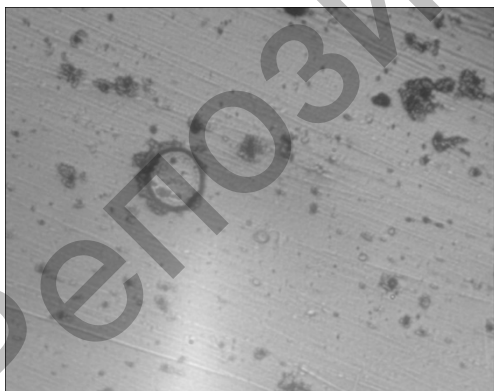
Количество испытаний	Микротвердость покрытия Zn–Cu–Al, МПа	
	до азотирования	после азотирования
1	412,4	166,3
2	369,6	173,7
3	341,5	184,8
4	291,7	246,0
5	331,7	141,5
6	378,1	182,4
7	260,3	200,0
8	283,5	168,5
9	272,0	220,3
10	275,6	196,4
Среднее	321,64	188,0

В таблице 9 представлены результаты измерения коэффициента трения.

Коэффициенты трения покрытия Zn–Cu–Al до и после азотирования

Наименование покрытия образца	Коэффициент трения покрытия	
	Медная пластина	Алюминиевая пластина
Покрытие Zn–Cu–Al до азотирования	0,219	0,222
Покрытие Zn–Cu–Al после азотирования	0,199	0,222

Катод Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al. Модельный образец с покрытием Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al, нанесенным в течение 40 мин в газовой среде аргона при токе испарения $I_{и} = 80$ А, опорном напряжении $U_{оп} = 200$ В и давлении газа в камере $P = 5 \times 10^{-3}$ мм рт. ст, подвергся азотированию в течение 10 мин при давлении газа в камере $P = 5 \times 10^{-3}$ мм рт. ст. На рисунке 5 представлены снимки покрытия до и после азотирования.



а



б

Рисунок 5. Снимки покрытия Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al до (а) и после (б) азотирования

В таблице 10 представлены результаты испытания микротвердости до и после азотирования, нагрузка испытания соответствует 0,05 кг, или 0,49 Н.

Микротвердость покрытия Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al до и после азотирования

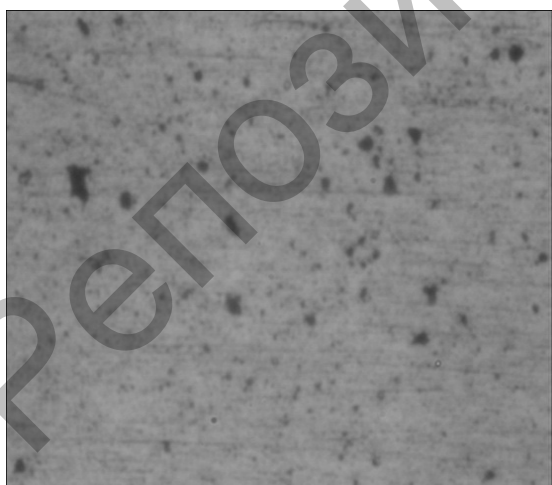
Количество испытаний	Микротвердость покрытия Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al, МПа	
	до азотирования	после азотирования
1	241,9	288,2
2	227,2	312,9
3	248,5	405,3
4	253,3	373,1
5	278,4	347,9
6	249,9	385,6
7	269,2	370,9
8	272,8	361,1
9	284,6	355,2
10	252,8	357,7
Среднее	257,8	355,79

В таблице 11 представлены результаты измерения коэффициента трения.

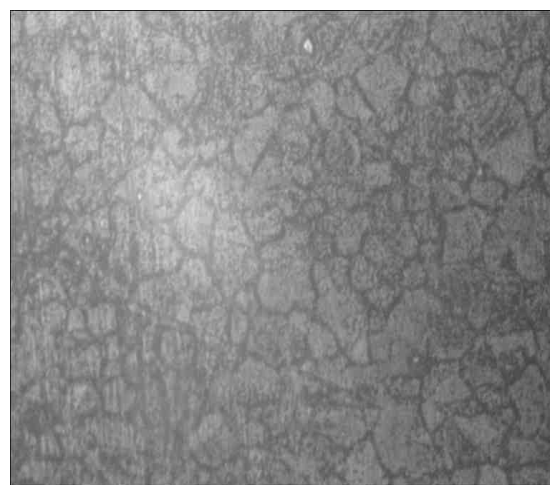
Коэффициенты трения покрытия Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al до и после азотирования

Наименование покрытия образца	Коэффициент трения покрытия	
	Медная пластина	Алюминиевая пластина
Покрытие Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al до азотирования	0,219	0,256
Покрытие Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al после азотирования	0,228	0,201

Катод Fe–Al. Модельный образец с покрытием Fe–Al, нанесенным в течение 40 мин в газовой среде аргона при токе испарения $I_{и} = 80$ А, опорном напряжении $U_{оп} = 200$ В и давлении газа в камере $P = 5 \times 10^{-3}$ мм рт. ст., подвергся азотированию в течение 10 мин при давлении газа в камере $P = 5 \times 10^{-3}$ мм рт. ст. На рисунке 6 представлены снимки покрытия до и после азотирования.



а



б

Рисунок 6. Снимки покрытия Fe–Al до (а) и после (б) азотирования

В таблице 12 представлены результаты испытания микротвердости до и после азотирования, нагрузка испытания соответствует 0,05 кг, или 0,49 Н; а в таблице 13 — коэффициенты трения.

Таблица 12

Микротвердость покрытия Fe–Al до и после азотирования

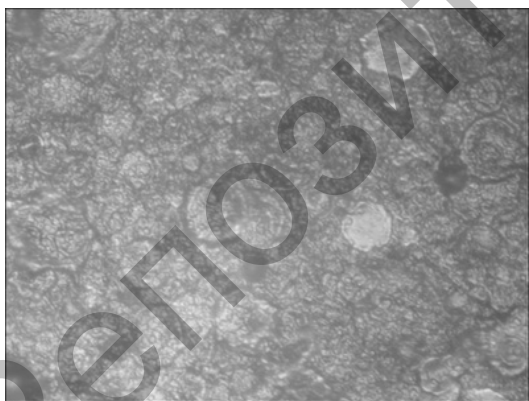
Количество испытаний	Микротвердость покрытия Fe–Al, МПа	
	до азотирования	после азотирования
1	233,1	324,4
2	244,3	451,7
3	234,1	352,8
4	267,9	366,0
5	236,2	357,6
6	234,6	404,6
7	233,3	309,7
8	256,4	336,4
9	261,8	385,9
10	254,0	220,6
Среднее	245,57	350,9

Таблица 13

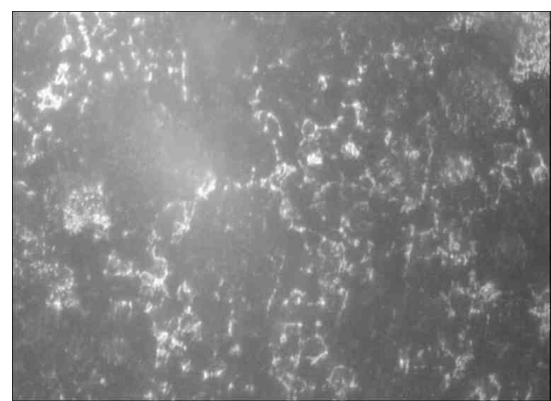
Коэффициенты трения покрытия Fe–Al до и после азотирования

Наименование покрытия образца	Коэффициент трения покрытия	
	Медная пластина	Алюминиевая пластина
Покрытие Fe–Al до азотирования	0,282	0,327
Покрытие Fe–Al после азотирования	0,194	0,206

Катод Zn–Al. Модельный образец с покрытием Zn–Al, нанесенным в течение 40 мин в газовой среде аргона при токе испарения $I_{\text{и}} = 80$ А, опорном напряжении $U_{\text{оп}} = 200$ В и давлении газа в камере $P = 5 \times 10^{-3}$ мм рт. ст., подвергся азотированию в течение 10 мин при давлении газа в камере $P = 5 \times 10^{-3}$ мм рт. ст. На рисунке 7 представлены снимки покрытия до и после азотирования.



а



б

Рисунок 7. Снимки покрытия Zn–Al до (а) и после (б) азотирования

В таблице 14 представлены результаты испытания микротвердости до и после азотирования, нагрузка испытания соответствует 0,05 кг, или 0,49 Н; а в таблице 15 — коэффициенты трения.

Микротвердость покрытия Zn–Al до и после азотирования

Количество испытаний	Микротвердость покрытия Zn–Al, МПа	
	до азотирования	после азотирования
1	305,4	672,5
2	295,4	308,9
3	259,1	641,4
4	348,3	531,8
5	275,0	458,5
6	296,6	558,8
7	288,1	428,5
8	268,7	716,5
9	262,7	619,3
10	288,1	306,4
Среднее	288,7	524,2

Таблица 15

Коэффициенты трения покрытия Fe–Al до и после азотирования

Наименование покрытия образца	Коэффициент трения покрытия	
	Медная пластина	Алюминиевая пластина
Покрытие Zn–Al до азотирования	0,248	0,302
Покрытие Zn–Al после азотирования	0,146	0,187

Обсуждение результатов эксперимента

Очевидным является факт, что азотирование приводит к образованию нитридных фаз, которые обуславливают изменение структуры покрытия и его физико-механических свойств [8]. Эти свойства могут изменяться или нет в зависимости от свойств образующихся нитридов и их количества в поверхностном слое. Рассмотрим каждый катод, который использовался для нанесения покрытия.

Катод Ti. При взаимодействии с плазмой азота получается нитрид титана, который представляет собой фазу внедрения с широкой областью гомогенности, которая составляет от 14,8 до 22,6 азота (по массе), что обозначается брутто-формулами от $TiN_{0,60}$ до $TiN_{1,0}$ соответственно. Микротвердость нитрида титана составляет около 20 ГПа. Твердость самого титана, по Брюнелю, составляет 175 МПа. В таблице 2 приведены значения микротвердости по Виккерсу. Использование различных шкал твердости и микротвердости зависит от метода (и прибора) измерения. Это несколько усложняет интерпретацию данных, поскольку простого соответствия между различными шкалами нет.

Из таблиц 2 и 3 видно, что микротвердость и коэффициент трения после азотирования уменьшаются. Это связано, по нашему мнению, с появлением нестехиометрии соединения нитрида титана при возрастании концентрации азота.

Катод 12X18H10T + Ti в газовой среде аргона. При одновременном распылении катода из нержавеющей стали 12X18H10T и титанового катода происходит незначительное увеличение микротвердости (табл. 4) и практически не изменяется коэффициент трения (табл. 5) после азотирования. Это связано с тем, что катод из нержавеющей стали 12X18H10T уже содержит 10% титана и поэтому небольшое увеличение микротвердости обусловлено в основном образованием нитридов хрома. Среди нитридов металлов VI группы наиболее исследованным с точки зрения износостойкости является CrN. В системе нитрида хрома существуют две нитридные фазы — Cr₂N (гексагональная структура) и CrN (B1–NaCl структура) [9]. По сравнению с металлами IV и V групп металлы VI группы имеют меньшее химическое сродство к азоту, что затрудняет рост монослойных пленок. Пленки нитрида хрома, как правило, получаются двухфазными, содержащими CrN и Cr₂N. В работе [10] с помощью реактивного магнетронного распыления получали как двухфазные пленки Cr+Cr₂N, так и монослой-

ридные однофазные. Покрытия имеют твердость 23 и 25 ГПа соответственно, что значительно превышает твердость массивного материала.

Многослойное сложное покрытие. Надежды на то, что данное покрытие будет обладать микротвердостью, значительно превышающей все исследованные в настоящей работе покрытия, не оправдались. Микротвердость оказалась на уровне предыдущего катода, а после азотирования она уменьшилась. Это связано с образованием большего количества «мягких» нитридных фаз.

Катод Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al. Как и в случае с катодом 12X18H10T + Ti наблюдается незначительное увеличение микротвердости после азотирования (табл. 10). Это также связано с образованием нитридных фаз хрома, которые значительно превосходят микротвердость нитридов других металлов, присутствующих в данном катоде.

Катод Fe–Al. Нитрид железа в форме нитрида тетражелеза Fe_4N образуется в вакууме при температуре 440–550 °С. Его микротвердость лежит в пределах 8,2–8,9 ГПа. Нитрид алюминия образуется при азотировании при довольно высокой температуре — более 800 °С. Учитывая, что температура подложки в наших экспериментах была равной примерно 450 °С, то образование нитридов алюминия маловероятно. Согласно таблице 1 содержание железа в используемом катоде составляет около 40 %. Образование нитридов железа после азотирования напыленного слоя приводит к увеличению микротвердости покрытия (табл. 12).

Катод Zn–Al. В этом случае микротвердость азотированного покрытия увеличивается почти в 2 раза. Нитрид цинка образуется в форме Zn_3N_2 при температурах выше 200 °С и имеет микротвердость около 9,1 ГПа. Поскольку содержание цинка в катоде, согласно таблице 1, составляет около 35 %, то основной вклад в увеличение микротвердости покрытия вносит нитрид цинка.

Из приведенных выше результатов следует, что процесс азотирования в большинстве случаев приводит к увеличению микротвердости покрытия. С этим коррелирует и величина поверхностного натяжения нитридов металлов, которая, согласно таблице 16, наибольшая у нитрида титана и хрома. Как мы видели выше, именно эти нитриды вносят наибольший вклад в микротвердость покрытия.

Следует ожидать, что введение в состав катодов таких металлов, как молибден, вольфрам, технеций, рений, которые имеют большие значения поверхностного натяжения (см. табл. 16), может привести к значительному увеличению микротвердости покрытия. Правда, последние два металла весьма редки и дороги и не могут быть использованы в качестве составляющих катодов.

Т а б л и ц а 1 6

Поверхностное натяжение нитридов металлов [8]

Металл	σ_{Me} , Дж/м ²	Нитрид металла	σ_{MeN} , Дж/м ²	Металл	σ_{Me} , Дж/м ²	Нитрид металла	σ_{MeN} , Дж/м ²
Al	0,933	AlN	0,229	Cr	2,173	CrN	0,532
Cu	1,356	Cu_3N	0,332	Zn	0,693	Zn_3N_2	0,170
Si	1,686	$\alpha-Si_3N_4$	0,413	Mn	1,517	MnN	0,372
Fe	1,508	Fe_4N	0,369	Ti	1,935	TiN	0,474
Mo	2,873	MoN	0,704	W	3,673	WN	0,900
Tc	2,473	TcN	0,606	Re	3,423	ReN	0,839

Заключение

В настоящее время в условиях ограниченности материальных средств в промышленном комплексе особое значение приобретают технологии, увеличивающие долговечность (ресурс) деталей и узлов машин.

В настоящей работе показана роль азотирования в упрочнении ионно-плазменных покрытий. Следует отметить, что азотированию можно подвергнуть и покрытия, полученные другими способами осаждения — магнетронного, электролитического и т.п. Особую роль при этом приобретают высокоэнтропийные покрытия [11].

Работа выполнена по программе МОН РК 055 «Научная и/или научно-техническая деятельность», подпрограмма 101 «Грантовое финансирование научных исследований».

Список литературы

- 1 Лактин Ю.М., Коган Я.Д., Шпис Г., Бемер З. Теория и технология азотирования. — М.: Metallurgiya, 1991. — 320 с.
- 2 Арзамасов Б.Н., Братухин А.Г., Елисейев Ю.С., Панайоти Т.А. Ионная химико-термическая обработка сплавов. — М.: Изд-во МГТУ, 1999. — 400 с.
- 3 Елисейев Ю.С., Абраимов Н.В., Крымов В.В. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиадвигателестроении. — М.: Высш. шк., 1999. — 525 с.
- 4 Берлин Е.В., Шейдман Л.А. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. — М.: Техносфера, 2010. 528 с.
- 5 Берлин Е.В., Коваль Н.Н., Шейдман Л.А. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей. — М.: Техносфера, 2012. — 640 с.
- 6 Босьяков М.Н., Бондаренко С.В., Жук Д.В., Козлов А.А., Поболь И.Л. Оборудование и применение ионно-плазменного азотирования для упрочнения деталей машин и механизмов // Вестн. Караганд. ун-та. Сер. Физика. — 2013. — № 3(71). — С. 76–86.
- 7 Колесников В.А., Байсагов Я.Ж., Юров В.М. Информационно-измерительный прибор для определения коэффициента трения скольжения // Фундаментальные исследования. — 2011. — № 12, Ч. 1. — С. 121–124.
- 8 Юров В.М., Лауринас В.Ч., Гученко С.А., Завацкая О.Н. Структура и свойства многофазных ионно-плазменных покрытий. — Караганда: Изд. КРУ, 2013. — 114 с.
- 9 Коган Я.Д., Колачев Б.А., Левинский Ю.В., Назимов О.П., Фишгойт А.В. Константы взаимодействия металлов с газми: Справ. изд. — М.: Metallurgiya, 1987. — 368 с.
- 10 Minz W.-D. Titanium aluminium nitride films: a new alternative to TiN coatings // J. Vac. Sci. Technol. A. — 1986. — P. 1234–1242.
- 11 Соболев О.В., Андреев А.А., Горбань В.Ф. и др. О воспроизводимости однофазного структурного состояния многоэлементной высокотемпературной системы Ti–V–Zr–Nb–Hf и высокотвердых нитридов на ее основе при их формировании вакуумно-дуговым методом // Письма в ЖТФ. — 2012. — Т. 38, Вып. 13. — С. 40–47.

С.А.Гученко, В.Ч.Лауринас, О.Н.Завацкая, В.М.Юров

Көпфазалық жабындының механикалық қасиеттеріне азоттаудың ықпалы

Мақалада индукциялық балку әдісімен алынған жабыннан кезінде композициялық катодтар пайдаланылған. Композициялық катодтың элементтік құрамының сандық талдауы 5910 JEOL JSM электрондық микроскопында жүргізілген. Микроқаттылықты өлшеу үшін HVS-1000A микроқатты-өлшеуіш қолданылды. Жабындының микроқұрылымы азоттауға дейін және кейін «Эпиквант» оптикалық металлографиялық микроскоп арқылы зерттелді. Азоттау жабындының және оның физика-механикалық қасиеттері құрылымының өзгерісін шарттау нитридтік фаза біліміне келтірді. Азоттаудың рөлі иондық-плазмалы жабындының беріктендіруінде көрсетілген. Бұл ретте жоғары-энтропиялы жабындылар ерекше мәнге ие болады.

S.A.Guchenko, V.Ch.Laurinas, O.N.Zavatskaya, V.M.Yurov

Effect of nitriding on the mechanical properties of multi-phase coatings

The coating used composite cathodes derived by induction melting. Quantitative analysis of the elemental composition of composite cathodes was conducted on electron microscope JEOL JSM-5910. For the measurement of the microhardness on device HVS-1000A was used. Microstructure of coatings before and after nitriding has been investigated with the optical microscope «Epikvant». Nitriding leads to formation of nitride phases which cause change of structure of a covering and its physicomechanical properties. In work the nitriding role in hardening of ion-plasma coatings is shown. The special role is got thus by high-entropy coatings.

References

- 1 Lakhtin Yu.M., Kogan Ya.D., Spiess G., Bemer Z. *Theory and technology of nitriding*, Moscow: Metallurgiya, 1991, 320 p.
- 2 Arzamasov B.N., Bratukhin A.G., Yeliseyev Yu.S., Panayoti T.A. *Ion chemical heat treatment of alloys*, Moscow: Moscow State Technical University, 1999, 400 p.
- 3 Yeliseyev Yu.S., Abraimov N.V., Krymov V.V. *Chemical heat treatment and the protective coating in an avia engine-building*, Moscow: Vysshaya shkola, 1999, 525 p.

- 4 Berlin E.V., Sheydman L.A. *Ion-plasma processes in thin-film technology*, Moscow: Technosphere, 2010, 528 p.
- 5 Berlin E.V., Koval N.N., Sheydman L.A. *Plasma thermochemical surface treatment of steel parts*, Moscow: Technosphere, 2012, 640 p.
- 6 Bosyakov M.N., Bondarenko S.V., Zhuk D.V., Kozlov A.A., Pobol' I.L. *Bull. of the Karaganda State University, Ser. Physics*, 2013, 3(71), p. 76–86.
- 7 Kolesnikov V.A., Baysagov Ya.Zh., Yurov V.M. *Basic researches*, 2011, 12, 1, p. 121–124.
- 8 Yurov V.M., Laurinas V.Ch., Guchenko S.A., Zavatskaya O.N. *Structure and properties of multi-phase ion-plasma coatings*, Karaganda: Kazakh-Russian University Publish. House, 2013, 114 p.
- 9 Kogan Ya.D., Kolachev B.A., Levinskiy Yu.V., Nazimov O.P., Fishgoyt A.V. *Of a force constant of metals with gases: Reference book*, Moscow: Metallurgiya, 1987, 368 p.
- 10 Munz W.-D. *J. Vac. Sci. Technol. A.*, 1986, p. 1234–1242.
- 11 Sobol' O.V., Andreev A.A., Gorban V.F. et al. *Technical Physics Letters*, 2012, 38, 13, p. 40–47.

Репозиторий КАРГУ