

# О применении углеродсодержащих электродных материалов в технологии электроискрового легирования.

## Часть 2. Структура и свойства двухслойных покрытий

\* А. Е. Кудряшов, Ж. В. Еремеева, Е. А. Левашов,  
В. Ю. Лопатин, А. В. Севостьянова, Е. И. Замулаева

*Научно-учебный центр СВС МИСиС–ИСМАН,  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
Ленинский проспект, 4, г. Москва, 119049, Россия, \*e-mail: [ae kudr@yandex.ru](mailto:ae kudr@yandex.ru)*

Электроискровую обработку титанового сплава ОТ4-1 осуществляли последовательно твердо-сплавным электродом СТИМ-20Н (TiC-20%Ni) и углеродсодержащим материалом (графиты, композитные материалы на основе углерода). Проведен комплекс исследований структуры, состава и свойств сформированных покрытий. Установлено, что в зависимости от применяемого углеродсодержащего материала электроискровая обработка может способствовать снижению коэффициента трения покрытий, повышению износостойкости и жаростойкости титанового сплава.

*Ключевые слова:* электроискровое легирование, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, электродный материал, покрытие, импульсный разряд, углеродсодержащие материалы, износостойкость, жаростойкость, коэффициент трения.

DOI: 10.5281/zenodo.1051312  
УДК 621.9.048.4

### ВВЕДЕНИЕ

Важнейшими преимуществами титановых сплавов перед другими конструкционными материалами являются их высокие удельная прочность и жаропрочность в сочетании с высокой коррозионной стойкостью. Титановые сплавы имеют малую плотность, хорошо свариваются, парамагнитны, что делает их перспективными для применения в авиастроении, ракетостроении, судостроении, химическом, пищевом и транспортном машиностроении [1–3]. В последнее время титановые сплавы широко применяются в медицине [4, 5].

Применение титановых сплавов наиболее целесообразно в диапазоне 250–600 °С, когда легкие алюминиевые и магниевые сплавы уже не могут работать, а стали и никелевые сплавы уступают им по удельной прочности [1]. В то же время титановые сплавы характеризуются низкими твердостью и износостойкостью, а также задиристостью.

Повысить надежность изделий из титановых сплавов можно различными технологиями поверхностной инженерии: ионной имплантацией, пластическим деформированием, лазерным упрочнением, аргонодуговой наплавкой, электроискровым легированием т.д. [6–10].

Применительно к титановым сплавам применение технологии ЭИЛ может обеспечить [8]:

- увеличение твердости, коррозионной стойкости, износо- и жаростойкости;
- снижение способности к схватыванию поверхностей при трении, особенно при высоких температурах или в вакууме;
- получение стабильного коэффициента трения в узлах, работающих в переменных условиях (переменные температуры, различные газовые среды и вакуум, режим многократных пуск-остановок и т.п.);
- снижение коэффициента трения в парах, где непригодны обычные методы нанесения антифрикционных материалов.

Цель данной работы – исследование структуры, состава и свойств электроискровых покрытий на титановом сплаве ОТ4-1, нанесенных последовательно твердо-сплавным электродным материалом СТИМ-20Н и углеродсодержащими материалами.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала подложек использовали титановый сплав ОТ4-1. Размер образцов составлял 10×10×5 мм. Покрытия наносили на поверхность площадью 1 см<sup>2</sup>, для исследования жаро-

стойкости покрытий обрабатывали всю поверхность образцов.

В качестве электрода-анода применяли сплав СТИМ-20Н [11] и различные углеродсодержащие материалы.

Подробно применяемые материалы, оборудование и режим электроискровой обработки приведены в части 1.

Время обработки образцов для исследования жаростойкости и трибологических испытаний составляло: твердым сплавом – 3 мин/см<sup>2</sup>, углеродсодержащим электродом – 3 мин/см<sup>2</sup>.

Исследование микроструктуры проводили на растровых электронных микроскопах JSM-6480LV фирмы JEOL с приставкой для энергодисперсионной спектроскопии INCA ENERGY Dry Cool фирмы OXFORD INSTRUMENTS и «Hitachi S-3400N» (Япония), оснащенных рентгеновским энергодисперсионным спектрометром NORAN.

Металлографический анализ шлифов выполнен на оптическом микроскопе «Neophot-32». Определение толщины покрытий проводили при увеличении 500<sup>x</sup>, а сплошности – при 200<sup>x</sup>.

Шлифы изготавливали на полировальной машине фирмы «Struers» «Roto Pol-21» с приставкой для работы в автоматическом режиме «Roto Force 1» с применением суспензий с дисперсностью поликристаллических алмазов 6, 3, 1 мкм.

Для выявления структуры покрытий использовали травление раствором 2% HNO<sub>3</sub> + 2% HF + 96% дистиллированной воды в течение 30–60 секунд.

Исследования микротвердости выполнены на микротвердомере ПМТ-3 по всей ширине шлифа при нагрузке 50 г по ГОСТ 9450–76.

Испытания на жаростойкость проведены в электропечи марки SNOL 7,2/1200 (Литва) при температуре 750°C и выдержке 51 ч. Весовой показатель окисления ( $K_{век}$ ) (изменение массы образца в результате окисления, отнесенное к единице поверхности) определяли по формуле [12]:

$$K_{век} = (m_1 - m_0)/S_0, \quad (1)$$

где  $m_0$  – начальная масса образца, г;  $m_1$  – масса образца с продуктами окисления, г;  $S_0$  – площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>.

Съемка рентгеновских спектров проводилась на автоматизированном дифрактометре марки ДРОН с использованием монохроматизированного Co-K<sub>α</sub> излучения. Съемка велась по точкам (шаговое сканирование) в интервале углов 2θ 10°–110°, шаг съемки составлял 0,1°, экспозиция – 2–4 с. Качественный и количественный

фазовый анализы выполнялись путем обработки полученных спектров по методике [13].

Трибологические свойства покрытий проводили на трибометре фирмы «CSM Instruments» (Швейцария) по схеме pin-on-disk [14]. В качестве контртела использовали шарики из сплава WC-6% Co диаметром 3 мм. Линейная скорость вращения образцов с покрытием составляла 10 см/с, нагрузка – 5,0 Н. Зависимость коэффициента трения трущейся пары от длины пробега контртела (150 м) строилась на компьютере с помощью программного обеспечения InstrumX®.

Профиль дорожки износа образцов после трибологических испытаний исследовали на оптическом профилометре «Veeco WYKONT NT 1100».

Скорость износа рассчитывали по формуле:

$$W = s \times L / (H \times l), \quad (2)$$

где  $W$  – скорость износа, мм<sup>3</sup>×Н<sup>-1</sup>×м<sup>-1</sup>;  $L$  – длина окружности, мм;  $s$  – площадь сечения износа канавки, мм<sup>2</sup>;  $H$  – нагрузка, Н;  $l$  – путь трения (длина пробега контртела), м.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате электроискровой обработки титаносплавным электродом СТИМ-20Н на титановом сплаве ОТ4-1 формируется сплошное покрытие толщиной 30 мкм и твердостью 9,9 ГПа (табл. 1). В зависимости от типа применяемого углеродсодержащего материала твердость покрытий снижается до 6,1–7,7 ГПа. Толщина покрытий, обработанных углеродсодержащими материалами, составляет 19–30 мкм. Из табл. 1 видно, что обработка титаносплавным электродом СТИМ-20Н повышает твердость титанового сплава более чем в 5 раз, последующая обработка углеродсодержащими материалами – в 2,9–4,0 раза.

На рис. 1 приведена зависимость твердости покрытия, обработанного последовательно электродами СТИМ-20Н и 3D-композитом, от времени обработки углеродсодержащим материалом (1, 5, 10 мин). Видно, что с увеличением продолжительности обработки твердость покрытия заметно снижается.

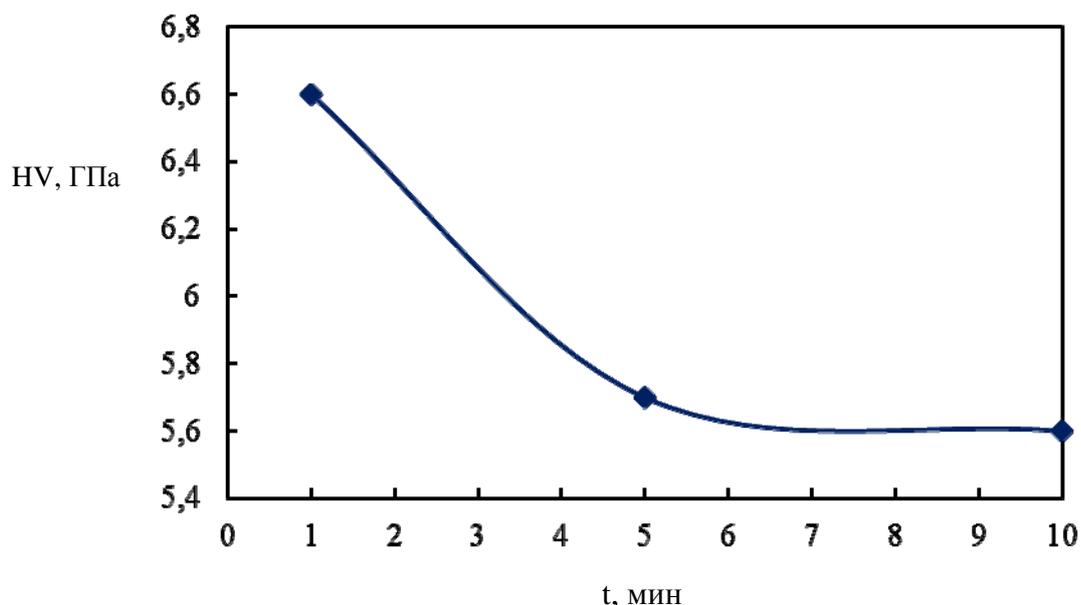
С помощью микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) был изучен элементный состав покрытий. Исследуемые области представлены на рис. 2, а сам элементный состав поверхности покрытий приведен в табл. 2. Покрытие, нанесенное СВС-электродом, более однородное в отличие от покрытий, сформированных после легирования углеродсодержащими электродами. Неоднородность покрытий после вторичной обработки связана с наличием областей, в которых преимущественно находится углерод. Например, в области 2 на рис. 2б обнаружено до 71 (вес.) % углерода.

**Таблица 1.** Результаты металлографического анализа образцов с электроискровыми покрытиями СТИМ-20Н+углеродсодержащий материал

Электродный материал	Сплошность, %	Толщина, мкм	Твердость*, ГПа	Ky**
СТИМ- 20Н (однослойное покрытие)	100	30	9,9	5,2
Силицированный графит	100	24	7,1	3,7
Пирографит	100	24	7,4	3,8
Крупнозернистый графит	100	28	7,5	3,9
Углеродный графитированный материал, пропитанный сплавом олово-свинец	100	19	7,7	4,0
Графит SIGRAFINE EK 23	100	24	6,7	3,5
3D-композит	100	30	5,6	2,9
МПП-6	100	30	6,8	3,6
Углерод-углеродный композиционный материал (УУКМ)	100	19	7,5	3,9
Нигран-В	100	26	7,4	3,8
Химанит-Г	100	24	6,1	3,2

\* Твердость материала подложки (сплав ОТ4-1) – 1,9 ГПа.

\*\* Ky – коэффициент упрочнения, равный отношению твердости покрытия к твердости подложки [9].



**Рис. 1.** Зависимость твердости покрытия от времени вторичной обработки. Электродные материалы: СТИМ-20Н и 3D-композит.

Из табл. 2 видно, что применение обработки углеродсодержащими электродами способствует увеличению содержания углерода в покрытии. После обработки СВС-сплавом СТИМ-20Н обнаружены кислород и азот, а в покрытиях после вторичной обработки наблюдается только кислород. В покрытии, сформированном материалом, пропитанным сплавом Pb-Sn, выявлены Pb и Sn.

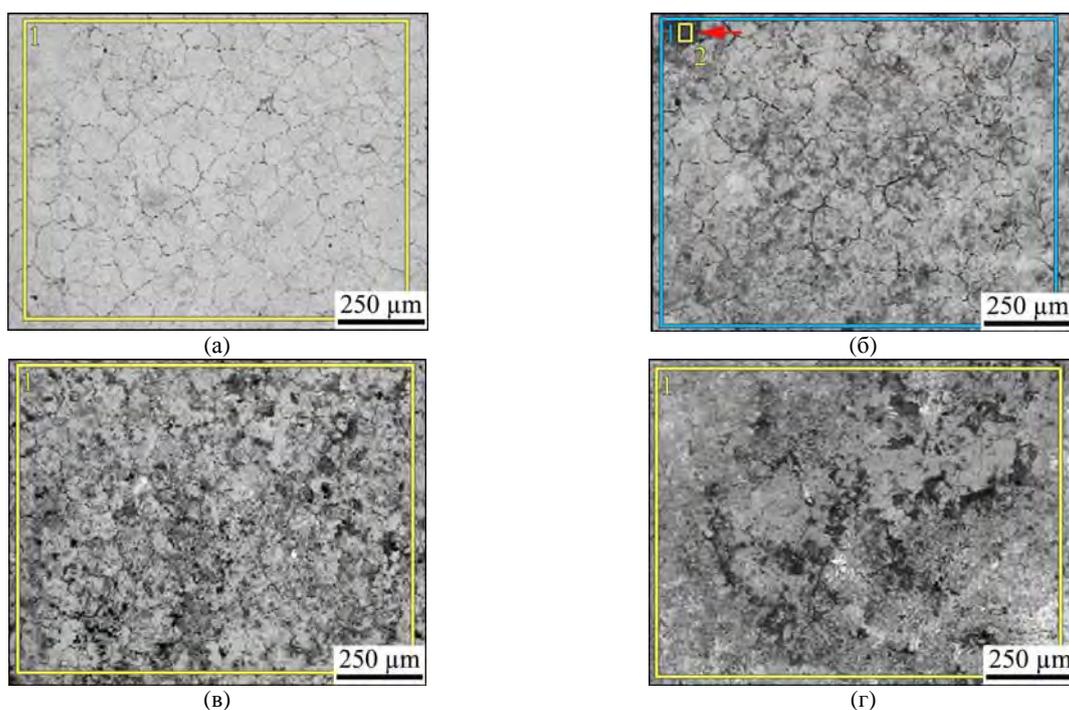
Можно предположить, что при ЭИЛ-обработке как твердосплавным электродом СТИМ-20Н, так и углеродсодержащими электродами в покрытии образуется твердый раствор Ti(C,N,O).

Морфология покрытий на титановом сплаве ОТ4-1 приведена на рис. 3. Поверхность покры-

тия из СТИМ-20Н состоит из растекшихся капель. После обработки углеродсодержащими материалами капля не выявлено, но видны эрозионные лунки. С ростом длительности вторичной обработки количество лунок (пористость) увеличивается, с чем, вероятно, и связано снижение микротвердости покрытий.

Применение съемки при более высоком увеличении ( $\times 20\,000$ ) позволило обнаружить в покрытиях композиционные частицы размером 150–300 нм (рис. 4). Вероятно, они являются конгломератами более мелких частиц.

На рис. 5 представлена микроструктура покрытия, нанесенного электродом СТИМ-20Н (шлиф). Видно, что на поверхности формируется сплошной слой из хорошо спеченных между

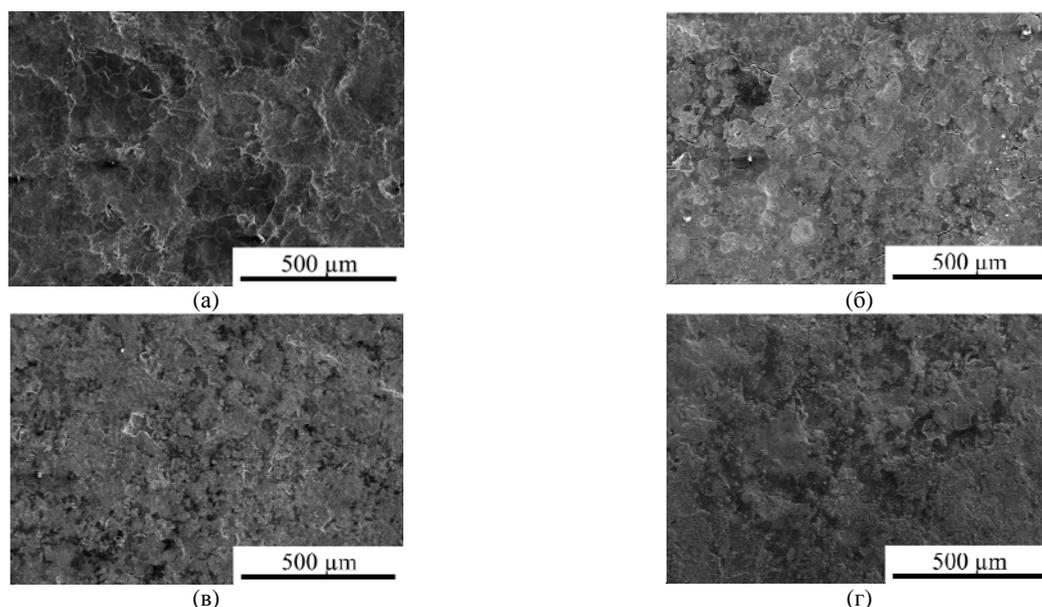


**Рис. 2.** Области МРСА поверхности ЭИЛ-покрытий:  
 СТИМ-20Н (а); СТИМ-20Н + Нигран В (б); СТИМ-20Н + МПГ-6 (в);  
 СТИМ-20Н + углеродный графитированный материал, пропитанный сплавом Pb-Sn (г).

**Таблица 2.** Элементный состав поверхности покрытий (% вес.)

Электродный материал	C-K	N-K*	O-K	Al-K	Ti-K	Ni-K	Sn-L	Pb-M
СТИМ-20Н	10,1	–	1,3	0,3	70,9	17,4	–	–
СТИМ-20Н + Нигран В	31,4	–	4,2	0,5	53,1	10,8	–	–
СТИМ-20Н + Нигран В (область 2)	71,0	–	5,0	–	15,9	8,1	–	–
СТИМ-20Н + МПГ-6	34,6	–	3,6	0,4	51,3	10,1	–	–
СТИМ-20Н + углеродный графитированный материал, пропитанный сплавом Pb-Sn	32,3	–	10,5	0,3	36,6	7,6	1,4	11,3

\*Спектральная линия азота N (К-серия) совпадает со спектральной линией Ti (L-серия) и затрудняет определение содержания азота.



**Рис. 3.** Микроструктура (а-г) ЭИЛ с покрытиями; СТИМ-20Н (а); СТИМ-20Н + Нигран В (б); СТИМ-20Н + МПГ-6 (в); СТИМ-20Н + углеродный графитированный материал, пропитанный сплавом Pb-Sn (г).

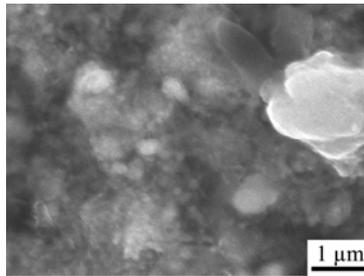
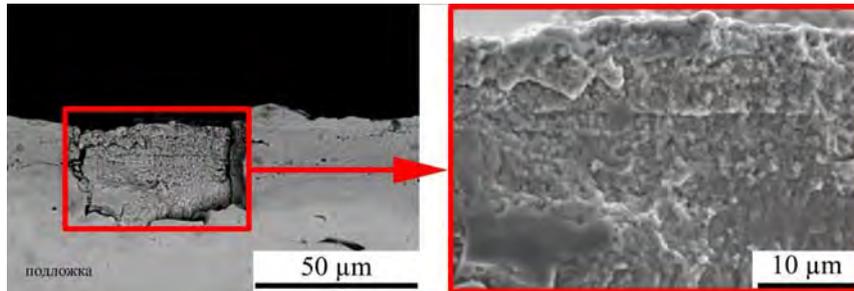
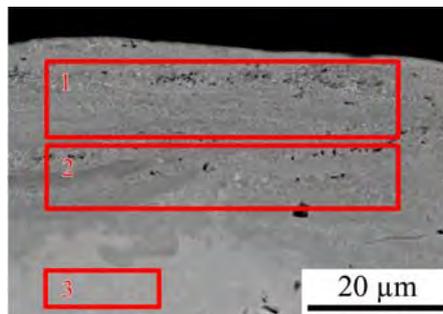


Рис. 4. Микроструктура ЭИЛ-покрытия. СТИМ-20Н + углеродный графитированный материал, пропитанный сплавом Pb-Sn.



(а)



(б)

Рис. 5. Микроструктура ЭИЛ-покрытия, полученного из электрода СТИМ-20Н (шлиф).

Таблица 3. Элементный состав (вес.%) электроискрового покрытия (шлиф), полученного из электрода СТИМ-20Н

Область	С-К	N-К*	O-К	Al-К	Ti-К	Mn-К	Ni-К
1	9,3	–	1,8	0,4	77,2	–	11,1
2	5,6	–	1,5	0,6	85,6	0,5	6,2
3	–	–	–	0,7	98,7	0,6	–

\*Спектральная линия азота N (K-серия) совпадает со спектральной линией Ti (L-серия) и затрудняет определение содержания азота.

собой частиц. Элементный состав покрытия в различных областях приведен в табл. 3.

Распределение элементов Ti, C, Ni в покрытиях после вторичной обработки графитом марки МПГ-6, приведено на рис. 6. Видно, что максимальное содержание графита находится на поверхности.

Результаты испытаний на жаростойкость в виде зависимости весового показателя окисления ( $K_{вес}$ ) от времени приведены на рис. 7. Максимальные значения  $K_{вес}$  26,9 г/м<sup>2</sup> и 26,6 г/м<sup>2</sup> имеют соответственно образец с покрытием, нанесенным электродами СТИМ-20Н + пирографит, и образец без покрытия. Минимальным весовым показателем окисления характеризуется образец с покрытием, нанесенным последовательно электродами СТИМ-20Н и силицированным

графитом – 11,9 г/м<sup>2</sup>. Видно, что весовой показатель окисления исследуемых образцов подчиняется параболическому закону. Следует учитывать, что электроискровые покрытия имеют более развитую поверхность по сравнению с неупрочненным образцом.

Покрытия, нанесенные СТИМ-20Н+3D-композитом ( $K_{вес}$  23,96 г/м<sup>2</sup>), СТИМ-20Н+МПГ-6 ( $K_{вес}$  22,12 г/м<sup>2</sup>), СТИМ-20Н+Химанит-Т ( $K_{вес}$  20,77 г/м<sup>2</sup>), СТИМ-20Н+углеродный графитированный материал, пропитанный сплавом олово-свинец ( $K_{вес}$  20,12 г/м<sup>2</sup>), СТИМ-20Н + графит SIGRAFINE ЕК 23 ( $K_{вес}$  19,91 г/м<sup>2</sup>), характеризуются более высокими значениями весового показателя окисления по сравнению с однослойным покрытием ( $K_{вес}$  18,76 г/м<sup>2</sup>).

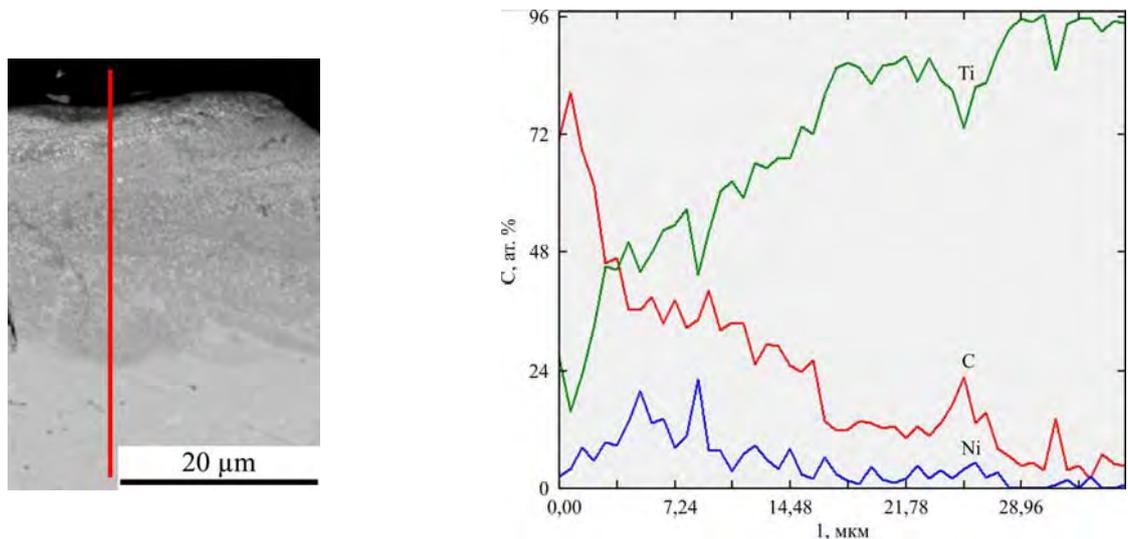


Рис. 6. Распределение элементов по ширине шлифа покрытия, нанесенного СТИМ-20Н+МПГ-6.

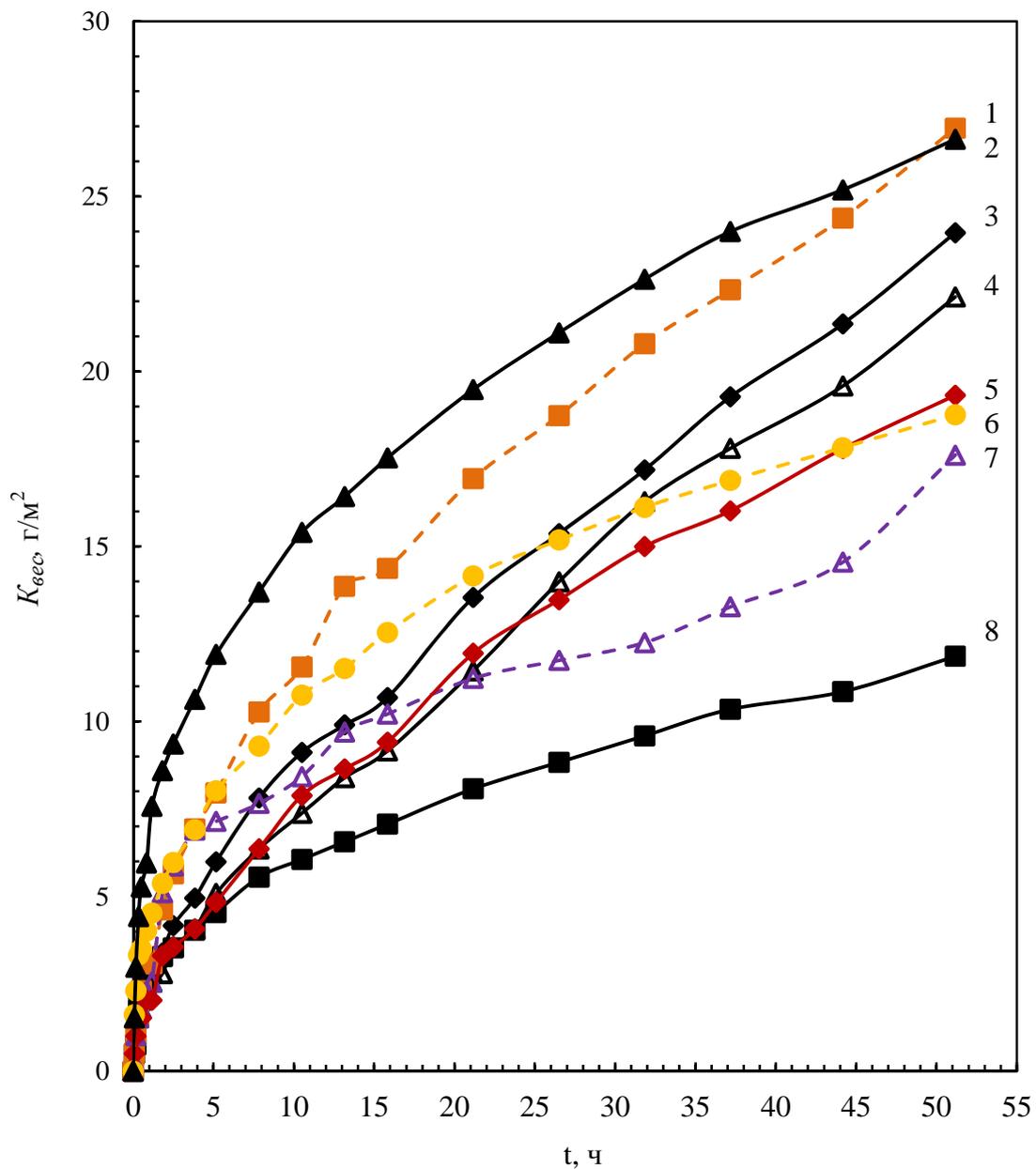


Рис. 7. Зависимость весового показателя окисления от времени.  $T = 750^{\circ}C$ .

1 – СТИМ-20Н + пирографит; 2 – титановый сплав ОТ4-1; 3 – СТИМ-20Н + 3D-композит; 4 – СТИМ-20Н + МПГ-6; 5 – СТИМ-20Н + Нигран-В; 6 – СТИМ-20Н); 7 – СТИМ-20Н + крупнозернистый графит; 8 – СТИМ-20Н + силицированный графит.

Таблица 4. Фазовый состав образцов после высокотемпературного окисления

№	Электродный материал	Фаза	Символ Пирсона	Содержание		Периоды, нм
				об. доля, %	вес. доля, %	
1	ОТ4-1 (образец без покрытия)	TiO <sub>2</sub> (рутил)	tP6	99	99	$a = 0,4592$ $c = 0,2960$
		TiN	cF8	1	1	$a = 0,4234$
2	СТИМ-20Н	TiO <sub>2</sub> (рутил)	tP6	85	83	$a = 0,4593$ $c = 0,2960$
		Ti C	cF8	3	3	$a = 0,4286$
		NiTiO <sub>3</sub>	hR10	12	14	$a = 0,5031$ $c = 1,3793$
3	СТИМ-20Н + силицированный графит	TiO <sub>2</sub> (рутил)	tP6	74	75	$a = 0,4592$ $c = 0,2960$
		β-Ti	cI2	1	1	$a = 0,3275$
		Ti C	cF8	10	12	$a = 0,4293$
		NiTiO <sub>3</sub>	hR10	3	4	–
		Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	hP16	3	3	–
		α-Ti	hP2	1	1	–
4	СТИМ-20Н + пирографит	TiO <sub>2</sub> (рутил)	tP6	91	89	$a = 0,4593$ $c = 0,2960$
		NiTiO <sub>3</sub>	hR10	9	11	$a = 0,5032$ $c = 1,3809$
5	СТИМ-20Н + 3D-композит	TiO <sub>2</sub> (рутил)	tP6	97	96	$a = 0,4592$ $c = 0,2959$
		NiTiO <sub>3</sub>	hR10	3	4	$a = 0,5033$ $c = 1,3821$

Применение углеродсодержащих материалов для снижения скорости окисления оправдано только при использовании УУКМ ( $K_{вес}$  18,38 г/м<sup>2</sup>), крупнозернистого ( $K_{вес}$  17,61 г/м<sup>2</sup>) и силицированного графита.

Проведено исследование фазового состава покрытий после высокотемпературных испытаний, результаты приведены в табл. 4. Известно [15], что при нагреве до 400–500°C начинается заметное окисление титана, приводящее к образованию рутила TiO<sub>2</sub>, при этом часть кислорода (до 20%) растворяется в металле, а остальные 80% идут на формирование окислы. До ~ 800 °C окисленный слой состоит исключительно из TiO<sub>2</sub> со структурой рутила, а металл на границе с оксидом обогащен кислородом. В процессе высокотемпературного окисления происходит диффузия кислорода через слой оксида. Фазовый состав образца без покрытия после высокотемпературного окисления состоит из диоксида титана TiO<sub>2</sub> (рутила) и следов нитрида титана (1%).

В покрытии, нанесенном сплавом СТИМ-20Н, после высокотемпературного воздействия наблюдаются фазы диоксида титана, шпинели NiTiO<sub>3</sub> и карбида титана (3%). Суммарное количество оксидов в поверхностном слое достигает 97%. Фаза рутила и шпинель NiTiO<sub>3</sub> обнаружены в покрытиях, нанесенных электродами СТИМ-20Н + пирографит и СТИМ-20Н + 3D-композит.

В покрытии, характеризующиеся минимальной степенью окисления (СТИМ-20Н+силицированный графит), количество оксидов достигает 83%, а карбида титана – 12%. В двухслойных покрытиях отсутствует фаза свободного углерода, что свидетельствует о его полном выгорании при высокотемпературном окислении.

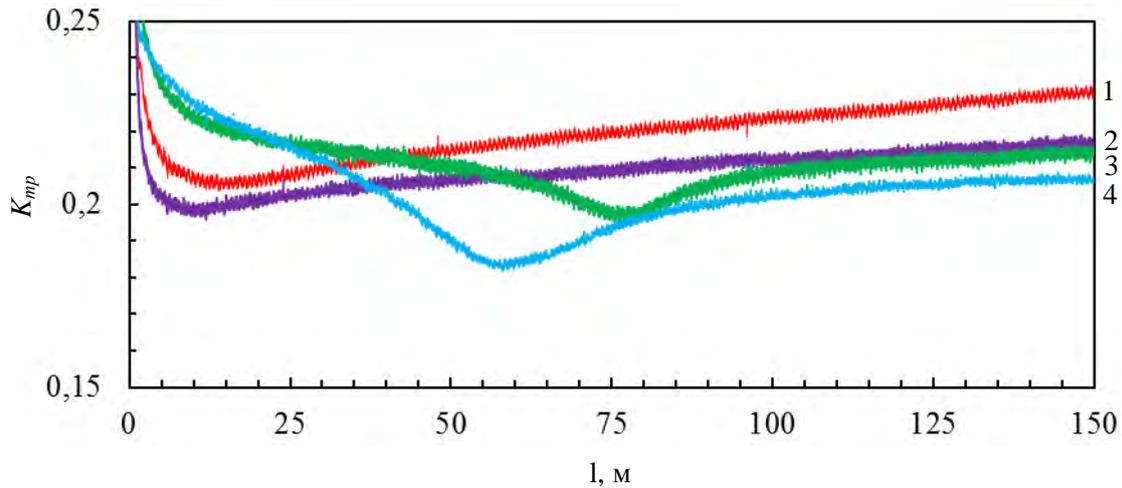
Трибологические испытания установили, что у образца без покрытия коэффициент трения составляет 0,53 (табл. 5). Электроискровая обработка твердым сплавом СТИМ-20Н способствует снижению коэффициента трения образца до 0,47. Применение углеродсодержащих материалов позволяет снизить коэффициент трения ( $K_{тр}$ ) покрытий более чем в 2 раза, а также повысить его стабильность (табл. 5, рис. 8).

Профили дорожки износа образцов и их 3D-изображение приведены на рис. 9. Видно, что максимальным износом характеризуются неупрочненный образец из титанового сплава и образец, обработанный твердым сплавом СТИМ-20Н. Применение углеродсодержащих электродов значительно уменьшает скорость приведенного износа ( $W$ ). Минимальным износом характеризуется образец, обработанный последовательно электродным материалом СТИМ-20Н + Нигран-В, на котором видны только следы износа.

Таблица 5. Результаты трибологических испытаний образцов с покрытиями.  $P = 5 \text{ Н}$ 

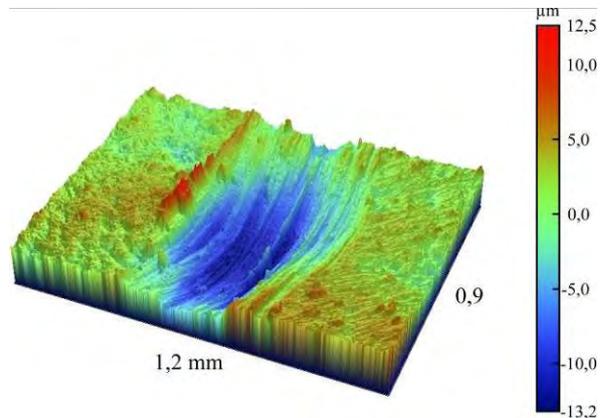
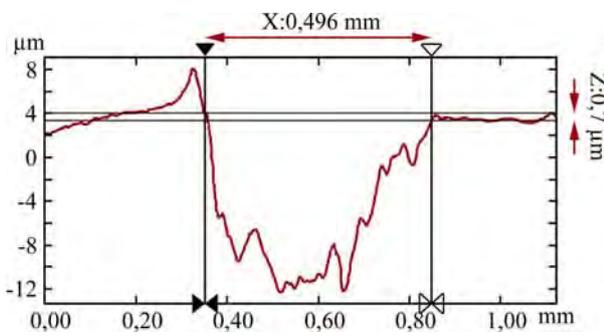
Электродный материал		$K_{тр}$ (конечный)	$l, \text{ м}$	$W, 10^{-6}$ $\text{мм}^3/(\text{м} \times \text{Н})$
Первичная обработка	Вторичная обработка			
ОТ4-1 (образец без покрытия)		0,53	3	550,12
СТИМ-20Н	—	0,47	9	122,42
СТИМ-20Н	Химанит-Г	0,20	150	24,59
СТИМ-20Н	Нигран-В	0,21	150	—*
СТИМ-20Н	Пирографит	0,23	150	26,65
СТИМ-20Н	УУКМ	0,22	150	26,76
СТИМ-20Н	3D-композит	0,46	150	14,86

\* На образце видны следы износа.

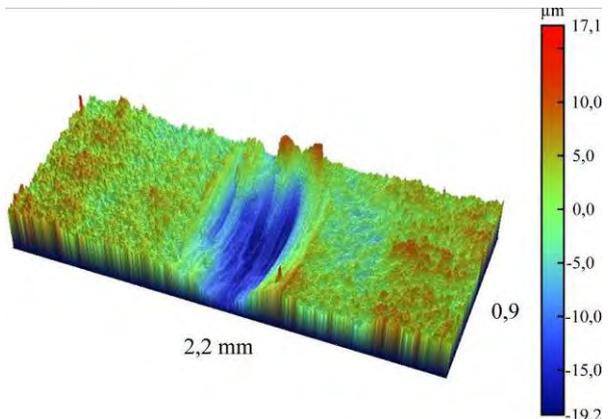
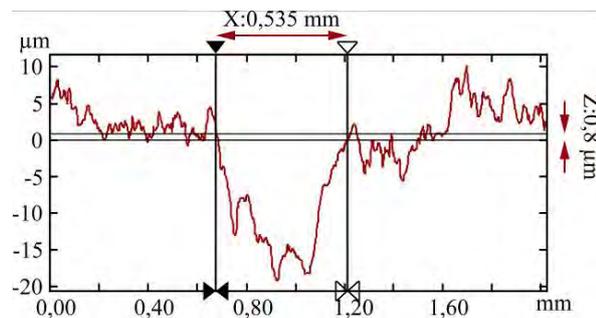


1 – СТИМ-20Н + пирографит; 2 – СТИМ-20Н + УУКМ;  
3 – СТИМ-20Н + Нигран-В; 4 – СТИМ-20Н + Химанит-Г.

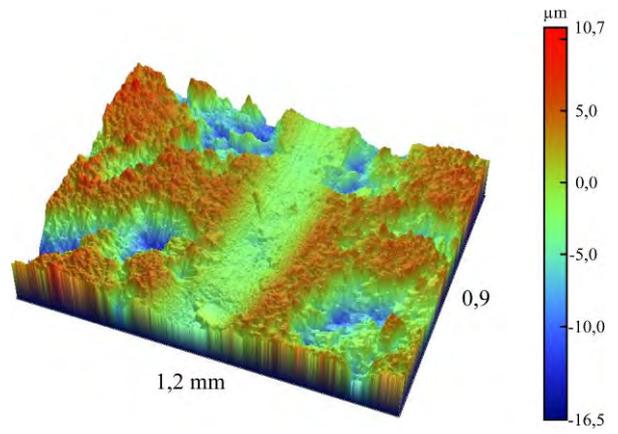
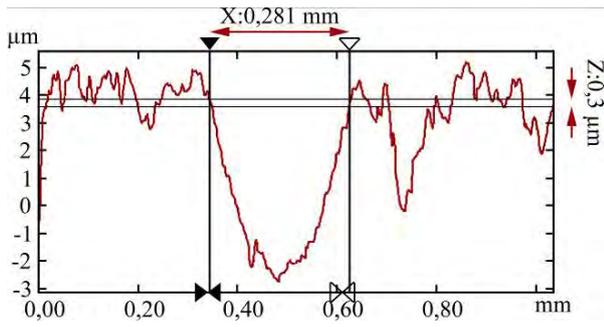
Рис. 8. Зависимость коэффициента трения от пройденного пути для пары трения (WC-Co) – ЭИЛ-покрытие.



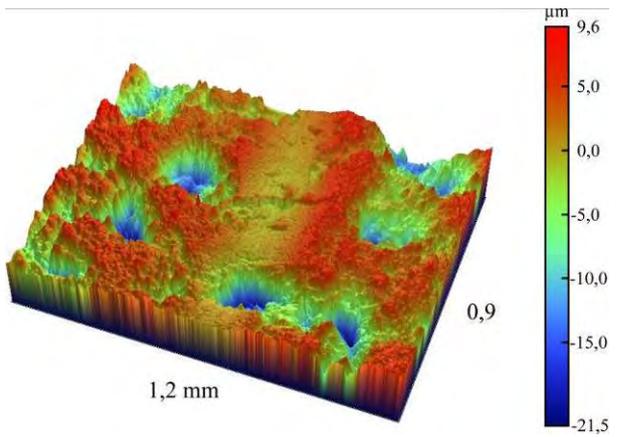
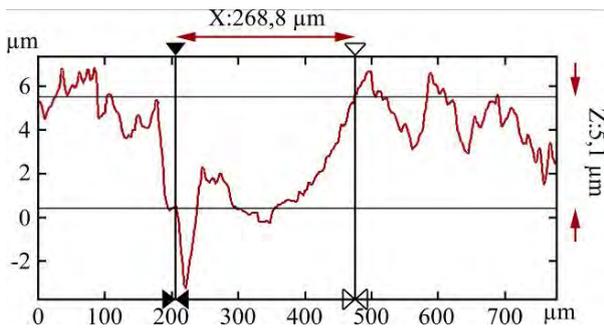
(a)



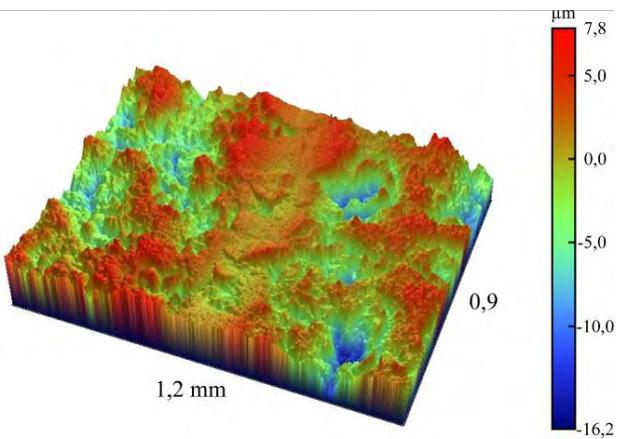
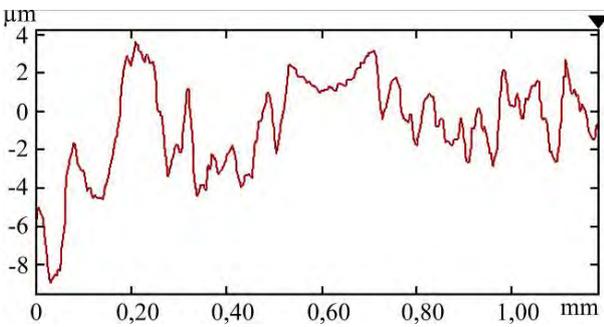
(б)



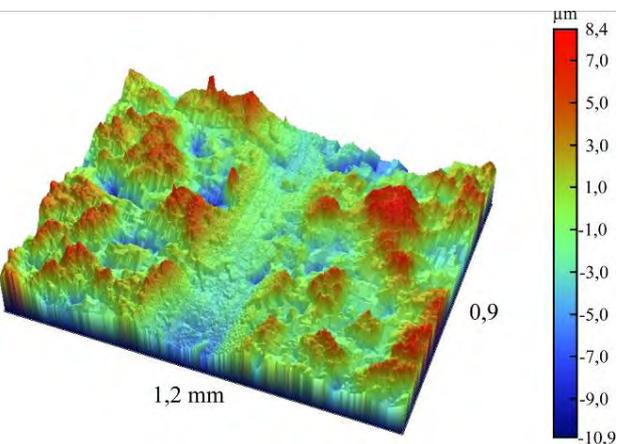
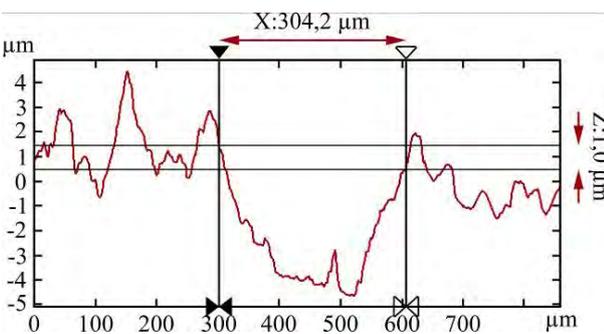
(B)



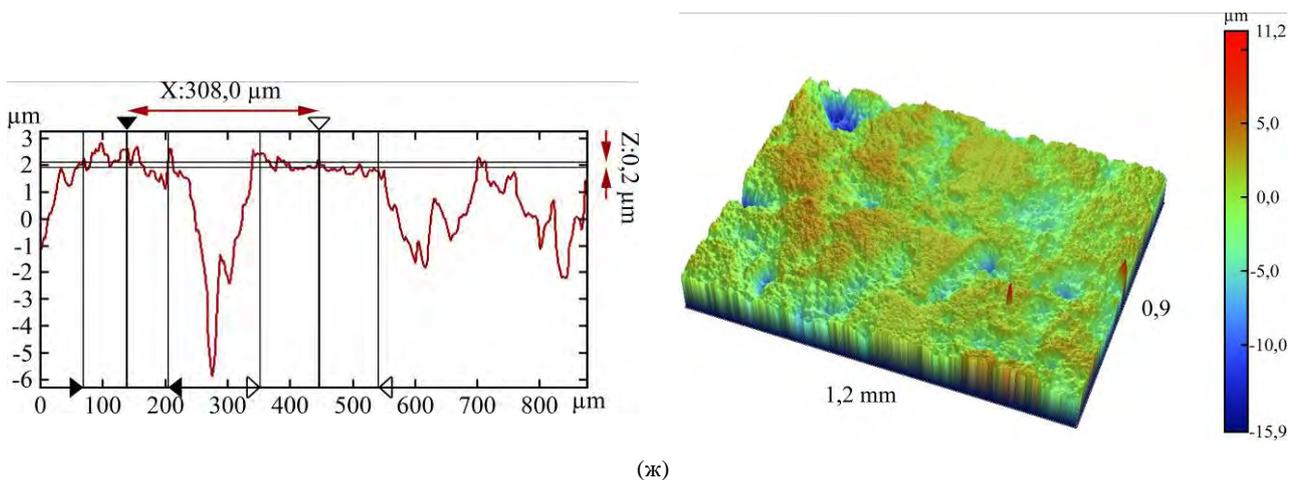
(r)



(д)



(e)



(ж)  
**Рис. 9.** Профиль дорожки износа и 3D-вид образцов: образец без покрытия из титанового сплава ОТ4-1 (а); СТИМ-20Н (б); СТИМ-20Н + пирографит (в); СТИМ-20Н + Химанит-Т (г); СТИМ-20Н + Нигран-В (д); СТИМ-20Н + УУКМ (е); СТИМ-20Н + 3D-композит (ж).

Таким образом, в результате обработки углеродсодержащими материалами электроискрового покрытия из сплава СТИМ-20Н на поверхности титанового сплава ОТ4-1 формируются износостойкие покрытия с низким коэффициентом трения. Данный факт связан с тем, что в поверхностном слое покрытий находится свободный графит, который является сухой смазкой.

Применение углеродсодержащих электродов способствует снижению твердости покрытий. В реальных условиях эксплуатации изделий с двухслойными электроискровыми покрытиями при удалении свободного графита с поверхностного слоя (выгорании, вымывании и пр.) из-за увеличения рельефа эксплуатационные свойства покрытий (износостойкость, жаростойкость) могут резко снизиться, что может привести к уменьшению ресурса работы изделий. Оптимальное время обработки углеродсодержащим материалом не должно превышать время легирования твердосплавным электродом. Увеличение частотно-энергетического режима обработки углеродсодержащим электродом не целесообразно из-за снижения микротвердости поверхностного слоя, а также повышения расхода электродного материала.

## ВЫВОДЫ

1. В результате электроискровой обработки титанового сплава ОТ4-1 электродом марки СТИМ-20Н получено покрытие сплошностью до 100 %, толщиной 30 мкм и твердостью 9,9 ГПа. Обработка углеродсодержащими электродами снижает твердость до 6,1–7,7 ГПа.

2. Электроискровые покрытия после обработки углеродсодержащими электродными материалами состоят из композиционных частиц размером 150–300 нм.

3. Свойства покрытий зависят от природы углеродсодержащих материалов. Обработка электродами из материалов марки Химанит-Т и Нигран-В, пирографита, УУКМ способствует уменьшению коэффициента трения и увеличению износостойкости покрытий. Обработка электродами из УУКМ крупнозернистого и силицированного графита способствует росту жаростойкости.

*Авторы выражают признательность Н.В. Швындиной за помощь в проведении структурных исследований, а также Т.А. Свиридовой за проведение рентгеноструктурного фазового анализа.*

*Авторы благодарны за финансовую поддержку Российскому научному фонду (Соглашение № 15-19-00203).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов*. М.: МИСИС, 1999. 416 с.
2. Гуляев А.П. *Металловедение*. М.: Металлургия, 1986. 544 с.
3. Горынин И. В., Ушков С.С., Хатунцев А.Н., Лошакова Н.И. *Титановые сплавы для морской техники*. СПб.: Политехника, 2007. 387 с.
4. Егоров А.А., Дровосеков М.Н., Аронов А.М., Рожнова О.М. и др. *Бюллетень сибирской медицины*. 2014, **13**(6), 41–47.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.20538/1682-0363-2014-6-41-47>
5. Пугачёв А.Н., Пучков А.П., Пучков В.Г. *Гений ортопедии*, 2004, (3), 89–95.
6. Петров В.М., Буцанец А.А., Безпальчук С.Н. *Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2016, **40**(6), 120–129.  
DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-120-129.

7. Prilutsky V.P., Rukhansky S.B., Akhonin S.V., Gadzyra N.F. et al. *PWJ*. 2012, (1), 15–17.
8. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М. *Электроискровое легирование металлических поверхностей*. Кишинев: Штиинца, 1985. 195 с.
9. Верхогуров А.Д., Подчерняева И.А., Прядко Л.Ф., Егоров Ф.Ф. *Электродные материалы для электроискрового легирования*. М.: Наука, 1988. 224 с.
10. Кудряшов А.Е., Левашов Е.А., Ветров Н.В., Шалькевич А.Б. и др. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2008, (3), 34–45.
11. Levashov E.A., Pogozhev Yu.S., Kudryashov A.E., Rupasov S.I., et al. *Russ J Non-Ferrous Met.* 2008, **49**(5), 397–403. DOI: 10.3103/S1067821208050167.
12. Kudryashov A.E., Potanin A.Yu., Lebedev D.N., Sukhorukova I.V. et al. *Surf Coat Technol.* 2016, **285**, 278–288.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.11.052>
13. Shelekhov E.V., Sviridova T.A. *Met Sci Heat Treat+*. 2000, **42**(8), 309–313.
14. Petrzhik M.I., Levashov E.A. *Crystallogr Rep.* 2007, **52**(6), 966–974. DOI: 10.1134/S1063774507060065
15. *Свойства элементов*. Справочник. Книга 1 под ред. М.Е. Дрица. М.: Руда и металлы, 2003. 448 с.

Поступила 14.08.17

После доработки 10.10.17

### Summary

Electrospark treatment of OT4-1 titanium alloy was performed sequentially with a hard-alloy electrode СТИМ-20Н (TiC-20%Ni) and carbon-containing material (graphite, composite materials based on carbon). A complex of investigations of the structure, composition and properties of the formed coatings has been carried out. It has been established that depending on the applied carbon-containing material, the electrospark treatment can favor decreasing the friction coefficient as well as enhancing the wear-resistance and scale resistance of the titanium alloy.

*Keywords: electrospark deposition, self-propagating high-temperature synthesis, electrode material, coating, pulse discharge, carbon-containing materials, wear resistance, heat resistance, coefficient of friction.*