## ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА Ті<sub>1-х</sub>Аl<sub>x</sub>N СИСТЕМЫ НА ЕЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

© 2013 А.Л. Каменева

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

#### Поступила в редакцию 21.03.2012

В данной статье получены зависимости, позволяющие прогнозировать трибологические свойства  $Ti_{1-x}Al_xN$  систем по их фазовому и элементному составу, установлено улучшение износостойких и антифрикционных свойств  $Ti_{1-x}Al_xN$  системы при увеличении в ней содержания алюминия и гексагональной фазы  $h\text{-}Ti_aAl_xN_2$ 

Ключевые слова: Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N система, ионно-плазменные методы, фазовый и элементный состав, износостойкие и антифрикционные свойства.

#### введение

Работоспособность деталей узлов трения (деталей) с износостойкими пленками может быть увеличена равномерным прогревом с минимальным теплоотводом в приспособление на стадии подготовки детали за счет устранения последствий предшествующих операций и переходов технологического цикла ее изготовления [1, 2]; бомбардировкой поверхности на стадии осаждения пленки высокоэнергетичными ионами за счет уменьшения в ней внутренних напряжений [3, 4], обработкой отжигом на завершающей стадии процесса получения пленки за счет уменьшения в ней остаточных напряжений [5]. Значимость термических обработок для стабилизации структуры подложки и формируемых пленок в процессе и после их осаждения практически изучена [6-9], однако использование термических обработок для управления фазовым и элементным составом пленок будет рассмотрено в работе впервые.

Целью настоящей работы является изучение влияния термических обработок подложки и многокомпонентной пленки на основе  $Ti_{1-x}Al_xN$  системы (в дальнейшем  $Ti_{1-x}Al_xN$  система) на ее фазовый и элементный состав, улучшение трибологических свойств  $Ti_{1-x}Al_xN$  системы за счет оптимизации ее фазового и элементного состава.

#### 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Интервалы варьирования температурных параметров (ТемП) обработки подложки и осаждения  $Ti_{1-x}Al_xN$  системы: скорость нагрева подложки  $V_{\mu,\Pi} = 10...90$  К/мин, начальная температура  $Ti_{1-x}Al_xN$  системы  $T_c = 605...870$  К после осаждения подслоя TiN и скорость ее нагрева  $V_{\mu,\Pi} = 0, 1...3, 0$  К/мин

в процессе осаждения обеспечивали за счет изменения технологических параметров (ТехП) обработки подложки: величины и скорости увеличения высокого напряжения, подаваемого на подложку в процессе ее ионной очистки-нагрева (U<sub>выс</sub> и V<sub>н.п.</sub> – скорость нагрева подложки соответственно) и осаждения Ti<sub>1.</sub>Al<sub>2</sub>N системы: давления газовой смеси (P) и напряжения смещения (U,), подаваемого на подложку (табл. 1); использования *различных методов осаждения* Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N системы: магнетронного распыления (МР), электродугового испарения (ЭДИ), комбинированного метода (МР+ЭДИ). В качестве материала тестовых образцов с диаметром 20 мм и толщиной 4 мм использовали конструкционную теплостойкую 25ХЗМЗНБЦА и аустенитную сталь 12Х18Н10Т; для материала мишеней и катодов – титан марки BT-1-00 и алюминий марки A85.

Фазовый состав определяли по дифрактограммам, полученным с участков Ti<sub>1.x</sub>Al<sub>x</sub>N системы с использованием дифрактометра ДРОН-4 в Со К $\alpha$  излучении при напряжении 30 кВ и токе 20 мА. Угловой интервал съемки 2 $\theta$  = 30-130°, шаг 0,1°, экспозиция в точке 4 с. Фазовые изменения в сформированных Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N системах оценивали объемными долями входящих фаз: гексагональных Ti<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>N<sub>2</sub>, Ti<sub>2</sub>AlN (в дальнейшем V<sub>тізаl2N2</sub>,  $V_{\text{Ti2AlN}}$ , h-Ti<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>N<sub>2</sub> и h-Ti<sub>2</sub>AlN) и/или кубических  $Ti_{3}^{\text{HZAIN}}$ AlN, AlN, TiN (в дальнейшем  $V_{\text{Ti3AlN}}, V_{\text{AlN}}, V_{\text{TiN}}, c-Ti_{3}$ AlN, c-TiN, c-AlN), направлениями их преимущественной кристаллографической ориентации. Элементный состав Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N системы определяли с использованием растрового электронного микроскопа BS 300 с приставкой для микроанализа EDAX Genesis 200 и количественного микрорентгеноспектрального анализа - на микрорентгеновском анализаторе типа МАР-3 при ускоряющем напряжении 20кВ, токе зонда 20 нА и размере зонда 5мкм. Температуру поверхности неподвижной подложки после ионной очистки, осаждения подслоя TiN и Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N сис-

Каменева Анна Львовна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии, конструирования и автоматизации в специальном машиностроении. E-mail: ann-kam789@mail.ru

темы определяли с использованием инфракрасного бесконтактного пирометра "Термикс".

Трибологические испытания Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N систем проводили по схеме "палец-диск" на машине трения (рис. 1); профилограммы поверхности Ті, "Al N систем получали и обрабатывали с использованием высокоточного кругломера MarForm MMQ 400, оснащенного программой MarShell MarWin. Условия проведения трибологических испытаний: материал пальца (контртела) – ВК8, радиус сферы контртела - R =  $6.5 \pm 0.25$  мм, осевая нагрузка на три пальца – F<sub>a</sub>=175 H, линейная скорость скольжения пальца – V=0,68 м/с, путь трения L<sub>т</sub> = 1500 м, радиус кольца износа пленки – г = 7 мм, продолжительность испытания – t=740 с, среда испытания – СОЖ, температура – Т=20 <u>+</u> 1°С [10]. Антифрикционные: коэффициент (f) и момент трения (M<sub>тр</sub>)<sup>1</sup> и износо-стойкие свойства Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N системы: массовый износ ( $\Delta$  m), объем лунки износа ( $\Delta$  V<sub>n</sub>), приведенный износ по массе ( $I_{\Pi}^{m}$ ) и объему ( $I_{\Pi}^{V}$ ); изнашивающую способность Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N системы по отношению к контртелу: скорость износа контртела (Vк), приведенный износ контртела по объему  $(I_{\kappa}^{V})$  определяли по формулам:

## 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

## 3.1. Фазовый и элементный состав Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N системы в зависимости от температурных и технологических параметров подготовки подложки и осаждения системы

В условиях кратковременной термической подготовки подложки (V<sub>и.п.</sub>=90 К/мин) и низко-



**Рис. 1.** Машина трения для трибологических испытаний по схеме "палец-диск":

1 – электродвигатель; 2 – ременная передача; 3 – рычажное устройство с разновесами; 4 – опора; 5 – держатель; 6 – контртело - палец; 7 – диск с образцом (тестовый образец с нанесенной на него Ті<sub>1-х</sub>Al<sub>x</sub>N системой) и рычагом; 8 – тензометрический датчик силы; 9 – шарик; 10 – стакан с СОЖ; 11 - стойка; 12 – подшипник

температурного процесса магнетронного распыления (T<sub>c</sub>=605...630 К и V<sub>н.с.</sub>=0,1...0,4 К/мин) объемная доля основной фазы h-Ti<sub>2</sub>AlN (P6<sub>3</sub>/mmc (194), а=0,29846 нм и с=2,335 нм)) Ті<sub>1-х</sub>Al<sub>x</sub>N системы в большей степени зависит от изменения давления газовой смеси и напряжения смещения на подложке (табл. 1). При оптимальном сочетании ТехП: Р=1,0 Па и U<sub>см</sub>=80 В формируется двухфазная Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N система с основной h-Ti<sub>2</sub>AlN и дополнительной с-TiN (Fm3m (225), a=0,4244 нм)) фазами и x=0,36. В случае понижения напряжения смещения при многократном увеличении объемной доли с-TiN понижается, как объемная доля h-Ti<sub>2</sub>AlN, так и содержание алюминия в Ті, "Al N системе до х=0,25. Фазовый переход h- $Ti_2AlN + c - TiN \rightarrow h - Ti_2AlN + c - TiN + h - Ti_3Al_2N_2$ (пространственная группа РЗ1с (159), а=0,29875 нм и с=2,335 нм) является следствием отклонения давления газовой смеси относительно 1,0 Па. Увеличение содержания Al в Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N системе с x=0,25 до x=0,32 при повышении давления объясняется большей объемной долей h-Ti<sub>2</sub>AlN фазы и большей скоростью нагрева Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N системы в процессе осаждения.

Фазовый и элементный состав Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N систем, сформированных электродуговым испарением и комбинированным методом при более высокой степени ионизации парового потока, в первую очередь зависит от давления газовой смеси, ТемП подготовки подложки и осаждения Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N систем (табл. 1). При минимальном давлении

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> За момент и коэффициент трения принять средние значения от полученных за 3 сек с момента прохождения пальцами пути трения 10 м.

ТехП		ТемП		Объемные доли фаз (V), %					Элементный состав, ат.%				
		Τ <sub>п</sub> , К	V <sub>H.c.</sub> ,	$Ti_3Al_2N_2$	Ti <sub>2</sub> AlN	Ti <sub>3</sub> AlN	AlN	TiN	Al	Ti	Ν	$C_{Al}\!/C_{Ti}$	Ti-Al-N
			К/мин										система
					Магцетр	011100 02							
		обши	е ТехП:	$U_{RUR} = 600$	$3B. V_{n,n}$	оннос ра =90 К/ми	H. $N_2$	спис =35 %	6. N=2.	0 кВт:	U=80	) B:	
		,		вые	P=1,0	) Па; L=1	00 м	м	, ,		CM	,	
Р, Па	0,8	605620	0,33	18,7	54,0	-	-	27,3	17,81	44,53	37,66	0,40	$Ti_{0,75}Al_{0,25}N$
	1,2	605630	0,56	8,2	88,3	-	-	3,5	19,78	41,35	33,70	0,48	$Ti_{0,68}Al_{0,32}N$
U <sub>см</sub> , В	40	605610	0,11	-	75,0	-	-	25,0	12,61	47,82	39,57	0,26	$Ti_{0,75}Al_{0,25}N$
	60	605615	0,22	-	76,0	-	-	24,0	14,63	46,90	38,47	0,31	$Ti_{0,75}Al_{0,25}N$
	80	605625	0,44	-	95,0	-	-	5,0	25,40	44,90	29,70	0,57	$Ti_{0,64}Al_{0,36}N$
Электродуговое испарение													
		общие Т	ехП: пр	и U <sub>выс</sub> = 100	00 эВ; V <sub>в</sub>	.п.=25 К∕	/мин;	$U_{cM} =$	200 B;	$N_2 = 10$	) %; I <sub>д</sub> =	=75 A;	
L=310 мм; Р=1,0 Па													
Р, Па	0,5	670690	0,7	-	13,0	27,0	-	60,0	9,28	65,80	24,92	0,14	$Ti_{0,88}Al_{0,12}N$
	0,6	670705	1,2	-	19,0	30,0	-	52,0	8,55	63,17	28,28	0,14	$Ti_{0,88}Al_{0,12}N$
	0,8	670710	1,3	82,0	5,0	-	-	15,0	25,85	44,02	30,13	0,59	$Ti_{0,62}Al_{0,37}N$
	1,0	620665	1,5	91,6	-	-	8,4	-	26,54	43,01	30,45	0,62	$Ti_{0,62}Al_{0,38}N$
V <sub>н.п.</sub> , К/мин / t, мин	45/	670715	1,5	76,2	22,0	-	-	1,8	26,58	46,90	26,52	0,57	$Ti_{0,64}Al_{0,36}N$
	$\frac{10}{25^{*}}$	(70 7(0	2.0	100					22.14	40.00	25.00	0.01	T: A1 NI
	$\begin{vmatrix} 25 \\ 20 \end{vmatrix}$	6/0/60	3,0	100	-	-	-	-	33,14	40,88	25,98	0,81	1 1 <sub>0,55</sub> A1 <sub>0,45</sub> N
	15/	770815	1,5	92,8	-	-	2,5	4,7	28,02	42,60	29,38	0,66	$Ti_{0,60}Al_{0,40}N$
	40	870 915	15	95.0				5.0	28 70	12 02	28.38	0.67	Ti Al N
	60	870915	1,5	95,0	-	-		5,0	28,70	42,92	28,38	0,07	1 1 <sub>0,60</sub> 711 <sub>0,40</sub> 1 N
Комбинированный метод: МР+ЭДИ													
			общие 7	ГехП: N=2,	0 кВт; U, ериал каз	<sub>см</sub> =90 В; гола – А1	N <sub>2</sub> =5	0 %; I тени -	<sub>д</sub> =75 А . ті	; P=1,0	) Па;		
V <sub>н.п.</sub> , К/мин / U <sub>выс</sub> , эВ	45/	615, 690	2.5	90 2	67		, mriii –	31	26.50	43 50	30.00	0.61	Tio 62Alo 20N
	600		2,0	<i>,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,</i>	0,7			5,1	20,00	.5,50	20,00	0,01	0,02*0,38* •
	47/	630705	2,5	90,5	3,3	-	-	6,2	27,33	44,02	28,66	0,62	$\overline{Ti}_{0,62}Al_{0,38}N$
,	/00												

Таблица 1. Фазовый и элементный состав Ti<sub>1.</sub>Al<sub>v</sub>N системы

\*U<sub>cm</sub>= 280 B

Р=0,5...0,6 Па и низкой скорости нагрева системы V<sub>н.с.</sub>=0,7...1,2 К/мин даже после продолжительного нагрева подложки до Т =670 К формируется трехфазная Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N система, состоящая из кубических с-TiN, с-Ti<sub>3</sub>AlN (пространственная группа Pm3m (221), параметр кристаллической решетки: a=0,4112 нм) и гексагональной h-Ti<sub>2</sub>AlN фаз с минимальным содержанием алюминия (x=0,12). При P  $\ge$  0,8 Па осаждается Ti<sub>1-v</sub>Al<sub>v</sub>N система, состоящая из основной h-Ti<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>N<sub>2</sub> и дополнительных фаз h-Ti<sub>2</sub>AlN и c-TiN, c x=0,36...0,40. Объемная доля h-Ti<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>N<sub>2</sub> фазы увеличивается при осаждении Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N системы на равномерно прогретую подложку с V<sub>нп</sub>=10...25 К/мин и  $T_c = 670$  К при P=1,0 Па и  $V_{H,C} = 1,5$  К/мин, а с повышением за счет увеличения  $U_{cM}$  до 280 В скорости нагрева V<sub>н с</sub> до 3,0 К/мин объемная доля

фазы h-Ti<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>N<sub>2</sub> достигает 100 %, а содержание алюминия увеличивается до x=0,45. В случае непродолжительного нагрева подложки с  $V_{\rm H.R.}$ =45 К/мин и повышения только  $V_{\rm H.C.}$  до 2,5 К/мин при одновременной работе электродугового испарителя и магнетронного распылителя фазовый состав Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N системы не изменяется.

Элементный состав Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N системы, сформированной MP, ЭДИ и MP+ЭДИ изменяется в зависимости от технологических и температурных параметров подготовки подложки и осаждения системы в следующих интервалах: 8,55...33,14 ат.% Al; 40,88...65,80 ат.% Ti, 24,92...39,57 ат.% N (рис. 2). Стехиометрический состав соответствует Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N системам, сформированным при объемной доле основной тройной системы ≥ 90 ат. %.



**Рис. 2.** Схематичные диаграммы зависимости элементного состава пленок на основе Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N системы от входящих в нее фаз

## 3.3. Трибологические свойства Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N системы в зависимости от ее фазового и элементного состава

Рост объемных долей основных фаз  $\mathrm{Ti}_{1\text{-}x}\mathrm{Al}_x\mathrm{N}$ систем: h-Ti<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>N<sub>2</sub> (ЭДИ и ЭДИ+МР) и h-Ti<sub>2</sub>AlN (МР) с одинаковым направлением преимущественной кристаллографической ориентации (103) оказывает неоднозначное влияние на их трибологические свойства. Уменьшение V<sub>тізА!2N2</sub> и одновременное увеличение  $V_{Ti2AlN}$  в  $Ti_{1-x}Al_xN$ системе, сформированной МР, до 75 % приводит к ухудшению всех ее трибологических свойств. При  $\mathrm{V}_{\mathrm{ti2AlN}}\!>75$ % характеристики износа пленки и контртела резко уменьшаются. Фаза h-Ti<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>N<sub>2</sub> с объемной долей, не превышающей 80 %, практически не оказывает влияние на трибологические свойства Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N систем, сформированных ЭДИ и комбинированным методом, но дальнейшее повышение V<sub>тізаl2N2</sub> в системе резко их улучшает (рис. 3);

- повышение содержания Al в Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N системах при формировании их MP способствует монотонному уменьшению, как износа пленки, так и контртела, в то время как при осаждении Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N систем электродуговым и комбинированным методом резкое улучшение трибологических свойств Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N системы наблюдается только при превышении содержания Al 36 ат.% и отношения концентраций алюминия и титана (C<sub>Al</sub>/C<sub>Ti</sub>) - 0,57. При постоянном содержании Al в Ti<sub>1-</sub>

 ${}_{x}Al_{x}N$  системе, но при повышении  $C_{Al'}/C_{Ti}$  и уменьшении содержания в ней  $N_{2}$  все трибологические свойства улучшаются. Данный факт по результатам химического анализа объясняется приближением состава  $Ti_{1-x}Al_{x}N$  системы к стехиометрическому. Оптимальное содержание Al в  $Ti_{1-x}Al_{x}N$ системе - 45 ат. % не превышает критического 0,5...0,65 с точки зрения растворимости элементов в решетках нитридов;

- сравнение значений Δ m, I<sup>m</sup><sub>n</sub>, I<sup>V</sup><sub>n</sub>, I<sup>V</sup><sub>κ</sub>, V<sup>K</sup>, f и М<sub>тр</sub> показало, что Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N системы (ЭДИ и ЭДИ+МР) при примерно одинаковой концентрации в них алюминия по сравнению с Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N (МР) обладают лучшими трибологическими свойствами.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной фазой  $Ti_{1-x}Al_xN$  системы, сформированной в результате низкотемпературного процесса магнетронного распыления на кратковременно прогретой подложке, является гексагональная фаза h- $Ti_2AlN$ , объемная доля которой может быть повышена за счет оптимизации напряжения смещения на подложке и давления газовой смеси. К образованию в системе дополнительной гексагональной фазы h- $Ti_3Al_2N_2$  приводит отклонение давления газовой смеси 1,0 Па.

Основной причиной формирования методом ЭДИ трехфазной Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N системы, состоящей из



**Рис. 3.** Зависимости трибологических свойств Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N систем, полученных MP (a), (в), ЭДИ и ЭДИ+ MP (б), (г) от фазового (а), (б) и элементного (в), (г) состава

кубических с-ТіN, с-Ті<sub>2</sub>AlN и гексагональной h-Ті<sub>2</sub>AlN фаз, с минимальным содержанием алюминия x=0,12 является минимальное давление газовой смеси. Основной фазой Ті, "Al N системы, сформированной при оптимальном Р, является h-Ti<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>N<sub>2</sub>, объемная доля которой может быть увеличения за счет уменьшения  $V_{_{\rm H.II.}}$  до 10 К/мин, увеличения  $\rm T_{c}$ до 670 К и  $\rm V_{_{H,C}}$ до 1,5 К/ мин. Содержание Al в  $Ti_{1-x}Al_xN$  системе может быть повышено до x=0,38 за счет увеличения V<sub>нс</sub> в процессе ее осаждения до 2,5 К/мин при одновременной работе электродугового испарителя и магнетронного распылителя и до х=0,45 - при повышении  $V_{_{\rm H.C.}}$ до 3,0 К/мин за счет роста  $U_{_{\rm CM}}$ до 280 В. Стехиометрический состав соответствуют Ті<sub>1-х</sub>Аl<sub>х</sub>N системам, сформированным при объемной доле основной тройной фазы не менее 90 %.

Улучшение трибологических свойств системы возможно при превышении объемных долей соответствующих гексагональных фаз 80 % и достижении содержания алюминия в Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N системе не ниже x=0,36. Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N система с содержанием гексагональной фазы h-Ti<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>N<sub>2</sub> - 100 % и алюминия - x=0,45 обладает оптимальным комплексом износостойких и антифрикционных свойств, минимальной изнашивающей способностью по отношению к контртелу, Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N система на основе h-Ti<sub>3</sub>AlN уступает ей по свойствам.

Основными путями улучшения трибологических свойств Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N системы при оптимальных TexП является равномерный прогрев подложки и осаждение системы при оптимальной начальной температуре и скорости ее нагрева в процессе осаждения.

Оптимизация фазового и элементного состава за счет управления температурными условиями формирования позволила многократно улучшить трибологические свойства Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N систем. Использование термических обработок подложки и пленки для управления фазовым и элементным составом пленок и в конечном итоге улучшения их трибологических свойств рассмотрено в работе впервые.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (договор № 13.G25.31.0093) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 "О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства".

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Табаков В.П. Формирование износостойких ионноплазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2008. 311 с.
- 2. *Ящерицын П.И*. Технологическое наследование эксплуатационных параметров деталей машин / П.И. Ящерицын // Справочник. Инженерный журнал. 2004. № 9. С. 20-22.
- Шулаев В.М., Андреев А.А. Сверхтвердые наноструктурные покрытия в ННЦХФТИ // ФИП РЅЕ, 2008.
  Т. 6. - № 1-2. - С. 4-19.
- Plasma-based ion implantation utilizing a cathodic arc plasma / M.M.M. Bilek, D.R. McKenzie, R.N. Tarant, S.H.M. Lim, D.G. McCulloch // Surface and Coatings Technology, 2003. Vol. 156. Pp. 136-142.
- Theory of the effects of substitutions on the phase stabilities of Ti<sub>1</sub>Al<sub>x</sub>N / H.W. Hugosson, H. Hoëgberg, M. Algren, M. Rodmar, T.I. Selinder // J. Appl. Phys.,

2003. Vol. 93. № 8. Pp. 4505-4511.

- Pressure-induced rocksalt phase of aluminum nitride: a metastable structure at ambient condition / Q. Xia, H. Xia, A. Ruoff // J. Appl. Phys, 1993.Vol. 73. Pp. 8198– 8200.
- Self-organized nanostructures in the Ti-Al-N system / P.H. Mayrhofer, A. Hurling, L. Karlsson, J. Sjulün, T. Larsson, C. Mitterer and L. Hultman // Appl. Phys. Lett., 2003. Vol. 83. Pp. 2049-2051.
- Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 356 с.
- Богданович В.И. Управление эксплуатационными свойствами деталей с вакуумными ионно-плазменными покрытиями при производстве летательных аппаратов: дисс. ... докт. техн. наук. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика СП. Королева, 2002. 439 с.
- Каменева А.Л., Караваев Д.М. Улучшение трибологических характеристик пленок на основе ZrN путем оптимизации технологических условий процесса магнетронного распыления // Сб. тр. 9-й Междунар. науч.-практ. конф. Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения, Филиал СПГГИ (ТУ) "Воркутинский горный институт", 2011. С. 289-293.
- 11. *Baptista A.P.M.* Friction and wear of TiN coatings contribution of CETRIB /INEGI to the TWA 1- 1993 VAMAS round-robin // Wear, 1996. Vol. 192. Pp. 237-240.
- 12. Современные методы оценки механических и трибологических свойств функциональных поверхностей / М.И. Петржик, Д.В. Штанский, Е.А. Левашов // Матер. Х Междунар. науч.-техн. конф. Высокие технологии в промышленности России, ОАО ЦНИТИ "Техномаш", 2004. С. 311-318.

# EFFECT OF PHASE AND ELEMENTAL COMPOSITION Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N SYSTEM AT ITS PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

### © 2013 A.L. Kameneva

### Perm National Research Polytechnic University

In this paper, the dependences allowing prediction of tribological properties of  $Ti_{1-x}Al_xN$  systems in their phase and elemental composition have been received, was established that improved wear and antifriction properties of  $Ti_{1-x}Al_xN$  system is due to increase of aluminum content in it, and the hexagonal phase h- $Ti_3Al_2N_2$ . Keywords:  $Ti_{1-x}Al_xN$  system, the ion-plasma methods, phase and elemental composition, wear and antifriction properties.

Anna Kameneva, Candidate of Technics, Associate Professor at the Technology, Engineering and Automation in Special Machine Construction Department. E-mail: annkam789@mail.ru