

Каменева А.Л., Каменева Н.В. Эволюция теплофизических и физико-механических свойств Ti- и Al-катодов в процессе электродугового испарения пленок  $Ti_{1-x}Al_xN$  // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 40–51. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.2.05

Kameneva A.L., Kameneva N.V. The evolution of thermophysical and physico-mechanical properties of Ti and Al cathodes in the electro arc evaporation of  $Ti_{1-x}Al_xN$  film. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 40–51. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.2.05

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 22, № 2, 2020**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.2.05

УДК 539.23

**А.Л. Каменева, Н.В. Каменева**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ЭВОЛЮЦИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
TI- И AL-КАТОДОВ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ИСПАРЕНИЯ ПЛЕНОК  $Ti_{1-x}Al_xN$**

Многослойные пленки  $Ti_{1-x}Al_xN$  наносились на твердосплавные пластины с использованием электродугового испарения катодов Ti и Al. Катоды охлаждались наиболее часто используемыми промышленными методами: проточной или оборотной водой. Результаты показали, что испарение алюминия при температуре выше температуры плавления и недостаточное охлаждение катода сопровождаются фазовым превращением твердое тело → жидкость, потерей жесткости и увеличением объема катодного пятна, вытеснением расплава из кратеров с образованием микроструй и большого количества дефектных микрокапель на поверхности и в теле пленки, перераспределением фазового и элементного состава по поверхности подложки и катода. Такие явления вызваны снижением теплопроводности Al в катодном пятне в 2,5 раза, его плотности на 15 %, прочности в 30 раз, вязкости в 7 раз, ускорением кристаллографической анизотропии, резким уменьшением модуля сдвига, двойным увеличением энтропии и увеличением коэффициента теплового расширения. Повышение температуры катодного пятна Ti с низкой теплопроводностью ускоряет различную динамику коэффициента теплового расширения и модуля Юнга и приводит к появлению термических и механических напряжений. Создана модель теплофизических и физико-механических свойств катодных материалов для прогнозирования поведения катодов при их испарении.

**Ключевые слова:** пленки  $Ti_{1-x}Al_xN$ , катодное пятно, охлаждение катодов, электродуговое испарение, теплофизические свойства, физико-механические свойства, критическая температура, модель структурных зон, модель поведения свойств, дефекты.

**A.L. Kameneva, N.V. Kameneva**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**THE EVOLUTION OF THERMOPHYSICAL AND PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES  
OF TI AND AL CATHODES IN THE ELECTRO ARC EVAPORATION OF  $Ti_{1-x}Al_xN$  FILM**

Multilayer films  $Ti_{1-x}Al_xN$  were deposited on carbide plates using cathodic arc evaporation of Ti and Al cathodes. Cathodes were cooled down by most often used industrial methods: by flowing or recirculated water. The results show that the aluminum evaporation at the temperature above melting and insufficient cathode cooling is accompanied by phase transformation: solid-liquid, stiffness loss and cathode spot volume increase, melt displacement from the craters with the formation of microjets and a large number of defective microdroplets on the surface and in the film body, a phase and elemental composition redistribution over the surface of a substrate and a cathode. Such phenomena are caused by a thermal conductivity decrease of Al in the cathode spot by 2.5 times, its density by 15 %, strength by 30 times, viscosity by 7 times, crystallographic anisotropy acceleration, a sharp decrease in shear modulus, a 2-fold increase in entropy and enhance in thermal expansion coefficient. A temperature increase of a Ti cathode spot with low thermal conductivity accelerates various dynamics of thermal expansion coefficient and Young's modulus and leads to the appearance of thermal and mechanical stresses. A model of the thermophysical and physicomachanical properties of cathode materials has been established to predict the behavior of cathodes during their evaporation.

**Keywords:**  $Ti_{1-x}Al_xN$  films, cathode spot, cathode cooling, electric arc evaporation, thermophysical properties, physical and mechanical properties, critical temperature, structural zone model, behavior model of properties, defects.

Преимущество метода электродугового испарения (ЭДИ) связано с его уникальной способностью генерировать плазму высокой плотности, которая образуется при практически полной ионизации катодного материала в катодных пятнах вакуумной дуги [1]. Катодное пятно является

эмиссионным центром разряда на поверхности катода, представляющего собой небольшую, ярко светящуюся область, через которую ток передается между катодом и столбом дуги [2, 3]. Катодные пятна подразделяются на два типа. Катодные пятна типа 1 появляются на первой стадии дуги, если по-

верхность катода покрыта диэлектрическими пленками, включениями, химическими примесями и загрязнениями. Незначительная эрозия в пятнах типа 1 имеет нетепловой характер, это связано с последовательными взрывами микронеровностей на поверхности катода. Их воспламенение требует меньшего напряжения по сравнению с пятнами типа 2 [4]. Катодное пятно типа 2 состоит из нескольких активно излучающих зон и функционирует на своей очищаемой поверхности. Эрозия пятен типа 2 носит термический характер и намного больше, чем эрозия пятен типа 1. Время перехода от пятен типа 1 к пятнам типа 2 больших размеров зависит от тока разряда и теплофизических свойств материала катода [5], в то время как плотность тока эмиссии и существующий тип излучения становятся зависимыми от температуры катода, температуры пятна катода и напряженности электрического поля, создаваемого вблизи поверхности катода [6, 7].

Температура и размер катодного пятна являются регуляторами, контролирующими условия испарения атомов и поддержания разряда. Максимальный уровень температуры в небольших катодных пятнах достигается за более короткий промежуток времени, чем в больших пятнах. Уменьшение размера катодного пятна влияет на электрическое поле, изменение плотности ионного тока и степень ионизации потока плазмы [7]. Процесс эмиссии трансформируется из автоэлектронного в термоавтоэлектронный по мере увеличения катодного пятна. Непрерывное движение катодных пятен вдоль ограниченной рабочей поверхности катода приводит к определенной средней равновесной температуре поверхности, определяемой условиями охлаждения, а также диаметром и длиной катода [5].

Интенсивное тепловое воздействие на поверхность катода вызывает сложные физико-химические процессы, которые приводят к структурным и фазовым превращениям в зоне эрозии катода [8, 9]. Материал катодной поверхности очень быстро превращается из твердого состояния в плазму при ЭДИ [8]. Из-за высокой плотности энергии в области катодного пятна во время процессов взрыва образуются как однофазные системы: твердое тело, жидкость, газ (пар) и плазма, так и двухфазные системы: твердое тело–жидкость, жидкость–газ и твердое тело–газ (в случае металлического катода). Фазовые превращения, происходящие при превращении из твердого катодного материала в плазму, – это то, что обеспечивает работу дугового разряда и делает плазму катодной дуги и осажденные пленки такими особенными [10]. Перераспределение фазовой концентрации по поверхности катода и градиент состава образующихся пленок

являются следствием деформации катода при длительном сроке эксплуатации и нарушения теплоотвода от некоторых катодных пятен, что приводит к локальному плавлению его поверхностного слоя в зоне эрозии [9, 11].

Эмиссия макрочастиц, выбрасываемых из катодного пятна в процессе осаждения пленки, приводит к снижению качества пленки. Система принудительного охлаждения обеспечивает такой режим работы катода, при котором величина средней температуры его поверхности недостаточна для протекания тока посредством термоэлектронной эмиссии и увеличения количества макрочастиц [6, 12]. Поддержание температуры катода на заданном уровне может быть достигнуто путем уменьшения, поддержания или контроля тока дуги во времени, а также ускорения движения катодных пятен [12–14].

В нескольких научных работах обсуждается связь размера катодного пятна с шероховатостью поверхности [15, 16], загрязнением [17, 18] и температурой [5] поверхности, включениями [6, 19], управляемым магнитным полем [7] и свойствами материала, такими как работа выхода электрона [15] и когезионная энергия [11, 12, 16]. В работе [17] структурные превращения устанавливаются в материале поверхности катодов и/или мишеней из Ti и Zr с одинаковыми теплофизическими свойствами во время процесса ЭДИ, магнетронного распыления на постоянном токе или при их одновременном проведении. Представляет большой интерес установление зависимости структурно-фазовых превращений в катодных пятнах вакуумной дуги от их температуры для управления процессом испарения Al- и Ti-катодов и сохранения их теплофизических и физико-механических свойств.

Целью статьи является изучение поведения теплофизических и физико-механических свойств Ti и Al в процессе испарения катодов в зависимости от температуры катодных пятен и протекающих в них структурно-фазовых превращений. Статья также направлена на установление промышленного способа охлаждения, позволяющего предотвратить градиент температуры по поверхности и поперечному сечению катодов.

#### Характеристики материалов и методики исследований

Пленки  $Ti_{1-x}Al_xN$ , выбранные в качестве модельных, были нанесены ЭДИ на автоматизированной установке УРМ 3.279.048, оснащенной двумя электродуговыми испарителями и четырьмя магнетронными распылителями на постоянном токе. Технологические и температурные параметры процесса осаждения пленок  $Ti_{1-x}Al_xN$  приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Технологические и температурные параметры осаждения пленки  $Ti_{1-x}Al_xN$

№ п/п	Параметр	Значения	
1	Высокое напряжение $U$ , В	600–1000	
2	Скорость нагрева подложки, К/мин	10–45	
3	Температура подложки, К	600–1000	
4	Давление газовой смеси, Па	0,5–1,0	
5	Соотношение газов в смеси $Ar/N_2$ , %	50: 50	
6	Ток дуги, А	75	
7	Напряжение смещения на подложке $U_{см}$ , В	–200, –280	
8	Расстояние катод–подложка, мм	$310 \pm 20$	
9	Продолжительность осаждения подслоя $TiN$ , мин	10	
10	Продолжительность осаждения пленки $Ti_{1-x}Al_xN$ , мин	30	
11	Тестовый образец	Материал	VK8 (HG30)
		Размер, мм	$10 \times 10 \times 3$ и $3 \times 3 \times 2$

В качестве материала легкоплавкого катода использовали алюминий технической чистоты марки А85: Al – 99,85 вес. %, Si – 0,06 вес. %; Fe – 0,08 вес. %; Cu – 0,01 вес. %; Mn – 0,02 вес. %; Mg – 0,02 вес. %; Zn – 0,02 вес. %; Ga – 0,02 вес. %; Ti – 0,008 вес. %; другие – 0,02 вес. % (ГОСТ 11069 2001 (EN AW-1085)). В качестве материала тугоплавкого катода использовали титан технической чистоты марки ВТ-1-00 (ERTi-1): Ti – 99,42 вес. %; Si – 0,08 вес. %; Fe – 0,2 вес. %; С – 0,05 вес. %; О – 0,1 вес. %; N – 0,04 вес. %; Н – 0,008 вес. %; другие – 0,1 вес. % (ОСТ 1.90013–71).

Для охлаждения катодов использовали проточную или оборотную воду. Технологические параметры осаждения пленки приведены в табл. 1 [18, 20–22]. Экспериментально установлено, что температура проточной воды постоянна в процессе осаждения пленки. Разница между значениями температуры оборотной и проточной воды  $\sim 10$  °С увеличивается в процессе осаждения на  $\sim 2\text{--}3$  °С. Повышение температуры подложки  $T_{подл}$  и начальной температуры пленки  $T_{н.п}$  было достигнуто после увеличения высокого напряжения и продолжительности его приложения к подложке во время ее ионной очистки – нагрева электродуговым испарителем. Давление газовой смеси и напряжение смещения на подложке увеличивали для повышения скорости нагрева пленки во время ее осаждения. Для повышения адгезии пленки  $Ti_{1-x}Al_xN$  наносили адгезионный подслой  $TiN$ . Температура поверхности подложки после ее ионной очистки, а также температура подслоя и пленки  $Ti_{1-x}Al_xN$  после их осаждения определялись с помощью инфракрасного бесконтактного пирометра Thermix. Перед нача-

лом технологического процесса резистивный нагреватель, расположенный в центре камеры, включали на 20 мин для удаления остаточной влаги и газов. Скорость вращения подложки при осаждении пленки  $Ti_{1-x}Al_xN$  составляла 20 м/с.

Микроструктуру зоны эрозии катодных пятен Ti и Al изучали с помощью полевого эмиссионного электронного микроскопа Ultra 55 в зависимости от способа их охлаждения [23–25].

### Особенности теплофизических и физико-механических свойств катодного материала

Алюминий имеет кубическую гранцентрированную кристаллическую решетку и не претерпевает полиморфных превращений. В зависимости от температуры различают три агрегатных состояния алюминия: твердый кристалл 0–933 К, жидкость 933–2766,8 К, идеальный одноатомный газ 2766,8–6000 К [26]. Особенности теплофизических и физико-механических свойств технического Al – низкие значения: температуры плавления  $T_{пл}$ , плотности  $\rho$ , теплоемкости  $c_p^0$ , предела прочности  $\sigma_b$ , условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$ , предела ползучести  $\sigma_n$ , модуля Юнга  $E$  и модуля сдвига  $G$ . В то же время у алюминия высокие значения теплопроводности  $\lambda$ , коэффициента теплового расширения  $\alpha$ , текучести, коэффициента испарения  $K_n$  и скорости испарения  $V_n$ . Титан является полиморфным металлом и существует в двух аллотропных модификациях, которые различаются по структуре атомной решетки: 0–1155,5 К –  $\alpha$ -Ti и 1155,5–1933 К –  $\beta$ -Ti [26]. В зависимости от температуры различают три агрегатных состояния титана: 0–1155,5 К – кристалл  $\alpha$ , 1155–1933 К – кристалл  $\beta$ , 1933–3591 К – жидкость, 3591–6000 К – идеальный одноатомный газ. Титан по сравнению с Al обладает более высокими значениями:  $T_{пл}$ ,  $c_p^0$ ,  $\rho$ ,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $E$ ,  $G$  и жидкотекучести, предотвращающими деформацию катода при длительной эксплуатации. При значении температуры  $>500$  К отношение прочности к удельному весу у титана выше, чем у алюминия; с повышением температуры размягчение титана происходит медленнее, чем у алюминия. Это превосходство титана сохраняется до приблизительно 800 К, после чего активность титана становится определяющим фактором. Однако титан обладает многократно меньшими значениями:  $\lambda$ ,  $\alpha$ ,  $K_n$  и  $V_n$ . Физико-механические и теплофизические свойства катодных материалов алюминия и титана зависят не только от их агрегатного / полиморфного состояния, но и от температуры катодных пятен и градиента температур по сечению катода (табл. 2–3).

Таблица 2

Физико-механические и теплофизические свойства алюминия и титана [25, 27, 28, 29].

	A85 (EN AW-1085)	BT-1-00 (ERTi-1)
Пространственная группа	Fm $\bar{3}m$	C6mmc
Элементарные параметры ячейки, нм	Гранецентрированная кубическая решетка $a = 0,4040$ нм	$\alpha$ -Ti – низкотемпературная фаза с гексагональной плотноупакованной решеткой ( $a = 0,2951$ нм, $c = 0,4697$ нм); $\beta$ -Ti – высокотемпературная фаза с кубической объемноцентрированной решеткой ( $a = 0,3306$ нм, низкая плотность)
Температура начала рекристаллизации, К	423	853 (окончание 943 К)
Температура литья, К	963–983	1733–1753
Температура кипения, °С	3040	3560
Температура испарения, К	1423	1819
Удельная теплота испарения, кДж/моль	10,53	8,8
Коэффициент испарения, атом/ион	1,24	0,38
Жидкотекучесть, мм	317	Минимум 500
Энергия когезии, эВ / атом	3,34	$\alpha$ -Ti – 5,17
Предел ползучести $\sigma_i^T$ , МПа	50 – при 293 К, 7 – при 473 К	Низкий до 523 К Изменяется при росте температуры
Относительное удлинение $\delta_5$ , %	25–30	20–40
	$\delta_5$ – увеличивается при росте температуры	
Относительное сужение $\Psi$ , %	50–60	45–65
	$\Psi$ – увеличивается при росте температуры	
Твердость, НВ	13–15	103
Коэффициент Пуассона $\mu$	0,33	0,35–0,38
Модуль сдвига $G$ , ГПа	22,5–26,5	46
Прочность на сдвиг, МПа	от 48 до 79	–
Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	от 73 до 140	–
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	от 17 до 120	–
Максимальная температура механического воздействия, К	170	773

### Структурно-фазовые превращения в материале зоны эрозии алюминиевого катода в зависимости от его теплового состояния

В результате электронно-микроскопического исследования было установлено, что под воздействием давления плазмы в зоне эрозии катодных пятен 2-го типа образуются кратеры размером от 60 до 500 мкм (рис. 1, *a–z*). Процесс вытеснения расплава из кратеров указывает на фазовое превращение из однофазной solid-системы в двухфазную solid–liquid-систему. Процесс вытеснения высокоскоростных струй плазмы ионизированного материала катода из кратеров диаметром до 100 мкм сопровождается образованием микроструй и микрокапель по границам кратеров (см. рис. 1, *a–b*). Во время функционирования катодного пятна жидкие микрокапли покидают катод со скоростью до  $5 \cdot 10^4$  см/с, что свидетельствует о наличии высокого давления на катод в области зоны эрозии [4, 30]. Увеличение глобулярных стержневых структур наблюдается в кратерах диаметром  $\sim 500$  мкм (рис. 1, *z, d*). Первичная неравновесная тонкая дендритная структура на плоских участках зоны эрозии указывает на неравномерность температуры по поверхности и поперечному сечению Al-катода и, как следствие, его неоднородное

испарение (рис. 1, *e*). Подобные кратеры были обнаружены Ютнером и Клебергом на медном катоде с высокой теплопроводностью  $\lambda = 401$  Вт·м<sup>-1</sup>·град<sup>-1</sup> при 293 К, что выше, чем у алюминия [4, 8].

Неоднородное травление алюминия в зоне эрозии катода, несмотря на равномерное охлаждение проточной водой, обусловлено кристаллографической анизотропией Al (рис. 1, *ж*). Коэффициент кристаллографической анизотропии алюминия особенно резко увеличивается при  $T \geq 573$  К, процессы разрушения кристаллической решетки начинаются при температуре 900 К, близкой к его температуре плавления. Для алюминия существует большая зависимость модуля сдвига  $G$  от температуры. Эта зависимость характерна для ГЦК-металлов и проявляется в более сильной зависимости упругой постоянной алюминия  $c_{11}$  от температуры, которая уменьшается быстрее, чем  $c_{44}$ .

Образование при испарении алюминия двухфазной системы solid–liquid происходит по пяти причинам. Во-первых, температура литья ( $T_{Al} = 963 \dots 983$  К) и испарения (1423 К) литого катода Al превышает температуру его рекристаллизации (423 К) и температуру плавления – точку перехода solid–liquid (933 К) (см. табл. 2). Во-вторых, уменьшение более чем в 2 раза теплопроводности

Таблица 3

Физико-механические и теплофизические свойства алюминия и титана в зависимости от температуры [25–33]

Свойство Al и Ti	Температура, К																					
	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200		
Скорость испарения, г/(см <sup>2</sup> ·с)	Al										0,85·10 <sup>-4</sup>			7,5·10 <sup>-4</sup>								
	Ti										13,3·10 <sup>-1</sup>			133,3·10 <sup>-1</sup>								
Давление насыщенного пара, Па	Al										6,32·10 <sup>-11</sup>			6,32·10 <sup>-9</sup>								
	Ti										1,13·10 <sup>-10</sup>			7,94·10 <sup>-9</sup>								
Плотность, г/см <sup>3</sup>	Solid										2,357											
	Liquid										2,304											
Теплопроводность λ, Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	Ti										4,35											
	Al	237	240	236	231	225	218	210														
	Liquid																					
	Ti	21,9	17,7	17,7	17,7	17,7	20	19,0	23,5													
Теплоемкость с <sub>p</sub> <sup>0</sup> , кал·моль <sup>-1</sup> ·град <sup>-1</sup>	Al	5,814	6,163	6,45	6,717	6,999	7,37	7,901	7,588													
	Liquid																					
Энтропия S <sup>0</sup>	Crystal alpha	5,996	6,341	6,559	6,755	6,976	7,229	7,499	7,767	8,025	8,296	8,556	8,816	9,076	9,336	9,596	9,856	10,116	10,376			
	Crystal beta	6,206	6,28	6,358	6,439	6,525	6,618	6,718	6,825	6,94	7,068	7,21	7,367	7,54	7,73	7,94	8,16	8,39	8,63	8,86	9,09	
	Liquid	6,206	6,28	6,358	6,439	6,525	6,618	6,718	6,825	6,94	7,068											
	Al	6,805	8,528	9,934	11,134	12,19	13,147	14,044	17,603	18,326	18,956	19,593	20,156	20,679	21,169	21,629	22,063	22,473	22,862	23,232	23,585	
Коэффициент линейного термического расширения α · 10 <sup>-6</sup> , К <sup>-1</sup>	Liquid	5,457	10,65	12,343	13,727	14,896	15,909	16,603	17,603	18,326	18,966	19,594	20,156	20,679	21,169	21,629	22,063	22,473	22,862	23,233	23,585	
	Crystal alpha	7,362	9,139	10,978	11,791	12,848	13,796	14,663	15,467	16,220	16,929	17,603	18,247	18,864	19,458	20,332	20,588	21,128	21,653			
	Crystal beta	8,729	10,525	11,934	13,101	14,1	14,977	15,762	16,475	17,131	17,741	18,312	18,852	19,366	19,858	20,333	20,793	21,24	21,677	22,103	22,521	
	Al	23,58	24,9	26,5	28,2	30,4	33,5	37,3														
Предел прочности σ <sub>в</sub> , МПа	Ti										10,5											
	Al	115–234	65,3	55,0	37,3	28,4	23,3	12,2	8,3													
Условный предел текучести σ <sub>0,2</sub> , МПа	Ti	265–440		130–220																		
	Al	60	47	39																		
Модуль Юнга, ГПа	Ti	294	250	196	142	113																
	Al	71	70	66	56	50	50	27														
Предел ползучести σ <sub>п</sub> , МПа	Ti	115	110	101	88																	
	Al																					
9,5 – вдоль оси α; 5,6 – вдоль оси с																						
8,500																						
146 ГПа – в направлении оси α, 106 ГПа – в направлении оси с																						
Зависит от длительности приложения напряжения																						

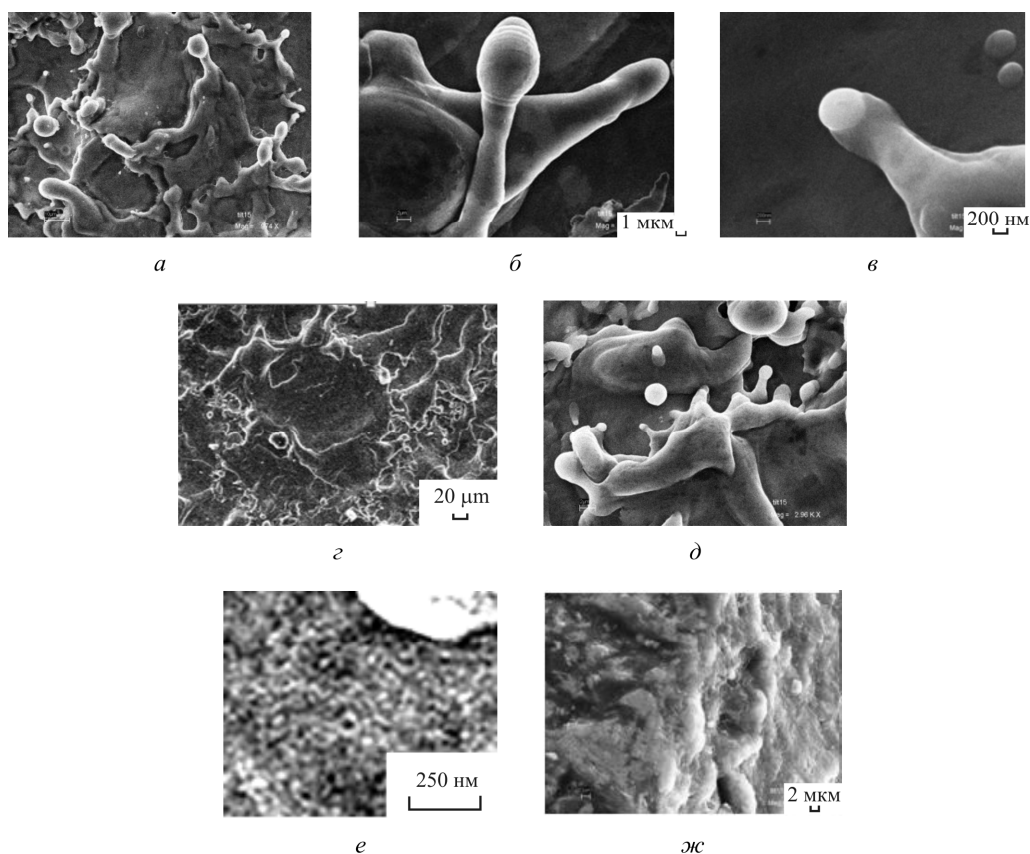


Рис. 1. Формирование кратеров на поверхности зоны эрозии алюминиевого катода, охлаждаемого оборотной водой: *а* – кратеры диаметром до 100 мкм; *б, в* – увеличенные фрагменты микроструй и микрокапель; *г* – кратеры до 500 мкм с высокоскоростными струями плазмы ионизированного материала катода по периметру кратера; *д, е* – тонкая структура поверхности катода с мелкой дендритной структурой поверхности; *ж* – неравномерное сравление зоны эрозии катода Al, охлаждаемого проточной водой

поверхности катода, даже при увеличении теплоемкости алюминия, дополнительно повышает температуру катодного пятна и скорость его испарения. Увеличение теплоемкости катода по сечению снижает эффективность отвода от него тепла. В-третьих, алюминий с многократно меньшими силами межатомного взаимодействия, характеризующимися энергией когезии, обладает большей чувствительностью к градиенту температуры по сечению катода по сравнению с титаном. В-четвертых, во время фазового превращения solid–liquid энтропия резко возрастает, что связано с переходом в состояние с большим беспорядком. В-пятых, уменьшение модуля упругости, предела текучести, предела прочности, ползучести и долговременной прочности алюминия изменяет поведение катода во время испарения.

Нарушение отвода тепла от отдельных участков катода при его испарении, вызванное повышением температуры оборотной воды, приводит к локальному плавлению поверхностного слоя в зоне эрозии катода и перераспределению концентрации

фазы по его поверхности. Дополнительное повышение температуры по всему сечению катода Al приводит к повышению пластичности и увеличению объема катода на 6,60 %. Увеличение размера кратеров до 500 мкм (см. рис. 1, *г*) и укрупнение глобулярных стержневых структур (см. рис. 1, *д*) является результатом потери прочности и жесткости, особенно поверхности катодного пятна, и снижения усилий и энергозатрат на его деформацию. Можно сделать вывод, что начальной температурой для изменения свойств алюминия принята температура тока фазового перехода ~913 К (см. табл. 3).

Однако анизотропия кристаллографической решетки и упругих свойств алюминия проявляется в меньшей степени, поскольку при фазовом превращении solid–liquid в условиях непрерывного изменения внешних параметров (температура и давление) плотность, теплопроводность, прочность и жесткость алюминия уменьшаются, теплоемкость достигает максимального значения и стабилизируется, энтропия и коэффициент термического

расширения повышаются. Постоянство температуры катодного пятна Al позволяет поддерживать постоянными вышеуказанные теплофизические и физико-механические свойства алюминия, снизить содержание liquid-фазы в плазменном потоке, уменьшить размер и количество макрочастиц. Стабилизация температуры катода по его поперечному сечению предотвращает деформацию катода и изменение его формы. Локальное плавление поверхности зоны эрозии Al катодного пятна наблюдается только в точках выхода различных дефектов (см. рис. 1, ж).

### Структурно-фазовые превращения в материале зоны эрозии титанового катода в зависимости от его теплового состояния

Результирующие термические (часто называемые внешними напряжениями) и механические напряжения в зоне эрозии катодного пятна Ti, вызванные его низкой теплопроводностью и градиентом температуры поперечного сечения катода, приводят к пластической деформации с развитием характерного рельефа (рис. 2, а) [34–37]. Пластинчатая структура материала катодного алюминия, характерная для определенных условий формирования, зависит не только от особенностей упругих и неупругих полей, но и от наличия своеобразной текстуры кристаллитов, когда их разориентации, по существу, анизотропны (монотекстура), поэтому нет препятствий для группировки кристаллитов на одной из плоскостей. Увеличение температуры оборотной воды приводит к недостаточному отводу тепла от зоны эрозии титанового катода, многократному увеличению коэффициента и скорости испарения зерен титана с различной кристаллографической ориентацией, а также к укрупнению пластинчатой структуры (рис. 2, б). Высокая плотность, прочность и низкая теплопроводность титана и небольшое ее увеличение не препятствуют развитию этого процесса. Увеличение пластинчатой структуры также вызывает рост давления газовой смеси.

Способ охлаждения титанового катода проточной водой и поддержание средней температуры Ti-катода постоянной обеспечивают режим работы катода, в котором средняя температура поверхности недостаточна для протекания тока из-за термоэлектронной эмиссии. В результате микроскопических взрывов титановый катод разрушается небольшими порциями, следы которых видны на электронных микрофотографиях в виде микроскопических кратеров (с диаметром 350–400 нм) (рис. 2, в). Образование конусообразных кратеров в зоне эрозии титанового катода, равномерно охлаждаемого проточной водой, может быть вызвано точечным включением загрязняющего материала с более низким  $K_{и}$  по сравнению с основным материалом (см. рис. 2, в). Изменение размера кратеров вдоль поверхности зоны эрозии титанового катода обусловлено анизотропией теплофизических свойств его поверхности. Наноразмерные зерна, образующиеся на поверхности кратеров, указывают на порядок испарения титана (рис. 2, г).

Температура изготовления литого катода Ti ( $T_{Ti} = 1733 \dots 1753$  К), температура испарения титана (1819 К) выше температуры его рекристаллизации (853–943 К) и температуры полиморфного превращения  $\alpha \rightarrow \beta$  (1155,5 К), однако ниже температуры фазового перехода solid–liquid (1933 К) и температуры плавления (1941 К) (см. табл. 2). Следовательно, титан испаряется в твердом состоянии (сублимируется) с протеканием фазового превращения из однофазной solid-системы в двухфазную solid–plasma-систему [28].

В условиях ограниченного охлаждения катода оборотной водой локального плавления зоны эрозии титанового катода не наблюдается, поскольку титан имеет более высокую температуру плавления  $T_{пл}$ . Первой причиной формирования рельефной поверхности с поверхностными неоднородностями зоны эрозии катодного пятна титана является анизотропия его модуля Юнга  $E$  и коэффициента теплового расширения  $\alpha$ , а также анизотропия в направлениях скорости испарения

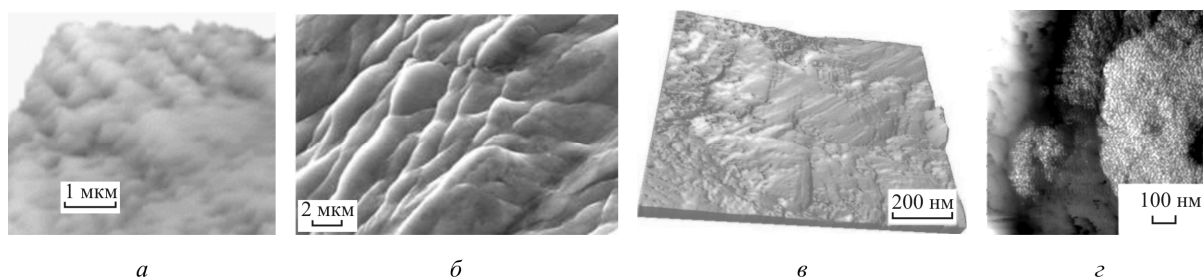


Рис. 2. Особенности рельефа поверхности Ti-катода: а – пластинчатая структура поверхности зоны эрозии Ti-катода; б – огрубление пластинчатой структуры (охлаждение оборотной водой). Микроскопические кратеры (в) с поверхностной мелкодисперсной структурой (г) при охлаждении Al-катода проточной водой [5, 38]

для зерен титана с различными кристаллографическими ориентациями (см. табл. 2). Вторая причина – увеличение  $\alpha$  и линейное уменьшение  $E$ , приводящее к расширению объема катода с потерей способности титана к упругой деформации и уменьшению вероятности потери геометрии в Ti. Третья причина – рост зерна при повышении температуры выше 1155,5 К, повышение пластичности и снижение прочностных свойств титана  $\sigma_b$  и  $\sigma_{0,2}$  (см. табл. 2). Четвертая вероятная причина – увеличение скорости испарения титана. Наконец, политропное превращение  $\alpha \rightarrow \beta$ , происходящее в титане без фазового превращения твердое тело  $\rightarrow$  жидкость, приводит к небольшому изменению теплопроводности и стабилизации энтропии. Однако уменьшение теплоемкости  $\beta$ -Ti снижает скорость испарения титана и может снизить его содержание в сформированной пленке  $Ti_{1-x}Al_xN$ . Однако катод становится менее чувствительным к отводу тепла с уменьшением теплоемкости по его поперечному сечению.

Меньшее образование кратеров на поверхности катода Ti без вытеснения расплава из кратеров объясняется тем, что потенциал ионизации титана выше, чем у алюминия, а теплопроводность титана значительно ниже, чем у алюминия. В результате этого катодные капли в потенциале дуги в парах титана выше и, соответственно, выделяемая тепловая мощность в катодном пятне больше, а скорость нагрева материала ниже. Таким образом, на поверхности титана, по сравнению с поверхностью алюминия, при отсутствии на них тонких диэлектрических пленок создаются менее благоприятные условия для размножения взрывоопасных центров электронной эмиссии, образующих катодное пятно за счет модификации поверхности [39, 40].

Наблюдается снижение скорости ползучести, особенно технического титана, что приводит к растрескиванию при постоянных термических и механических нагрузках. Трещин в зоне эрозии титанового катодного пятна не обнаружено.

### Выводы

При испарении катодного пятна Al при температуре выше его температуры плавления 933 К в нем происходит фазовое превращение: твердое вещество  $\rightarrow$  твердое вещество – жидкость. Катодно-дуговое испарение легкоплавкого алюминиевого катода наиболее чувствительно к температуре охлаждающей воды. Повышение температуры катодного пятна сопровождается уменьшением его теплопроводности в 2,5 раза, плотности на 15 %, физико-механических свойств  $\sigma_b$  и  $\sigma_{0,2}$  в 15–30 раз, резким снижением модуля сдвига  $G$ , который бо-

лее чувствителен к повышению температуры, увеличением коэффициента теплового расширения, ускорением кристаллографической анизотропии и увеличением энтропии в 2 раза. Они приводят к ускорению роста температуры катодного пятна и перераспределению концентрации фазы в нем, увеличению размера зерна, потере жесткости и увеличению объема катодного пятна, разориентации двухфазной системы.

Испарение титана происходит в твердом состоянии (сублимируется), а в катодном пятне образуется двухфазная твердоплазменная система. Температура разупрочнения титана медленнее, чем у Al из-за его свойств. Однако при ограниченном охлаждении КС наблюдается резкое снижение скорости ползучести (при  $T > 923$  К) и вязкости, увеличение размера зерна (при  $T \geq 1155,5$  К), анизотропное увеличение коэффициента теплового расширения, а также анизотропное уменьшение упругих характеристик – модуля Юнга  $E$  и модуля сдвига  $G$ . Это приводит к ухудшению способности титана к упругой деформации и увеличению его склонности к растрескиванию, ухудшению физико-механических свойств Ti, уменьшению количества титана в образующейся  $Ti_{1-x}Al_xN$ -пленке, нежелательному неравномерному росту объема катода и увеличению дефекта кристаллической решетки. Кроме того, скорость испарения титана и его неоднородность по поверхности катода и в пленке  $Ti_{1-x}Al_xN$  уменьшаются в условиях ограниченного охлаждения Ti.

Структурное и агрегатное состояние катода и макрочастиц является функцией теплофизических и физико-механических свойств катодных пятен материала Ti и Al, температуры и равномерности его распределения по поверхности и сечению катода. Структурно-дефектное состояние пленки  $Ti_{1-x}Al_xN$  является функцией теплофизических и физико-механических свойств соединений основных металлов пленки Ti и Al с азотом, равномерности нагрева подложки по поверхности и ее поперечному сечению. В результате исследования была установлена зависимость микроструктуры пленки  $Ti_{1-x}Al_xN$  как от давления газовой смеси, так и от начальной температуры и скорости нагрева пленки в процессе ее осаждения. Эта зависимость была определена на основе разработанной модели структурных зон пленки  $Ti_{1-x}Al_xN$ . Структура пленок  $Ti_{1-x}Al_xN$ , образующихся при испарении катодной дуги, аналогична структурам, образующимся на катодном пятне. Таким образом, прослеживается наследственность одновременно протекающих процессов в катодных пятнах и на подложке при катодно-дуговом испарении.



Выравнивание средней температуры катодного пятна способствует равномерному перераспределению и выравниванию концентрации фаз в зоне эрозии катодного пятна. Структурно-фазовые превращения в алюминии не протекают при поддержании средней температуры его поверхности ниже текущей температуры потока за счет термоионного излучения. Температура выравнивания по сечению титанового катода предотвращает образование термических и механических напряжений в катоде, приводящих к его деформации.

Чтобы сохранить теплофизические и физико-механические свойства металлов катодов Ti и Al, необходимо иметь равномерное распределение температуры по поверхности и поперечному сечению катодного пятна при его испарении. Промышленный метод охлаждения катодов проточной водой позволяет поддерживать постоянную температуру катодных пятен Ti и Al и предотвращать возникновение в них структурных и фазовых превращений. Неравновесные процессы, протекающие на поверхностях катода и образующихся пленках, аналогично обусловлены динамикой изменения тепловых условий протекающих в них процессов.

Для прогнозирования поведения катодов с целью обеспечения продления сроков эксплуатации и минимизации дефектности формируемых пленок необходимо иметь модели поведения их материалов в процессе испарения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания (FSNM-2020-0026 «Разработка теоретических и технологических основ и цифровых технологий проектирования функциональных композиционных материалов, многофункциональных нанопокрываний и диагностирующих информационных систем мониторинга высоконагруженных элементов авиационных конструкций»).*

#### Список литературы

1. Фролова В.П. Генерация многозарядных и многокомпонентных импульсных ионных пучков на основе сильноточной вакуумной дуги микросекундной длительности: дис. ... канд. физ.-мат. наук / Ин-т сильноточной электроники. – Томск, 2018. – 135 с.
2. Батраков А.В. Электрическая изоляция и разряд в вакууме [Электронный ресурс] / Нац. исслед. Том. политехн. ун-т, Ин-т физ. выс. технологий. – Томск: TPU Moodle, 2014. – URL: <https://stud.lms.tpu.ru/course/info.php?id=251> (дата обращения: 18.05.2020).
3. Lisenkov A.A., Burov I.V., Pavlova V.A. Adjustment of the plasma density in the process of coating formation // Plasma Devices and Operations. – 2002. – Vol. 10, no. 1. – P. 9–15.
4. Juttner B., Kleberg I. The retrograde motion of arc cathode spots in vacuum // J. of Physics D: Applied Physics. – 2000. – Vol. 33, no. 16. – P. 2025–2036.

5. Морфологические особенности рельефа на поверхности мишеней при бомбардировке ионами / А.Ф. Белянин, М.И. Самойлович, Д.В. Александров, П.В. Пашенко, М.А. Тимофеев, А.Л. Каменева, А.Л. Талис // Материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф. «Высокие технологии в промышленности России (материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники)» и 14-го Междунар. симп. «Тонкие пленки в электронике», г. Москва, 9–11 сентября, 2004. – М., 2014. – С. 302–310.

6. Барченко В.Т., Ветров Н.З., Лисенков А.А. Технологические вакуумно-дуговые источники плазмы / С-Петерб. гос. электротехн. ун-т «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). – СПб., 2013. – 242 с.

7. Гончаров В.Д., Лисенков А.А. Создание электрофизического оборудования на основе вакуумно-дугового разряда // Вакуумная техника и технология. – 2008. – Т. 18, № 2. – С. 67–74.

8. Anders A. Cathodic arcs: from fractal spots to energetic condensation. – New York: Springer Inc., 2008. – 555 p.

9. Вакуумно-дуговой разряд на интегрально-холодном катоде / А.А. Лисенков, В.Т. Барченко, В.Д. Гончаров, А.С. Жеухин // Инструмент и технологии. – 2010. – Вып. 34. – С. 43–56.

10. Preparation of CuAlO<sub>2</sub> thin films by radio frequency magnetron sputtering and the effect of sputtering on the target surface / T. Ehara, R. Iizaka, M. Abe, K. Abe, T. Sato // J. of Ceramic Sci. and Techn. – March 2017. – Vol. 8, iss. 1. – P. 7–12.

11. Белянин А.Ф., Каменева А.Л., Самойлович М.И. Изучение процесса формирования наноструктурированных покрытий на основе Ti–B–Si–N при магнетронном распылении // Высокие технологии в промышленности России: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., г. Москва, 6–8 сентября 2006 г. – М., 2006. – С. 211–221.

12. Mubarak A., Hamzah E., Toff M.R.M. Study of macrodroplet and growth mechanisms with and without ion etchings on the properties of TiN coatings deposited on HSS using cathodic arc physical vapour deposition technique // Materials Sci. and Eng.: A. – 2008. – Vol. 474 (1–2). – P. 236–242.

13. Модель расплескивания жидкого металла в катодном пятне вакуумного дугового разряда / М.А. Гашков, Н.М. Зубарев, О.В. Зубарева, Г.А. Месяц, И.В. Уймаинов // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики (ЖЭТФ). – 2016. – Т. 149, вып. 4. – С. 896–908.

14. Boxman R.L., Goldsmith S. Macroparticle contamination in cathodic arc coatings: Generation, transport and control // Surf. Coat. Technol. – 1992. – Vol. 52. – P. 39–50.

15. Эйзнер Б.А. Научные основы технологических процессов нанесения многокомпонентных покрытий различного функционального назначения вакуумным электродуговым методом: дис. ... д-ра техн. наук / Белорус. гос. ун-т. – Минск, 1993. – 463 с.

16. Модификация поверхности катода магнетронной распылительной системы / В.В. Бобков, С.С. Алимов, В.В. Андреев, Ю.В. Слюсаренко, Р.И. Старовойтов // Известия РАН. Серия физическая. – 2004. – Т. 68, № 3. – С. 332–335.

17. Antsiferov V.N., Kameneva A.L. Experimental study of the structure of multicomponent nanostructured coat-

ings on the basis of Ti–Zr–N alloys formed by ionic plasma methods // Russian J. of Non-Ferrous Metals. – 2007. – Vol. 48, no. 6. – P. 485–499.

18. Kameneva A.L., Karmanov V.V., Dombrovsky I.V. Physical and mechanical properties of  $Ti_{1-x}Al_xN$  thin films prepared by different ion-plasma methods // Research J. of Pharmaceutical, Biolog. and Chem. Sci. – 2014. – Vol. 5, no. 6. – P. 762–771.

19. Antonova N.M. Adhesion and mechanical properties of polyanionic cellulose-Al-Zr protective coatings // IOP Conf. Series: Materials Sci. and Eng. – 2019. – Vol. 665. – P. 012003.

20. Влияние покрытий ZrN, нанесенных магнетронным распылением, на коррозию сплава ВК8 / И.И. Замалетдинов, В.И. Кичигин, А.Л. Каменева, А.А. Онянов, А.Ю. Клочков // Коррозия: материалы, защита. – 2011. – № 10. – С. 35–41.

21. Kameneva A.L. The influence of aluminum on the texture, microstructure, physical, mechanical and tribological properties of  $Ti_{1-x}Al_xN$  thin films // Research J. of Pharmaceutical, Biolog. and Chem. Sci. – 2014. – Vol. 5, no. 6. – P. 965–975.

22. Каменева А.Л. Установление корреляционной связи процесса формирования пленок на основе Ti–Al–N методом электродугового испарения и процессами, протекающими на поверхности испаряемых катодов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2010. – Т. 12, № 4. – С. 138–145.

23. Using  $Ti_{1-x}Al_xN$  coating to enhance corrosion resistance of tool steel in sodium chloride solution / A.L. Kameneva, V.I. Kichigin, T.O. Soshina, V.V. Karmanov // Research J. of Pharmaceutical, Biolog. and Chem. Sci. – 2014. – Vol. 5, no. 5. – P. 1148–1156.

24. Kameneva A.L., Karmanov V.V., Dombrovsky I.V. Physical and mechanical properties of  $Ti_{1-x}Al_xN$  thin films prepared by different ion-plasma methods // Research J. of Pharmaceutical, Biolog. and Chem. Sci. – 2014. – Vol. 5, no. 6. – P. 762–771.

25. Анциферов В.Н., Каменева А.Л. Изучение морфологических особенностей рельефа на поверхности титановой мишени при бомбардировке ионами // От наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий к наноиндустрии: тез. докл. Всерос. конф. с междунар. интернет-участием, г. Ижевск, 27–29 июня 2007 г. – Ижевск, 2007. – С. 15.

26. Stull D.R., Prophet H. JANAF, Thermochemical Tables / U.S. Dept. of Commerce. – Washington, D.C., 1971. – URL: <https://www.bestreferat.ru/referat-181584.html> (accessed 18 May 2020).

27. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.

28. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров: учеб. для вузов. – М.: Радио и связь, 2007. – 464 с.

29. Aluminium – Properties and physical metallurgy american society for metals / ed by E. Hatch; Metals Park. – Ohio, 1984. – URL: [https://books.google.ru/books?id=dUgGsEMhoUC&redir\\_esc=y](https://books.google.ru/books?id=dUgGsEMhoUC&redir_esc=y) (accessed 18 May 2020).

30. Любимов Г.А., Раховский В.И. Катодное пятно вакуумной дуги // Успехи физических наук. – 1978. – Т. 125, № 4. – С. 665–706.

31. Effect of work function and cohesive energy of the constituent phases of Ti–50 at. % Al cathode during arc deposition of Ti–Al–N coatings / B. Syed, M.J. Jöesaar, P. Polcik, S. Kolozsvári, G. Håkansson, L. Johnson, M. Ahlgren, M. Odén // Surf. and Coat. Techn. – 2019. – Vol. 357. – P. 393–401.

32. TALAT Lecture 1501. Aluminium: physical properties, characteristics and alloys. – URL: <https://ru.scribd.com/document/21293980/TALAT-Lecture-1501-Properties-Characteristics-and-Alloys-of-Aluminium> (accessed 18 May 2020).

33. Илларионов А.Г., Попов А.А. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учеб. пособие / под ред. С.Л. Демакова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 137 с.

34. Kameneva A.L., Gusel'nikova L.N., Soshina T.O. An influence of a substrate voltage bias and temperature conditions on structure and phase modification in single-component ion-plasmas' films // e-J. of Surf. Sci. and Nanotechn. – 2011. – Vol. 9. – P. 34–39.

35. Kameneva A.L. Model of structural zones of the tin and tialn coatings formed by the arc evaporation of metal in an active gas medium // Russian J. of Non-Ferrous Metals. – 2013. – Vol. 54, no. 6. – P. 541–547.

36. Kameneva A.L. Models of structural zones for sputtered and evaporated thin films // Research J. of Pharmaceutical, Biolog. and Chem. Sci. – 2015. – Vol. 6, no. 5. – P. 464–474.

37. Kameneva A.L. Evolution of the film structure in the various evaporation processes // Research J. of Pharmaceutical, Biolog. and Chem. – 2015. – Vol. 6, no. 1. – P. 1381–1391.

38. Морфологические особенности рельефа на поверхности мишеней при бомбардировке ионами / А.Ф. Белянин, М.И. Самойлович, Д.В. Александров, П.В. Пашенко, М.А. Тимофеев, А.Л. Каменева, А.Л. Талис // Высокие технологии в промышленности России (материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники), г. Москва, 9–11 сентября 2004 г. / ОАО ЦНИТИ «Техно-маш». – М., 2004. – С. 302–310.

39. Месяц Г.А. Этоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. – М.: Наука, 2000. – 424 с.

40. Эрозионные процессы в малогабаритном вакуумном разряднике с искровым поджигом / В.И. Асюнин, С.А. Бушин, С.Г. Давыдов, А.Н. Долгов, А.В. Пилюшенко, А.А. Пшеничный, В.О. Ревазов, Р.Х. Якубов // Успехи прикладной физики. – 2015. – Т. 3, № 6. – С. 542–552.

## References

1. Frolova V.P. Generatsiia mnogozariadnykh i mnogokomponentnykh impul'snykh ionnykh puchkov na osnove sil'notochnoi vakuumnoi dugi mikrosekundnoi dlitel'nosti [Generation of multi-charge and multi-component pulsed ion beams based on a high-current vacuum microsecond arc]. PhD theses. Tomsk, 2018, 135 p.

2. Batrakov A.V. Elektricheskaya izolyatsiia i razriad v vakuume [Electrical isolation and discharge in vacuum]. Natsional'nyi issledovatel'skii Tomskii politekhnicheskii universitet, Institut fiziki vysokikh tekhnologii. TPU Moodle, 2014. URL: <https://stud.lms.tpu.ru/course/info.php?id=251> (accessed 18 May 2020).

3. Lisenkov A.A., Burov I.V., Pavlova V.A. Adjustment of the plasma density in the process of coating formation. *Plasma Devices and Operations*, 2002, vol. 10, no. 1, pp. 9–15.
4. Juttner B., Kleberg I. The retrograde motion of arc cathode spots in vacuum. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2000, vol. 33, no. 16, pp. 2025–2036.
5. Belianin A.F., Samoilovich M.I., Aleksandrov D.V., Pashchenko P.V., Timofeev M.A., Kameneva A.L., Talis A.L. Morfologicheskie osobennosti rel'efa na poverkhnosti mishenei pri bombardirovke ionami [Morphological features of the relief on the surface of the targets during ion bombardment]. *Materialy 10-i Mezhdunar. nauchno-tekhnicheskai konferentsii «Vysokie tekhnologii v promyshlennosti Rossii (materialy i ustroistva funktsional'noi elektroniki i mikro-fotoniki)» i 14-go Mezhdunarodnogo simpoziuma «Tonkie plenki v elektronike»*. Moscow, 2014, pp. 302–310.
6. Barchenko V.T., Vetrov N.Z., Lisenkov A.A. Tekhnologicheskie vakuumno-dugovye istochniki plazmy [Process Vacuum-arc plasma sources]. Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi elektrotekhnicheskii universitet «LETI» im. V.I. Ul'ianova (Lenina), 2013, 242 p.
7. Goncharov V.D., Lisenkov A.A. Sozдание elektrofizicheskogo oborudovaniia na osnove vakuumno-dugovogo razriada [Development of electrophysical equipment on the basis of vacuum-arc discharge]. *Vakuumnaia tekhnika i tekhnologiya*, 2008, vol. 18, no. 2, pp. 67–74.
8. Anders A. Cathodic arcs: from fractal spots to energetic condensation. New York: Springer Inc., 2008, 555 p.
9. Lisenkov A.A., Barchenko V.T., Goncharov V.D., Zheukhin A.S. Vakuumno-dugovoi razriad na integral'no-kholodnom katode [Vacuum-arc discharge on integral cold cathode]. *Instrument i tekhnologii*, 2010, iss. 34, pp. 43–56.
10. Ehara T., Iizaka R., Abe M., Abe K., Sato T. Preparation of CuAlO<sub>2</sub> thin films by radio frequency magnetron sputtering and the effect of sputtering on the target surface. *Journal of Ceramic Sci. and Techn.*, March 2017, vol. 8, iss. 1, pp. 7–12.
11. Belianin A.F., Kameneva A.L., Samoilovich M.I. Izuchenie protsessa formirovaniia nanostrukturirovannykh pokrytii na osnove Ti–B–Si–N pri magnetronnom raspylenii [Study of the formation process of nanostructured coatings based on Ti–B–Si–N at magnetron sputtering]. *Vysokie tekhnologii v promyshlennosti Rossii: materialy XII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Moscow, 2006, pp. 211–221.
12. Mubarak A., Hamzah E., Toff M.R.M. Study of macrodroplet and growth mechanisms with and without ion etchings on the properties of TiN coatings deposited on HSS using cathodic arc physical vapour deposition technique. *Materials Sci. and Eng.: A.*, 2008, vol. 474 (1–2), pp. 236–242.
13. Gashkov M.A., Zubarev N.M., Zubareva O.V., Mesiats G.A., Uimanov I.V. Model' raspleskivaniia zhidkogo metalla v katodnom piatne vakuumnogo dugovogo razriada [Model of liquid metal spraying in the cathode spot of vacuum arc discharge]. *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki (ZhETF)*, 2016, vol. 149, iss. 4, pp. 896–908.
14. Boxman R.L., Goldsmith S. Macroparticle contamination in cathodic arc coatings: Generation, transport and control. *Surf. Coat. Technol.*, 1992, vol. 52, pp. 39–50.
15. Eizner B.A. Nauchnye osnovy tekhnologicheskikh protsessov naneseniia mnogokomponentnykh pokrytii razlichnogo funktsional'nogo naznacheniiia vakuumnym elektrodugovym metodom [Scientific bases of technological processes of applying multi-component coatings for various functional purposes by vacuum electric arc method]. PhD theses. Minsk, 1993, 463 p.
16. Bobkov V.V., Alimov S.S., Andreev V.V., Sliusarenko Iu.V., Starovoitov R.I. Modifikatsiia poverkhnosti katoda magnetronnoi raspylitel'noi sistemy [Modification of the cathode surface of a magnetron spraying system]. *Izvestiia RAN. Seriya fizicheskai*, 2004, vol. 68, no. 3, pp. 332–335.
17. Antsiferov V.N., Kameneva A.L. Experimental study of the structure of multicomponent nanostructured coatings on the basis of Ti–Zr–N alloys formed by ionic plasma methods. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2007, vol. 48, no. 6, pp. 485–499.
18. Kameneva A.L., Karmanov V.V., Dombrovsky I.V. Physical and mechanical properties of Ti1-khAlkN thin films prepared by different ion-plasma methods. *Research Journal of Pharmaceutical, Biolog. and Chem. Sci.*, 2014, vol. 5, no. 6, pp. 762–771.
19. Antonova N.M. Adhesion and mechanical properties of polyanionic cellulose–Al–Zr protective coatings. *IOP Conf. Series: Materials Sci. and Eng.*, 2019, vol. 665, pp. 012003.
20. Zamaletdinov I.I., Kichigin V.I., Kameneva A.L., Onianov A.A., Klochkov A.Iu. Vliianie pokrytii ZrN, nanesennykh magnetronnym raspyleniem, na korroziiu splava VK8 [Influence of ZrN coatings applied by magnetron sputtering on corrosion of BK8 alloy]. *Korroziia: materialy, zashchita*, 2011, no. 10, pp. 35–41.
21. Kameneva A.L. The influence of aluminum on the texture, microstructure, physical, mechanical and tribological properties of Ti1-xAlxN thin films. *Research Research J. of Pharmaceutical, Biolog. and Chem. Sci.*, 2014, vol. 5, no. 6, pp. 965–975.
22. Kameneva A.L. Ustanovlenie korreliatsionnoi svyazi protsessa formirovaniia plenok na osnove Ti–Al–N metodom elektrodugovogo ispareniiia i protsessami, protekaiushchimi na poverkhnosti ispariaemykh katodov [Establishment of a correlation relation between the process of forming films based on Ti–Al–N by the method of electro-arc evaporation and the processes occurring on the surface of the evaporated cathodes]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2010, vol. 12, no. 4, pp. 138–145.
23. Kameneva A.L., Kichigin V.I., Soshina T.O., Karmanov V.V. Using Ti1-khAlkN coating to enhance corrosion resistance of tool steel in sodium chloride solution. *Research J. of Pharmaceutical, Biolog. and Chem. Sci.*, 2014, vol. 5, no. 5, pp. 1148–1156.
24. Kameneva A.L., Karmanov V.V., Dombrovsky I.V. Physical and mechanical properties of Ti1-khAlkN thin films prepared by different ion-plasma methods. *Research J. of Pharmaceutical, Biolog. and Chem. Sci.*, 2014, vol. 5, no. 6, pp. 762–771.
25. Antsiferov V.N., Kameneva A.L. Izuchenie morfologicheskikh osobennostei rel'efa na poverkhnosti titanovoi misheni pri bombardirovke ionami [Study of morphological features of the relief on the surface of a titanium target during ion bombardment]. *Ot nanostruktur, nanomate-*

rialov i nanotekhnologii k nanoindustrii: tezisy dokladov Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym internet-uchastiem. Izhevsk, 2007, p. 15.

26. Stull D.R., Prophet H. JANAF, Thermochemical Tables. U.S. Dept. of Commerce. Washington, D.C., 1971. URL: <https://www.bestreferat.ru/referat-181584.html> (accessed 18 May 2020).

27. Zinov'ev V.E. Teplofizicheskie svoistva metal-lov pri vysokikh temperaturakh [Thermophysical properties of metals at high temperatures]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 384 p.

28. Cherniaev V.N. Tekhnologiya proizvodstva integral'nykh mikroskhem i mikroprotessorov [Production technology of integrated circuits and microprocessors]. Moscow: Radio i svyaz', 2007, 464 p.

29. Aluminium – Properties and physical metallurgy american society for metals. Ed. E. Hatch; Metals Park, Ohio, 1984. – URL: [https://books.google.ru/books?id=dUgzGsEMhoUC&redir\\_esc=y](https://books.google.ru/books?id=dUgzGsEMhoUC&redir_esc=y) (accessed 18 May 2020).

30. Liubimov G.A., Rakhovskii V.I. Katodnoe piatno vakuumnoi dugi [Cathode spot of vacuum arc]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1978, vol. 125, no. 4, pp. 665–706.

31. Syed B., Jöesaar M.J., Polcik P., Kolozsvari S., Håkansson G., Johnson L., Ahlgren M., Odén M. Effect of work function and cohesive energy of the constituent phases of Ti – 50 at. % Al cathode during arc deposition of Ti–Al–N coatings. *Surf. and Coat. Techn.*, 2019, vol. 357, pp. 393–401.

32. TALAT Lecture 1501. Aluminium: physical properties, characteristics and alloys. URL: <https://ru.scribd.com/document/21293980/TALAT-Lecture-1501-Properties-Characteristics-and-Alloys-of-Aluminium> (accessed 18 May 2020).

33. Illarionov A.G., Popov A.A. Tekhnologicheskie i ekspluatatsionnye svoistva titanovykh splavov: ucheb. posobie [Technological and operational properties of titanium alloys]. Ed. S.L. Demakova. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta, 2014. – 137 s.

34. Kameneva A.L., Gusel'nikova L.N., Soshina T.O. An influence of a substrate voltage bias and temperature conditions on structure and phase modification in single-component ion-plasmas' films. *e-Journal of Surf. Sci. and Nano-techn.*, 2011, vol. 9, pp. 34–39.

35. Kameneva A.L. Model of structural zones of the tin and tialn coatings formed by the arc evaporation of metal in an active gas medium. *Russian J. of Non-Ferrous Metals*, 2013, vol. 54, no. 6, pp. 541–547.

36. Kameneva A.L. Models of structural zones for sput-tered and evaporated thin films. *Research J. of Phar-*

*maceuti-cal, Biolog. and Chem. Sci.*, 2015, vol. 6, no. 5, pp. 464–474.

37. Kameneva A.L. Evolution of the film structure in the various evaporation processes. *Research J. of Pharmaceutical, Biolog. and Chem.*, 2015, vol. 6, no. 1, pp. 1381–1391.

38. Belianin A.F., Samoilovich M.I., Aleksandrov D.V., Pashchenko P.V., Timofeev M.A., Kameneva A.L., Talis A.L. Morfologicheskie osobennosti rel'efa na poverkhnosti mishenei pri bombardirovke ionami [Morphological features of the relief on the surface of the targets during ion bombardment]. *Vysokie tekhnologii v promyshlennosti Rossii (materialy i ustroistva funktsional'noi elektroniki i mikrofonotiki)*. Moscow, 2004, pp. 302–310.

39. Mesiat's G.A. Ektony v vakuumno razriade: proboi, iskra, duga [Vacuum discharge tectons: breakdown, spark, arc.]. Moscow: Nauka, 2000, 424 p.

40. Asiunin V.I., Bushin S.A., Davydov S.G., Dolgov A.N., Piliushenko A.V., Pshenichnyi A.A., Revazov V.O., Iakubov R.Kh. Eroziionnye protsessy v malogabaritnom vakuumno razriadnike s iskrovym podzhigom [Erosion processes in a small spark-ignition vacuum arrester]. *Uspekhi prikladnoi fiziki*, 2015, vol. 3, no. 6, pp. 542–552.

Получено 24.04.2020

Опубликовано 30.06.2020

#### Сведения об авторах

**Каменева Анна Львовна** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: [annkam789@mail.ru](mailto:annkam789@mail.ru).

**Каменева Наталья Владимировна** (Пермь, Россия) – магистр гр. ЭКМ-18-1м Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: [knv143@mail.ru](mailto:knv143@mail.ru).

#### About the authors

**Anna I. Kameneva** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: [annkam789@mail.ru](mailto:annkam789@mail.ru).

**Natalya B. Kameneva** (Perm, Russian Federation) – Master of Sciences, gr. EKM-18-1, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: [knv143@mail.ru](mailto:knv143@mail.ru).