

**FORMATION OF HIGH-ENTROPY TiZrVCrAl COATING  
ON THE SURFACE OF THE Ti-6Al-4V TITANIUM ALLOY  
AT DIFFERENT TECHNOLOGICAL PARAMETERS**

*Yana Nikolaevna Savina*<sup>1</sup>, *Roman Ruslanovich Valiev*<sup>1a</sup>, *Almaz Yunirovich Nazarov*<sup>1</sup>,  
*Aleksey Aleksandrovich Nikolaev*<sup>1</sup>, *Kamil Nurullaevich Ramazanov*<sup>1</sup>,  
*Stanislav Vladimirovich Ovchinnikov*<sup>2</sup>, *Alan Rustamovich Khaitkulov*<sup>1</sup>,  
*Galina Aleksandrovna Filippova*<sup>1</sup>, *Vitalii Vladimirovich Sanin*<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi St., 450076, Ufa, Russia

<sup>2</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2/4 Akademicheskoy pr., 634055, Tomsk, Russia

<sup>3</sup> JSC "Giredmet" n.a. N.P. Sazhin, 2 Elektrodnaya Str., Bld. 1, 111524, Moscow, Russia

<sup>4</sup> National University of Science and Technology "MISIS", 4 Leninskiy pr., Bld. 1, 119049, Moscow, Russia

<sup>a</sup> rovaliev@gmail.com

**ABSTRACT**

The paper presents the results of the characterization of single-layer high-entropy TiZrVCrAl coatings deposited by the vacuum-arc method on substrates from the structural titanium alloy VT6 (Ti-6Al-4V) by 4 different modes. The used deposition modes were developed taking into account the influence of the arc evaporator current, bias voltage and gas pressure in the chamber on the process of coatings formation, which allowed to select the chemical composition of the high-entropy coatings and to establish the regularities of their elemental composition formation. According to the results of the conducted studies, the most optimal modes of coating deposition were determined according to the criteria of microhardness, adhesive strength and chemical composition for further development of the architecture of multilayer high-entropy coatings on the surface of the Ti-6Al-4V titanium alloy with an ultrafine-grained structure.

**KEYWORDS**

Titanium alloy; high-entropy coating; microhardness; adhesive strength; vacuum-arc deposition method; coating deposition parameters.

**ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО ПОКРЫТИЯ  
TiZrVCrAl НА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT6  
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ**

*Яна Николаевна Савина*<sup>1</sup>, *Роман Русланович Валиев*<sup>1a</sup>, *Алмаз Юнирович Назаров*<sup>1</sup>,  
*Алексей Александрович Николаев*<sup>1</sup>, *Камиль Нуруллаевич Рамазанов*<sup>1</sup>,  
*Станислав Владимирович Овчинников*<sup>2</sup>, *Алан Рустамович Хаиткулов*<sup>1</sup>,  
*Галина Александровна Филиппова*<sup>1</sup>, *Виталий Владимирович Санин*<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Уфимский университет науки и технологий, ул. Заки Валиди, 32, 450076, Уфа, Россия

<sup>2</sup> Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, пр. Академический, 2/4, 634055, Томск, Россия

<sup>3</sup> АО «Гиредмет» им. Н.П. Сагина, ул. Электродная, 2, стр. 1, 111524, Москва, Россия

<sup>4</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский пр-т, 4, стр. 1, 119049, Москва, Россия

<sup>a</sup> rovaliev@gmail.com

---

## АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты аттестации однослойных высокоэнтروпийных покрытий системы TiZrVCrAl, осажденных вакуумно-дуговым методом на подложки конструкционного титанового сплава ВТ6 по 4 различным режимам. Используемые режимы осаждения разработаны с учетом оценки влияния тока дугового испарителя, напряжения смещения и давления газа в камере на процесс формирования покрытий, что позволило подобрать химический состав высокоэнтропийных покрытий и установить закономерности формирования их элементного состава. По результатам проведенных исследований были определены наиболее оптимальные режимы осаждения покрытия по критериям микротвердости, адгезионной прочности и химическому составу для дальнейшей разработки архитектуры многослойных высокоэнтропийных покрытий на поверхность титанового сплава ВТ6 с ультрамелкозернистой структурой.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Титановый сплав; высокоэнтропийное покрытие; микротвердость; адгезионная прочность; метод вакуумно-дугового осаждения; параметры осаждения покрытия.

### Введение

На сегодняшний день повышение эксплуатационных свойств ответственных изделий в газотурбинных двигателях (ГТД), таких как жаростойкость, износостойкость, коррозионная стойкость, прочность является особенно важным и актуальным направлением для развития отечественного авиадвигателестроения и импортозамещения. Для ответственных изделий ГТД из титановых сплавов, работающих в экстремальных условиях, состояние поверхности играет важную роль для предотвращения внешних воздействий агрессивных сред, и поэтому возникает необходимость защиты поверхности покрытиями [1–3]. На протяжении последних десятилетий разработки в области защитных покрытий активно развивались. Различные типы керамических [4, 5], порошковых [6] и композиционных покрытий [7, 8], содержащих новые углеродные наноматериалы, продемонстрировали возможность их применения

в качестве износостойких, коррозионностойких, антифрикционных покрытий.

Одним из перспективных направлений повышения свойств покрытий является применение высокоэнтропийных сплавов (ВЭС), также известных как многокомпонентные или сплавы с несколькими основными элементами, состоящих из не менее 5 основных элементов, где содержание каждого элемента варьируется от 5 до 35 ат.% [9, 10]. Смешивание элементов в этих соотношениях приводит к образованию простых фаз твердого раствора, повышению механических характеристик, термостабильности, износостойкости, коррозионной стойкости ввиду особенностей химического состава и структуры ВЭС – высокой энтропии смешения, сильного искажения кристаллической решетки и замедленной диффузии [11–13].

Защитные покрытия из высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) за счет своего уникального химического состава и структуры

обладают повышенной твердостью, износостойкостью, термической стабильностью и стойкостью к окислению по сравнению с одно- или двухэлементными нитридными покрытиями, что делает их весьма перспективными для машиностроения и авиадвигателестроения [14–16]. Особый интерес представляют высокоэнтропийные нитридные покрытия, качество которых зависит от метода осаждения, обеспечивающего однородность состава и однофазность структуры. Среди многих вариантов физического осаждения из паровой фазы (PVD) наиболее эффективным и широко распространенным является вакуумно-дуговое осаждение, при котором управление процессами осаждения происходит за счет регулирования основных технологических параметров в широком диапазоне [17–19]. Вакуумно-дуговые высокоэнтропийные покрытия, состоящие из переходных металлов IV–VI групп (Ti, Zr, Hf, V, Nb, Cr, Mo, W), обладают высокой твердостью и износостойкостью [20, 21]. Однако для формирования ВЭС покрытий с повышенными свойствами необходимо подобрать параметры осаждения, такие как напряжение смещения, ток дугового испарителя и давление газа в камере, которые влияют на элементный состав покрытия.

Целью настоящей работы является определение оптимальных режимов осаждения высокоэнтропийного покрытия системы TiZrVCrAl вакуумно-дуговым методом на поверхность титанового сплава VT6, которые будут взяты за основу при разработке многослойных и мультислойных ВЭС покрытий. Проведена оценка микротвердости,

химического состава, толщины покрытия и адгезионной прочности однослойных высокоэнтропийных покрытий, полученных при варьировании трех технологических параметров осаждения – тока дугового испарителя, напряжения смещения и давления газа в камере.

## 1. Материал и методики исследования

Для изготовления экспериментальных образцов-подложек использовали конструкционный титановый сплав VT6 (Ti-6Al-4V) в виде горячекатаного прутка диаметром 20 мм, изготовленный ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА». Химический состав титанового сплава VT6 представлен в табл. 1.

Пруток титанового сплава VT6 нарезали на образцы диаметром 20 мм и толщиной 2,5 мм при помощи электроэрозионного станка. Перед осаждением покрытия поверхность образца подложки механически шлифовали на шлифовальной машине последовательно абразивной бумагой № 120#, 600#, 1200#, 2500#. После механической шлифовки поверхность образцов очищали в ультразвуковой ванне с использованием изопропилового спирта в течение 15 минут.

Для получения катода из высокоэнтропийного сплава заданного химического состава совместно с АО «Гиредмет» (г. Москва) был использован метод вакуумно-дуговой плавки (ВДП) с не расходуемым электродом в контролируемой атмосфере. На первом этапе выплавки образцов сплава производили шихтовку сплавов на заданный состав. Расчетный химический состав сплава представлен в табл. 2.

**Таблица 1.** Химический состав сплава VT6

**Table 1.** Chemical composition of the VT6 alloy

Ti	Al	V	Fe	Zr	Si	Примесей/ Impurities
89,75	5,97	4,05	0,10	0,005	0,02	Прочих 0,1/ Others 0.1

Следующим этапом была укладка шихтовых материалов в ячейки кристаллизатора. Основными правилами в укладке шихтовых материалов является первичное равномерное распределение материалов по объему кристаллизатора, а также выкладка более тугоплавких металлов на поверхность. Далее камера печи откачивалась до глубины максимального вакуума – 2,5–6,0 Па и заполнялась аргоном (марка 4.8 ТУ 20.11.11-006-45905715-2017). Химический состав получившегося слитка высокоэнтروпийного сплава представлен в табл. 3.

Для возможности осаждения покрытия в вакуумно-плазменной установке была изготовлена специальная оснастка для кре-

пления слитка из ВЭС путем припаивания слитка к титановому катоду из сплава ВТ1-0 (рис. 1). В данной работе покрытие осаждали вакуумно-дуговым методом в среде азота.

Осаждение покрытия проводили на установке ННВ 6.6-И1 (рис. 2), оборудованной двумя электродуговыми испарителями, которые расположены на противоположных сторонах вакуумной камеры при одновременном проведении плазменного ассистирования сильноточным дуговым разрядом, генерируемым плазменным источником с накальным катодом (ПИНК), расположение которого обеспечивает пересечение потоков металлической и газовой плазмы.

**Таблица 2.** Расчетный химический состав высокоэнтропийного сплава

**Table 2.** Calculated chemical composition of the high-entropy alloy

Техническое задание / Technical task	Ti	Zr	Al	V	Cr
Вес.%/ Wt.%	17,6	33,8	10,0	18,8	19,3
	–	–	–	–	–
	17,8	34,0	10,2	19,0	19,4

**Таблица 3.** Химический состав высокоэнтропийного сплава

**Table 3.** Chemical composition of the high-entropy alloy

Ti, %	Zr, %	V, %	Cr, %	Al, %
61,57	6,6	5,4	2,64	10,2

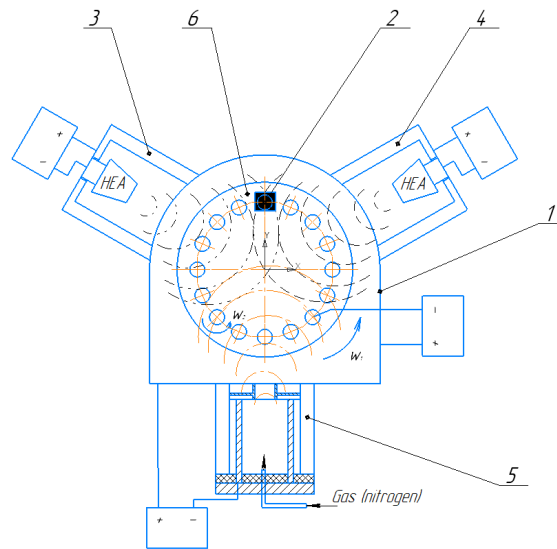


**Рис. 1.** Оснастка для крепления слитка из ВЭС

**Fig. 1.** Equipment for fixing the ingot from the HEA

В табл. 4 представлены режимы осаждения покрытия, которые были подобраны с целью оценки влияния трех технологиче-

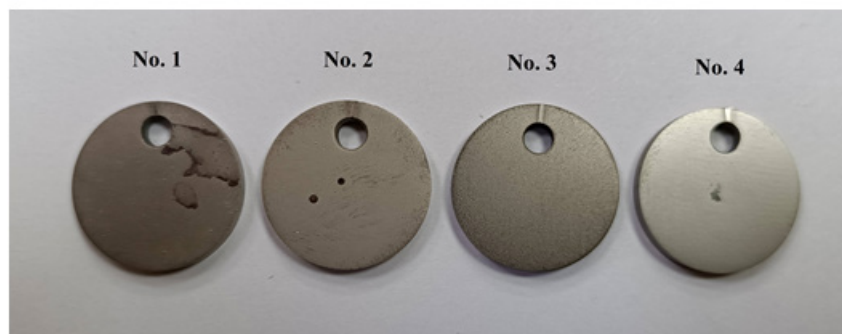
ских параметров на процесс осаждения покрытий. На рис. 3 показаны образцы с покрытием, осажденные по режимам №1–№4.



**Рис. 2.** Схема установки ННВ 6.6-II  
**Fig. 2.** Scheme of the NNV 6.6-II facility

**Таблица 4.** Параметры осаждения высокоэнтропийного покрытия  
**Table 4.** High-entropy coating deposition parameters

№ режима / Mode No.	Напряжение смещения, U, В / Bias voltage, U, V	Ток дугового испарителя, I, А / Arc evaporator current, I, A	Давление газа в камере, P, Па / Gas pressure in the chamber, P, Pa
1	100	60	0,8
2	200	60	0,5
3	150	60	0,5
4	100	80	0,5



**Рис. 3.** Образцы с покрытиями, осажденные по режимам №1–№4  
**Fig. 3.** Samples with coatings deposited according to modes No. 1–No. 4



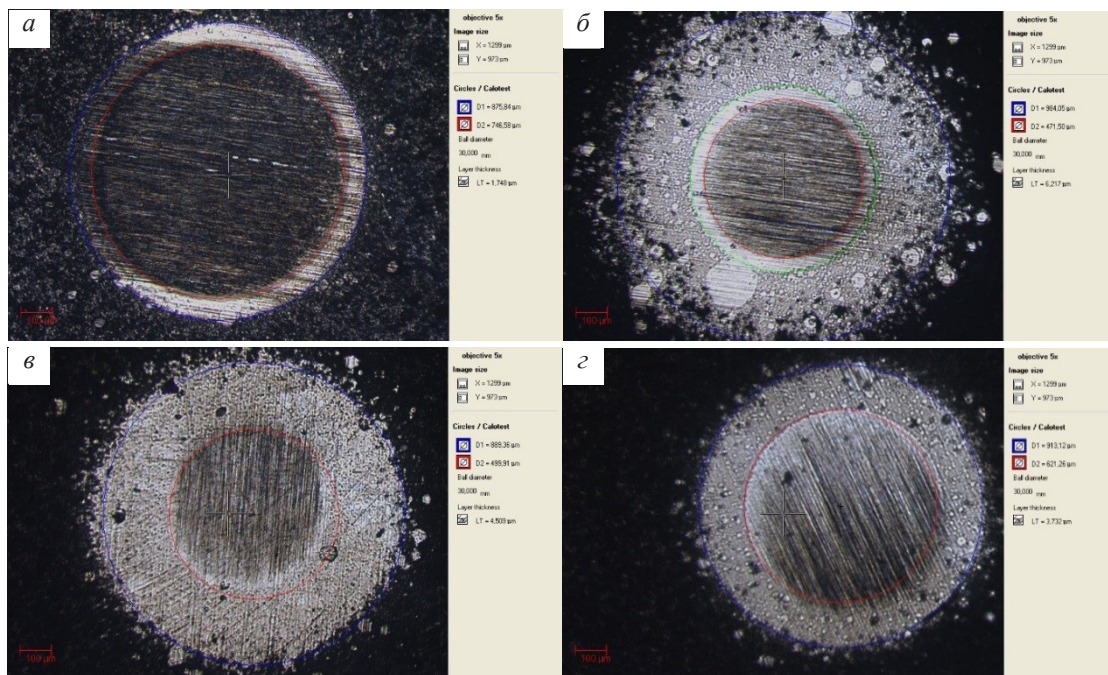
Оценку адгезионной прочности выполняли на приборе Revetest-RST фирмы CSM Instruments (Швейцария) с индентором Роквелла радиусом 200 мкм. Момент адгезионного разрушения покрытия фиксировали после испытаний с помощью сканирующего микроскопа Apreo 2 фирмы Thermo Fisher Scientific, а также по изменению параметров: акустической эмиссии, силы трения, коэффициента трения, глубины проникновения индентора. По результатам испытаний определяли минимальную (критическую) нагрузку  $L_c$ , которая приводила к разрушению покрытия. Так,  $L_{c1}$  – это момент появления первой трещины,  $L_{c2}$  – отслаивание участков покрытия,  $L_{c3}$  – пластичное истирание покрытия до подложки. Микротвердость покрытий оценивали на приборе Durascan-50 по методу Виккерса с нагрузкой на индентор 0,05 Н, время выдержки составляло 10 секунд, на каждом образце проводили по 5 измерений на различных участках. Для измерения толщины покрытия на образцах были подготовлены сферические шлифы на установке Calotest, в ходе испытания стальной шар диаметром 30 мм с абразивной суспензией вращался с постоянной скоростью, частота вращения составляла 800 об/мин. Шероховатость покрытий измеряли на приборе Mahr Surf по методике сканирования поверхности алмазной иглой. Элементный анализ покрытий оценивали методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6490LV.

## 2. Результаты и их обсуждение

Как было сказано ранее, для формирования покрытия из ВЭС с повышенными свойствами требуется провести оценку влияния различных технологических параметров при осаждении. Результаты проведенных экспериментов показали, что изменение напряже-

ния смещения позволило оценить энергетический вклад заряженных частиц на процесс формирования ВЭС покрытия. Учитывая, что для каждого химического элемента катода отличается критическое напряжение смещения, после которого прекращается процесс осаждения и начинает превалировать процесс распыления, варьирование данного параметра также позволило управлять элементным составом покрытия. Изменение тока дугового испарителя влияет на концентрацию металлической плазмы в вакуумной камере. При этом состав металлической плазмы также будет меняться ввиду того, что коэффициент распыления для более легкоплавких металлов выше при прочих равных параметрах. Это связано с тем, что с увеличением тока разряда повышается температура в катодном пятне, что приводит к более быстрому повышению эрозии легкоплавких элементов, как правило, обладающих меньшей прочностью, чем тугоплавкие металлы. Обратный эффект возникает при увеличении давления газа в вакуумной камере, что связано с возникновением катодных пятен другого типа, у которых коэффициент эрозии материала на порядок ниже вследствие столкновения с атомами и молекулами газа и частичного осаждения испаренного материала на катод. Таким образом, варьирование тока разряда и давление газа в камере позволило управлять составом металлической плазмы и соотношением концентрации газовой и металлической плазмы в камере, что также позволило точно подобрать необходимый состав ВЭС покрытия и установить закономерности формирования его элементного состава.

Для измерения толщины покрытия на образцах были подготовлены сферические шлифы, представленные на рис. 4. Границы шлифов выделены для оценки их диаметра. Результаты измерения толщины представлены в сводной табл. 6.

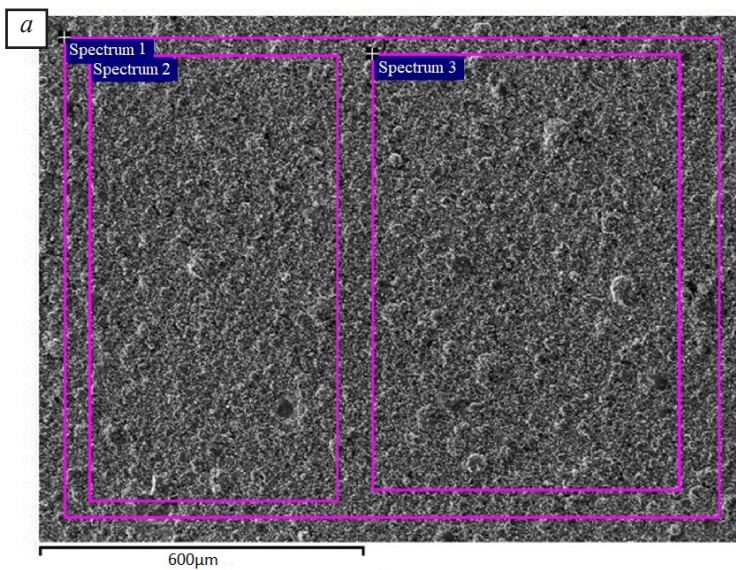


**Рис. 4.** Сферические шлифы для измерения толщины покрытия:  
*а – режим №1, б – режим №2, в – режим №3, г – режим №4*

**Fig. 4.** Spherical sections for measuring coating thickness:  
*a – mode No. 1, б – mode No. 2, в – mode No. 3, г – mode No. 4*

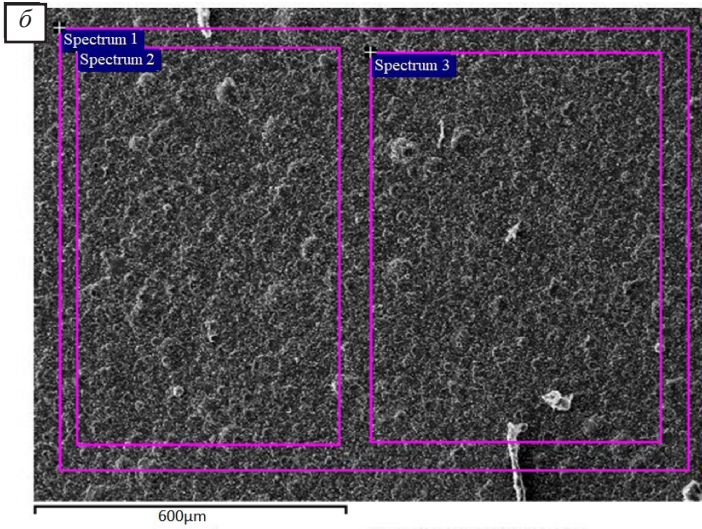
Элементный состав покрытий TiZrVCrAl по данным энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии приведен на рис. 5 и в табл. 5. Анализ элементного состава поверхности покрытий показал, что для всех

режимов состав покрытий соответствует определению высокоэнтропийного сплава, то есть содержание каждого элемента варьируется от 5 до 35 ат.%.

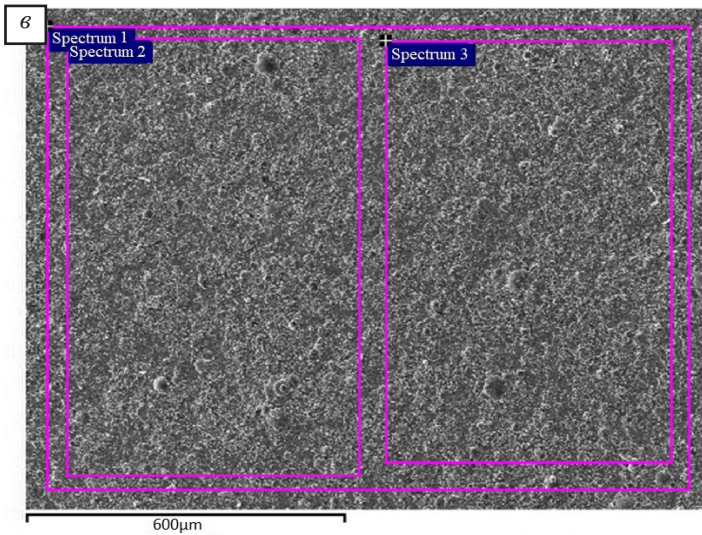


Spectrum	Al	Ti	V	Cr	Zr
Spectrum 1	12.24	20.36	19.43	25.12	22.84
Spectrum 2	10.63	21.49	16.82	30.43	20.63
Spectrum 3	12.49	21.57	18.67	25.83	21.44
Average	11.79	21.14	18.31	27.13	21.64
Standard deviation	1.01	0.67	1.34	2.88	1.12
Max.	12.49	21.57	19.43	30.43	22.84
Min.	10.63	20.36	16.82	25.12	20.63

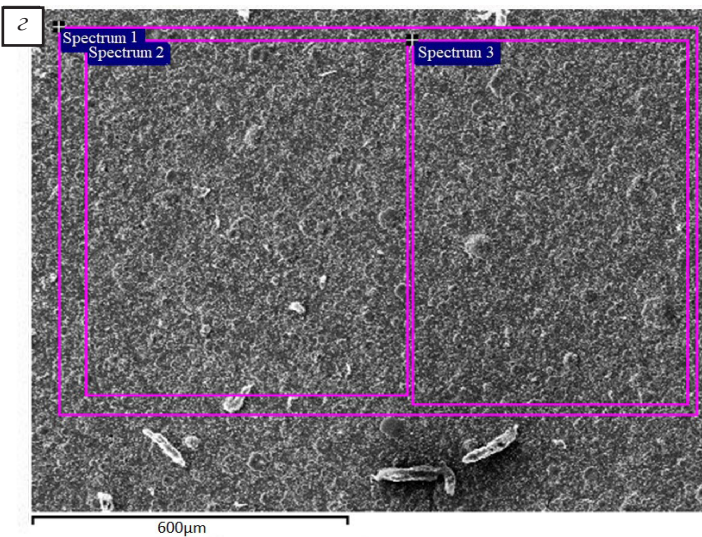




Spectrum	Al	Ti	V	Cr	Zr
Spectrum 1	8.08	23.00	22.70	19.88	26.34
Spectrum 2	7.02	25.91	19.23	21.61	26.23
Spectrum 3	9.18	22.59	22.37	21.03	24.84
Average	8.09	23.83	21.43	20.84	25.80
Standard deviation	1.08	1.81	1.92	0.88	0.84
Max.	9.18	25.91	22.70	21.61	26.34
Min.	7.02	22.59	19.23	19.88	24.84



Spectrum	Al	Ti	V	Cr	Zr
Spectrum 1	14.93	23.25	15.53	24.30	21.98
Spectrum 2	15.82	20.58	17.45	26.81	19.35
Spectrum 3	14.00	20.68	17.01	25.97	22.33
Average	14.92	21.50	16.66	25.69	21.22
Standard deviation	0.91	1.52	1.00	1.28	1.63
Max.	15.82	23.25	17.45	26.81	22.33
Min.	14.00	20.58	15.53	24.30	19.35



Spectrum	Al	Ti	V	Cr	Zr
Spectrum 1	6.81	24.47	19.19	25.24	24.28
Spectrum 2	9.67	22.80	20.85	23.80	22.88
Spectrum 3	8.88	21.80	18.85	24.18	26.29
Average	8.45	23.02	19.63	24.41	24.48
Standard deviation	1.47	1.35	1.07	0.75	1.71
Max.	9.67	24.47	20.85	25.24	26.29
Min.	6.81	21.80	18.85	23.80	22.88

Рис. 5. Элементный анализ с поверхности покрытий TiZrVCoAl: а – режим №1, б – режим № 2, в – режим №3, г – режим №4

Fig. 5. Elemental analysis from the surface of TiZrVCoAl coatings: а – mode No. 1, б – mode No. 2, в – mode No. 3, г – mode No. 4



**Таблица 5.** Фактический элементный состав высокоэнтروпийных покрытий по данным химического анализа**Table 5.** Actual elemental composition of the high-entropy coatings according to chemical analysis data

№ режима / Mode No.	Элементарный состав покрытий, ат.% / Elemental composition of coatings, at.%				
	Al	Ti	V	Cr	Zr
1	11,79	21,14	18,31	27,13	21,64
2	8,09	23,83	21,43	20,84	25,80
3	14,92	21,50	16,66	25,69	21,22
4	8,45	23,02	19,63	23,41	24,48

Наибольшую микротвердость (табл. 6) имеет покрытие, полученное по режиму №2. Данный режим отличается наибольшим значением напряжения смещения, которое влияет на подводимую энергию к подложке, как от металлической, так и от газовой плазмы. Бомбардировка поверхности частицами с большей энергии приводит к дополнительному нагреву поверхности и приводит к изменению внутренней структуры покрытия. Вместе с тем напряжение смещения влияет и на элементный состав. Из представленных элементов, согласно литературным данным, самым низким критическим напряжением смещения обладают элементы хром (Cr) и алюминий (Al), и уже при превышении зна-

чения в 150 В их скорость распыления значительно увеличивается. Данный факт коррелирует с результатами оценки элементного анализа, и при данном режиме наблюдается наименьшая концентрация хрома и алюминия, а в режиме №3, который отличается только напряжением смещения, происходит увеличение содержания хрома и алюминия в покрытии. Известно, что переходные металлы IV–VI групп (Ti, Zr, V) в покрытиях обеспечивают более высокую твердость, эрозионную стойкость, износостойкость [20, 21], введение Cr и Al приводит к образованию защитных оксидов на поверхности сплава для обеспечения его стойкости к окислению [22, 23].

**Таблица 6.** Результаты исследований высокоэнтропийного покрытия**Table 6.** Results of studies of the high-entropy coating

№ режима / Mode No.	№1	№2	№3	№4
Толщина покрытия, мкм / Coating thickness, $\mu\text{m}$	6,2	4,5	1,7	3,7
Среднее значение микротвердости, HV / Average microhardness value, HV	2694,9 $\pm$ 47,2	3723,8 $\pm$ 174,3	955,2 $\pm$ 68,6	1627,7 $\pm$ 185,4
Среднее значение шероховатости, мкм / Average roughness value, $\mu\text{m}$	Ra = 1,49 Rz = 9,37	Ra = 1,40 Rz = 9,32	Ra = 1,06 Rz = 7,23	Ra = 1,03 Rz = 7,46
Критическая нагрузка Lc1, Н / Critical load Lc1, N	1	1	1	1
Критическая нагрузка Lc2, Н / Critical load Lc2, N	26	18,5	12,5	20
Критическая нагрузка Lc3, Н / Critical load Lc3, N	26	18,5	13,8	22

Оценка адгезионной прочности покрытий (табл. 6) показала, что при всех режимах разрушение покрытия начинается при малых (около 1 Н) нагрузках. Покрытия, осажденные по режимам №1 и №2, не продемонстрировали выраженных локальных фрагментарных отслоений за счет разрушения по границе раздела покрытие-подложка, поэтому  $Lc2$  фактически совпадает с  $Lc3$  – нагрузкой стирания покрытия до подложки, которая составляет около 26 Н и 18,5 Н соответственно. Режимы №3 и №4 характеризуется редкими локальными фрагментарными отслоениями. Из этих данных также можно предполагать влияние толщины покрытия на величину нагрузки истирания покрытия и на нагрузку, при которой начинаются относительно частые, периодические пики акустической эмиссии. Максимальная нагрузка для таких пиков (16–21 Н) наблюдается для самого толстого покрытия по режиму №1 (6,2 мкм), а наименьшая (6–9 Н) – для самого тонкого покрытия сплава по режиму №3 (1,7 мкм). Вероятно, появление пиков связано с началом интенсивной пластической деформации подложки индентором.

### Выводы

В настоящей работе были проведены экспериментальные исследования влияния технологических параметров осаждения покрытия на химический состав, адгезионную прочность и микротвердость. Варьирование тока дугового испарителя, напряжения смещения и давления газа в камере позволило управлять составом металлической плазмы и соотношением концентрации газовой и металлической плазмы в камере, что также позволило точно подобрать необходимый состав ВЭС покрытия и установить закономерности формирования его элементного состава. Исходя из проведенных экспериментов, можно сделать следующие выводы:

1) Элементный анализ поверхности показал, что для всех режимов состав покры-

тий соответствует определению высокоэнтропийного сплава.

2) Наибольшим значением микротвердости (3723,8) обладает образец, обработанный по режиму №2, что обусловлено большей энергией, подаваемой на поверхность за счет повышенного напряжения смещения на подложку.

3) Наилучшей адгезионной прочностью обладают образцы, обработанные по режимам №1 и №4 – 26 Н и 22 Н соответственно.

Исходя из вышеперечисленного, оптимальными режимами осаждения покрытия по критериям микротвердости, адгезионной прочности, шероховатости и химического состава являются режимы №2 и №4.

По результатам проведенных исследований были определены 2 варианта наиболее оптимальных режимов осаждения покрытия по критериям микротвердости и адгезионной прочности, которые лягут в основу разработки многослойных и мультислойных покрытий на поверхность ультрамелкозернистого титанового сплава ВТ6.

### Благодарности / Acknowledgments

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10118, <https://rscf.ru/project/23-79-10118/>.*

*This work was supported by the Russian Science Foundation under grant No. 23-79-10118, <https://rscf.ru/en/project/23-79-10118/>.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rajendran R. Gas turbine coatings – An overview // *Engineering Failure Analysis* 26, 355-369(2012).

2. Cavaleiro A., de Hosson J. M. Nanostructured coatings. Springer-Verlag: 2006 ISBN: 978-0-387-25642-9.

3. Kablov E. N. Strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period up to 2030 // *Aviation materials and technologies*. 5, 24-30 (2012). (In Russian) [Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 5, 24-30 (2012)].

4. Chinnusamy S., Ramasamy V., Venkatajalapathy S., Kaliyannan G.V., Palaniappan S.K. Experimental investigation on the effect of ceramic coating on the wear resistance of Al6061 substrate // *Journal of Materials Research and Technology*, 8, 6125–6133 (2019).
5. Comakli O. Influence of CrN, TiAlN monolayers and TiAlN/CrN multilayer ceramic films on structural, mechanical and tribological behavior of  $\beta$ -type Ti45Nb alloys // *Ceramics International*, 46(6), 8185-8191 (2020).
6. Kulu P., Tarbe R., Vallikivi A. Abrasive wear of powder materials and coatings // *Materials Science*, 11(3), 230–234 (2005).
7. Zhao Y., Chen L., Sun J., Wu W., Yu T. Microstructure evolution and wear resistance of in-situ synthesized (Ti, Nb) C ceramic reinforced Ni204 composite coatings // *Ceramics International*, 48(12), 17518-17528 (2022).
8. Abdel-Aal, H.A. Functional surfaces for tribological applications: Inspiration and design // *Surface Topography: Metrology and Properties*, 4, 043001 (2016).
9. Yeh J.W., Chen S.K., Lin S.J., Gan J.Y., Chin T.S., Shun T.T., Tsau C.H., Chang S.Y. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes // *Advanced engineering materials*, 6(5), 299-303 (2004).
10. Cantor B., Chang I., Knight P., Vincent A. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // *Materials Science and Engineering: A*, 213-218, 375–377 (2004).
11. Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys // *Progress in materials science*, 61, 1-93 (2014).
12. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys // *Nature reviews materials*, 4(8), 515–534 (2019).
13. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // *Acta Materialia*, 122, 448–511(2017).
14. Youssef K.M., Zaddach A.J., Niu C., Irving D.L., Koch C.C. A novel low-density, high-hardness, high entropy alloy with close-packed single-phase nanocrystalline structures // *Materials Research Letters*, 3(2), 95–99 (2015).
15. Fu X., Schuh C.A., Olivetti E.A. Materials selection considerations for high entropy alloys // *Scripta Materialia*, 138, 145–150 (2017).
16. Zhang P., Li Y., Chen Z., Zhang J., Shen B. Oxidation response of a vacuum arc melted NbZrTiCrAl refractory high entropy alloy at 800–1200 C // *Vacuum*, 162, 20-27(2019).
17. Nazarov A.Y., Maslov A.A., Nikolaev A.A., Ramazanov K.N. Influence of coating modes on the basis of MAX-phase Ti-Al-C system by vacuum arc deposition on the structure and phase composition // *Bulletin of UGATU*, 27(4 (102)), 123-132 (2023). (In Russian) [Назаров А. Ю., Маслов А. А., Николаев А. А., Рамазанов К. Н. Влияние режимов нанесения покрытий на основе системы МАХ-фазы Ti-Al-C методом вакуумно-дугового осаждения на структуру и фазовый состав // *Вестник УГАТУ*, 27(4 (102)), 123-132 (2023)].
18. Ivanov, Y.F., Krygina, O.V., Petrikova, E.A., Prokopenko, N.A., Tolkachev, O.S., Shmakov, A.N. Cermet coatings produced by vacuum-arc evaporation of a high-entropy alloy // *Materials. Technologies. Design*, 5(5 (15)), 29-42 (2023).
19. Budilov V., Vardanyan E., Ramazanov K. Deposition of Functional Coatings Based on Intermetallic Systems TiAl on the Steel Surface by Vacuum Arc P lasma // *Journal of Physics: Conference Series*, 652(1), 012053 (2015).
20. Pogrebnyak A.D., Yakushchenko I.V., Bagdasaryan A.A., Bondar O.V., Krause-Rehberg R., Abadias G., Chartier P., Oyoshi K., Takeda Y., Beresnev V.M., et al. Microstructure, physical and chemical properties of nanostructured (Ti–Hf–Zr–V–Nb)N coatings under different deposition conditions // *Materials Chemistry and Physics*, 147(3), 1079–1091 (2014).
21. Beresnev V.M., Sobol O.V., Andreev A.A., Gorban V.F., Klimenko S.A., Litovchenko S.V., Kovteba D.V., Meilekhov A.A., Postel'nik A.A., Nemchenko U.S., et al. Formation of Superhard State of the TiZrHfNbTaYN Vacuum–Arc High-Entropy Coating // *Journal of Superhard Materials*, 40, 102–109 (2018).
22. Liu C.M., Wang H.M., Zhang S.Q., H.B. Tang, A.L. Zhang, Microstructure and oxidation behavior of new refractory high entropy alloys, *J. Alloy. Comp.* 583 (2014).
23. Lin, C. M., Juan, C. C., Chang, C. H., Tsai, C. W., & Yeh, J. W. Effect of Al addition on mechanical properties and microstructure of refractory AlxHfNbTaTiZr alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 624, 100-107 (2015).