

# **ИЗУЧЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕЧЕННЫХ И СВС-ЭЛЕКТРОДОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА, СОДЕРЖАЩИХ ГИДРОКСИАПАТИТ**

М.И. Петржик, А.Е. Кудряшов, М.А. Севостьянов, М.А. Смиронов  
НИТУ МИСиС  
ИМЕТ им. Байкова

# **STUDYING OF TRIBOLOGICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE ELECTROSPARK COVERINGS RECEIVED WITH USE BAKED AND SVS OF ELECTRODES ON THE BASIS OF CARBIDE OF THE TITAN, CONTAINING A HYDROXYAPATITE**

M. I. Petrzhik, A.E. Kudryashov, M.A. Sevostyanov, M.A. Smironov  
Institute of metallurgy and materials science of A. A. Baykovov of the Russian Academy of Sciences

Аннотация. В работе сделан анализ условий получения и формирования функциональных наноструктурных слоев образцов электроискровых покрытий на основе карбида титана, содержащих гидроксоапатит. Изучено влияние метода получения электродов  $TiC+Ca_3(PO_4)_2$ , содержания в них гидроксиапатита и среды осаждения покрытий (воздух, аргон и вода) на свойства функциональных наноструктурных слоев.

Ключевые слова: функциональные наноструктурные слои, карбид титана, гидроксоапатит, осаждение, среда, свойства

The summary. In work the analysis of conditions of receiving and formation of functional nanostructural layers of samples of the electrospark coverings on the basis of carbide of the titan containing is made gidroksoappatit. Influence of a method of receiving electrodes of  $TiS + Ca3(PO4) 2$ , the maintenance in them of a hydroxyapatite and the environment of sedimentation of coverings (air, argon and water) on properties of functional nanostructural layers is studied.

Keywords: functional nanostructural layers, carbide of the titan, gidroksoappatit, sedimentation, Wednesday, properties

## 1. Введение

В настоящее время идет очень бурное развитие промышленности - повышаются мощность оборудования и, как следствие, требования к его производительности, долговечности и надежности. В связи с этим материалы нуждаются в увеличении таких характеристик как износостойкость и твердость. Одним из наиболее эффективных технологических путей повышения надежности работы деталей и механизмов является нанесение на рабочую поверхность изделий различных покрытий [1].

Одним из таких методов можно назвать метод импульсного электроискрового осаждения (ИЭИО). В настоящее время ИЭИО используется для увеличения надежности и долговечности деталей машин и механизмов, аппаратов и приборов (контактов электрических машин, деталей высоковольтной разъединительной аппаратуры, рабочих поверхностей станин токарных станков, шаропрокатных валков); легирования рабочих поверхностей инструмента для увеличения его износостойкости (режущего, штамповочного, кокилей); размерного восстановления деталей машин[2].

При создании биомедицинских имплантов очень важно, чтобы его поверхность имела высокую адгезию и шероховатость, так как процесс остеоинтеграции имплантов напря-

мую связан со степенью развитости поверхности. Для этого применяют гидроксоапатит, так как его состав схож с составом костной ткани человека. Этот материал сложно получить и использовать в объемном виде, так как он очень хрупкий. Однако для имплантов достаточно слоя гидроксоапатита на поверхности. Для выполнения этих требований идеально подходит импульсное электроискровое осаждение, позволяющее получить высокую адгезию и имеющее возможность управлять шероховатостью поверхности осаждаемых слоев. [3].

Цель работы – провести сравнительный анализ условий получения и формирования функциональных слоев образцов электроискровых покрытий на основе карбида титана, содержащих гидроксоапатит. Изучить влияние метода получения электродов  $TiC + Ca_3(PO_4)_2$ , содержание в них гидроксиапатита и среды осаждения покрытий (воздух, аргон и вода) [4].

## 2. Материалы и методы исследований

### 2.1 Состав и получение электродов для ИЭИО

Для осаждения биомедицинских покрытий применяли электродные материалы на основе  $TiC_{0,5}$  с добавками  $Ca_3(PO_4)_2$  в количестве 10%, 15%, 20%, полученные методом СВС-компактирования, а также электродные

материалы на основе Ti с добавками  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  в количестве 10% и 20%, полученные методом порошковой металлургии. Полученными электродами были нанесены по-

крытия на титановую подложку в разной среде осаждения (Аргон, воздух, вода).

В таблице 1 представлено обозначение образцов

Таблица 1

Обозначение образцов

Образец	Состав	Среда осаждения	Метод получения
S57	$\text{TiC}_{0,5}\text{-}15\%\text{Ca}_3\text{PO}_4$	Аргон	СВС
S58	$\text{TiC}_{0,5}\text{-}15\%\text{Ca}_3\text{PO}_4$	Воздух	СВС
S59	$\text{TiC}_{0,5}\text{-}15\%\text{Ca}_3\text{PO}_4$	Вода	СВС
S60	$\text{TiC}_{0,5}\text{-}10\%\text{Ca}_3\text{PO}_4$	Вода	СВС
S61	$\text{TiC}_{0,5}\text{-}20\%\text{Ca}_3\text{PO}_4$	Вода	СВС
S62	$\text{Ti-}10\%\text{Ca}_3\text{PO}_4$ (T=900 °C)	Вода	ПМ
S63	$\text{Ti-}20\%\text{Ca}_3\text{PO}_4$ (T=900 °C)	Вода	ПМ
S64	$\text{Ti-}10\%\text{Ca}_3\text{PO}_4$ (T=1160 °C)	Вода	ПМ
S65	$\text{Ti-}20\%\text{Ca}_3\text{PO}_4$ (T=1160 °C)	Вода	ПМ

\*СВС – Силовое СВС-компактирование; ПМ – Порошковая металлургия

В работе использовались порошковые материалы, представленные в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики исходных порошков

Исходный материал	Марка порошка	Дисперсность, мкм
Титан	ПТС (ТУ 14-1-3086-80)	менее 45
Углерод технический (сажа)	П804Т (ТУ 38-1154-88)	0,1
Ортофосфат кальция трехзамещенный	ТУ 2148-008-179-52450-02	менее 45

Порошок ортофосфата кальция предварительно прокаливался в муфельной печи при температуре 800 °C в течение 3 часов в воздушной атмосфере. Синтез материалов осуществлялся по технологии силового СВС - компактирования в «песчаной» прессформе

[5]. Составы экзотермических смесей, использованных в работе, варьировались в соответствии с условием:  $(90\%-\text{X})(\text{Ti}+0,5\text{C}) + 10\%\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , где параметру зашихтовки X придавались следующие значения 9, 18, 27, 36, 45% (Таблица 3).

Таблица 3

Составы шихты и характеристики СВС – процесса

X, масс. %	Состав шихты, вес. %			Расчетная адиабатическая температура горения, °C	Скорость горения, см/с
	Ti	C	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$		
9	72,09	9,47	10	1800	1,19
18	64,08	9,04	10	1830	1,21
27	56,07	8,61	10	1850	1,22
36	48,06	8,18	10	1875	1,18
45	40,05	7,75	10	1900	1,17

Процесс приготовления шихты для проведения СВС - процесса включал в себя сушку порошковых реагентов в сушильном шкафу при температуре 90 °С, их рассев и смешивание в шаровой вращающейся мельнице объемом 3 литра при соотношении массы шихты к массе размольных тел 1:6 в течение шести часов. Предварительное прессование (получение шихтового брикета) осуществлялось в цилиндрической пресс-форме диаметром 78 мм путем подбора параметров прессования таким образом, чтобы относительная плотность шихтового брикета составляла 55-60 %. Для получения беспористого продукта синтез проводили в песчаной пресс-форме на гидравлическом прессе ДА-1532Б (максимальное усилие 160 тонн). При этом силовое воздействие в 42 МПа прикладывалось к горячим продуктам синтеза спустя 1 с. после завершения процесса горения. Последующее охлаждение образцов проводилось в песке. Время горения смесей контролировалось с помощью фотодиода, установленного непосредственно в реакционной пресс-форме с противоположной стороны от иницирующей вольфрамовой спирали, по разнице времен между сигналом от фотодиода (конец горения) и началом горения (момент иницирования). Зная диаметр образца, определялась скорость горения. Адиабатическая температура горения исследуемых составов рассчитывалась с помощью термодинамической программы «ТЕРМО» [36], разработанной в ИСМАН.

Состав электродов, полученных методом порошковой металлургии отличается от состава электродов, полученных силовым СВС-компактированием. В них, вместо TiC присутствует порошок титана. Смешение порошка титана марки ПТК фракции 0-45 мкм с порошком  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  осуществлялось в планетарной мельнице PULVERISETTE 5 фирмы Dr. Fritsch (Германия). Соотношение массы шаров к массе материала 5:1. При перемешивании использовали стальные шары

диаметром 5 мм. Скорость вращения барабанов 300 об/мин, время смешения 10 мин.

Прессование брикетов осуществлялось на гидравлическом прессе. Масса навески 3 г. Давление прессования 3 т/см<sup>2</sup>. Спекание полученных штабиков проводили в вакуумной электропечи шахтного типа «СШОЛ 1.1,6/12-М3» в вакууме 0,13 Па при температуре от 1150 °С и времени изотермической выдержки 60 мин. Размеры прессовок составляли 4×6×40 мм. Усадка после спекания составила: по ширине = 3%, по высоте  $H = 8\%$ , по длине  $L = 2,5\%$

## 2.2 Технология нанесения покрытий

Нанесение покрытий методом ИЭИО проводили на лабораторном стенде электроискрового осаждения «ALIER – METAL 2000». В работе были использованы различные типы электродов в зависимости от области применения модифицированных слоев. Покрытия наносились на титановую подложку марки BT1-0.

Для осаждения биомедицинских покрытий применяли электроды на основе  $\text{TiC} + \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , полученные методами порошковой металлургии и СВС-компактирования, как указано в таблице 4. Варьируемыми технологическими параметрами процесса ИЭИО являлась среда осаждения (воздух/аргон/вода).

Электроды, используемые в данной работе, наносились при следующем режиме: ток 120 А, длительность импульсов 10 мкс, частота импульсов 3000 Гц.

Для исследования электродов и образовавшихся покрытий применяли неразрушающие методы исследования: рентгеноструктурный фазовый анализ и оптическую профилометрию, а также разрушающие испытания: трибологические испытания и измерительное индентирование

Для получения фазового состава электродов и образцов применяли рентгеноструктурный фазовый анализ (Табл.4).

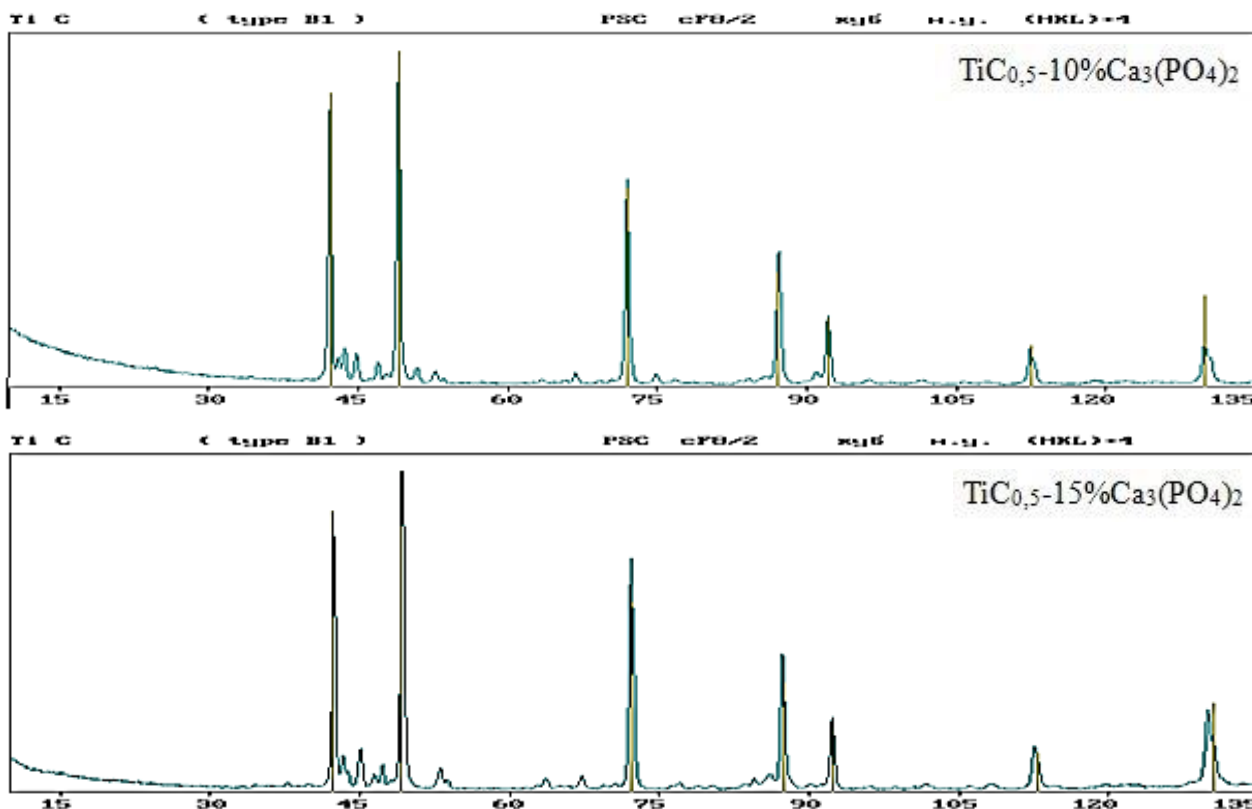
Таблица 4

Фазовый состав электродов

Фаза		Об. Доля, %	Вес. Доля, %	Периоды, нм.
TiC <sub>0,5</sub> -10%Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	Ti C ( type B1 )	77.6 ± 0.1	78.2 ± 0.1	a= 0.4302
	Ca O ( type B1 )	2.7 ± 0.1	1.8 ± 0.1	a= 0.4803
	Ti <sub>3</sub> P O(x)( type E1a )	15.6 ± 0.1	15.1 ± 0.1	a=0.3252 b=1.0087 b= 0.7929
	Ti O ( type B1 )	4.1 ± 0.0	4.9 ± 0.1	a= 0.4160
TiC <sub>0,5</sub> -15%Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	Ti C ( type B1 )	74.1 ± 0.1	76.3 ± 0.1	a= 0.4304
	Ca O ( type B1 )	4.7 ± 0.1	3.2 ± 0.1	a= 0.4814
	Ti <sub>3</sub> P O(x) ( type E1a )	19.6 ± 0.1	19.0 ± 0.1	a=0.3238 b=1.0130 c= 0.7941
	alpha-Ti* ( type A3 )	1.6 ± 0.0	1.4 ± 0.0	–
TiC <sub>0,5</sub> -20%Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	Ti C ( type B1 )	74.2 ± 0.1	76.6 ± 0.1	a= 0.4307
	Ca O ( type B1 )	5.7 ± 0.1	4.0 ± 0.0	a= 0.4808
	Ti <sub>3</sub> P O(x) ( type E1a )	17.1 ± 0.1	16.9 ± 0.1	a=0.3229 b=1.0141 c= 0.7945
	Ca Ti O <sub>3</sub>	3.0 ± 0.1	2.6 ± 0.1	–

\* Последняя фаза – не чистый титан, а раствор внедрения на его основе

Дифракционные спектры электродов, синтезированных методом СВС, представлены на рис. 1



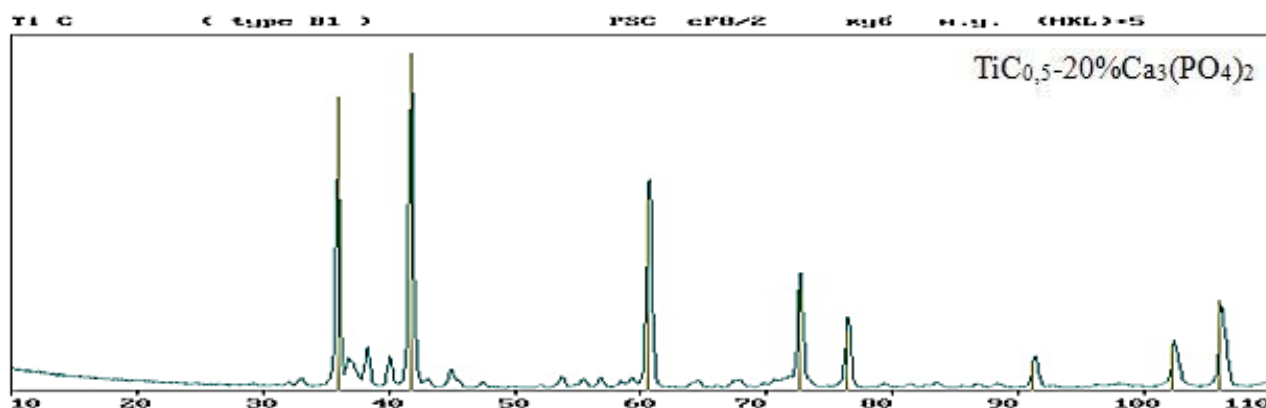


Рисунок 1 – Спектры электродов с 10%, 15% и 20% содержания  $Ca_3(PO_4)_2$  соответственно  
Фазовый состав образцов представлен в таблице 5

Таблица 5

Количественный анализ образцов

Фаза	Об.Доля, %	Периоды, нм	Фаза	Об.Доля, %	Периоды, нм
S57			S61		
alpha-Ti (type A3 )	42.7	a= 0.2947 c= 0.4676	alpha-Ti(type A3 )	33.5	a= 0.2947 b= 0.4675
Ca O ( type B1 )	2.8	a= 0.4809	Ti C ( type B1 )	7.6	a= 0.4278
Ti O(x) ( type A3 )	13.1	a= 0.2973 c= 0.4762	Ti O(x) ( type A3 )	30.0	a= 0.2972 c= 0.4780
Ti (C,N) ( type B1 )	41.4	a= 0.4285	Ti (N,O) (type B1)	28.9	a= 0.4232
S58			S62		
alpha-Ti ( type A3 )	28.5	a= 0.2946 c= 0.4672	alpha-Ti( type A3)	23.4	a= 0.2948 c= 0.4675
Ca O ( type B1 )	1.8	a= 0.4808	Ti C ( type B1 )		
Ti O(x) ( type A3 )	21.2	a= 0.2966 c= 0.4767	Ti O(x) ( type A3 )	52.6	a= 0.2965 c= 0.4780
Ti (C,N) ( type B1 )	48.4	a= 0.4265	Ti (N,O)( type B1)	24.0	a= 0.4192
S59			S63		
alpha-Ti ( type A3 )	38.0	a= 0.2947 c= 0.4675	alpha-Ti(type A3 )	23.3	a= 0.2948 a= 0.4675
Ca O ( type B1 )	2.5	a= 0.4295	Ti C ( type B1 )		
Ti O(x) ( type A3 )	30.9	a= 0.2971 c= 0.4778	Ti O(x) ( type A3 )	25.1	a= 0.2967 c= 0.4788
Ti (C,N) ( type B1 )	28.5	a= 0.4231	Ti (N,O) (type B1)	51.2	a= 0.4190
			Ti3PO(x) (type E1a)	5.8	–
S60					
alpha-Ti( type A3)	40.2	a= 0.2947 c= 0.4675			
Ti C ( type B1 )	4.0	a= 0.4290			
Ti O(x) ( type A3 )	32.6	a= 0.2970 c= 0.4778			
Ti (N,O)( type B1)	23.2	a= 0.4229			

При изучении состава электродов можно заметить, что при изменении среды осаждения покрытия изменялась объемная доля

фаз. Такая зависимость объемной доли фазы от содержания кислорода в среде осаждения показана на рисунке 2.

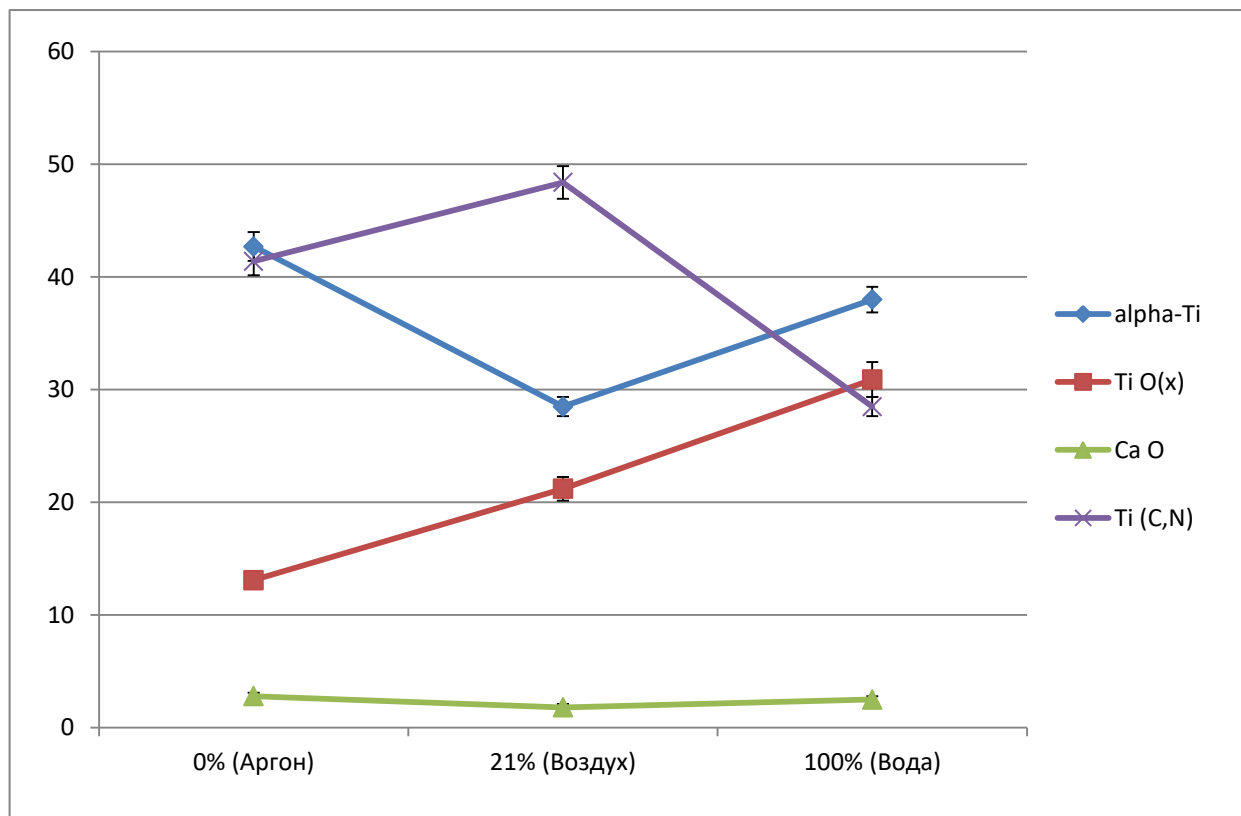


Рис. 2 – Зависимость объемной доли фазы от содержания кислорода

На данном графике видно, что в водной среде содержание  $TiO(x)$  больше, так как в данном случае процесс осаждения происходит при практически 100% содержании кислорода. При нанесении на воздухе содержание кислорода меньше и составляет 21%, в то время как при нанесении покрытия в аргоне кислород отсутствует. Следовательно, при увеличении процентного содержания кислорода в среде увеличивается количество оксида титана  $TiO(x)$  и, как следствие, уменьшается содержание карбидной составляющей  $Ti(C,N)$ .

### 3. Обсуждение результатов

#### 3.1. Измерение шероховатости поверх-

ности методом оптической профилометрии

Шероховатость образцов измеряли на оптическом профилометре методом вертикальной сканирующей интерферометрии (VSI) и усредняли по четырем точкам, как показано в таблице 6. Типичное трехмерное изображение поверхности образцов представлено на рис. 3. Наибольшая шероховатость поверхности ( $Ra=3.48$ ,  $Rz=34.90$ ) характерна для покрытия S62, полученного методом порошковой металлургии, с использованием электрода  $Ti-10\%Ca_3PO_4$ , а наименьшая – для покрытия S57, полученного методом силового СВС-компактирования, с использованием электрода  $TiC_{0,5}-15\%Ca_3PO_4$ .

Таблица 6

Шероховатость поверхности образцов

Образец	Шероховатость, мкм									
	Ra					Rz				
					Среднее значение					Среднее значение
S57	2.00	1.95	1.84	1.97	1.94	18.56	17.83	17.55	17.66	17.68
S58	2.25	2.19	2.21	2.28	2.23	20.70	20.72	18.43	19.88	19.93
S59	2.71	2.93	2.85	2.69	2.79	20.62	21.15	26.58	19.49	20.42
S60	3.16	3.25	3.17	3.22	3.20	22.81	23.54	22.11	24.17	22.82
S61	2.86	2.91	2.73	2.78	2.82	20.65	23.06	19.85	21.06	20.52
S62	3.48	3.40	3.11	3.04	3.26	36.51	34.90	31.23	31.57	32.57
S63	3.21	3.02	2.91	2.97	2.71	28.32	28.08	27.15	28.32	27.97
S64	2.67	2.62	2.48	2.52	2.57	24.41	23.37	23.48	24.56	23.96
S65	2.20	2.56	2.43	3.09	2.40	26.91	27.88	27.05	31.62	27.28

Примечание: цветом выделены исключенные значения шероховатости

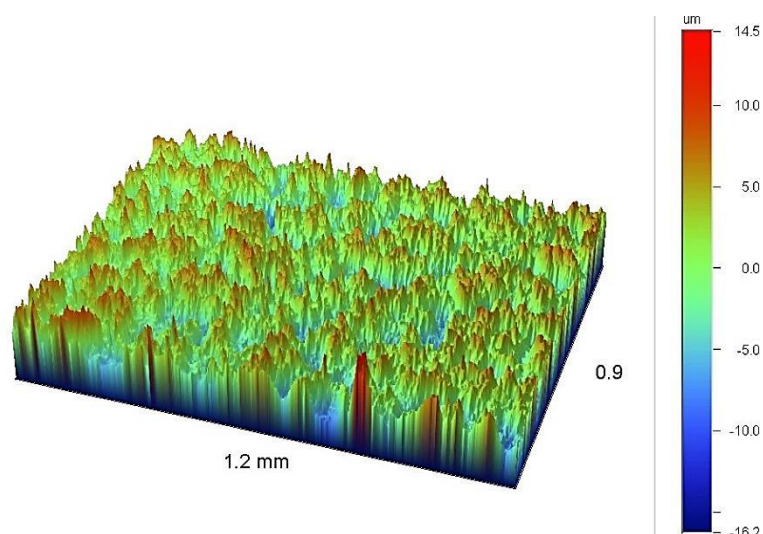


Рисунок 3 – Поверхность образца S59 при измерении оптическим профилометром.

3.2 Результаты трибологических испытаний

Трибологические испытания проводились при условиях, указанных в таблице 8. Были исследованы 9 образцов с разными способами нанесения и разным процентным содержанием  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ .

При рассмотрении графика зависимости коэффициента трения от пробега видно, что в

начале испытания происходит скачок коэффициента трения, что связано с процессом приработки покрытия, обладающего большой шероховатостью, и контртела. После приработки коэффициент трения выходит на постоянное значение. При рассмотрении графиков зависимости КТ от пробега видно, что данные значения у образцов S57, S58, S59, S60, S61 близки и находятся на уровне 0,44



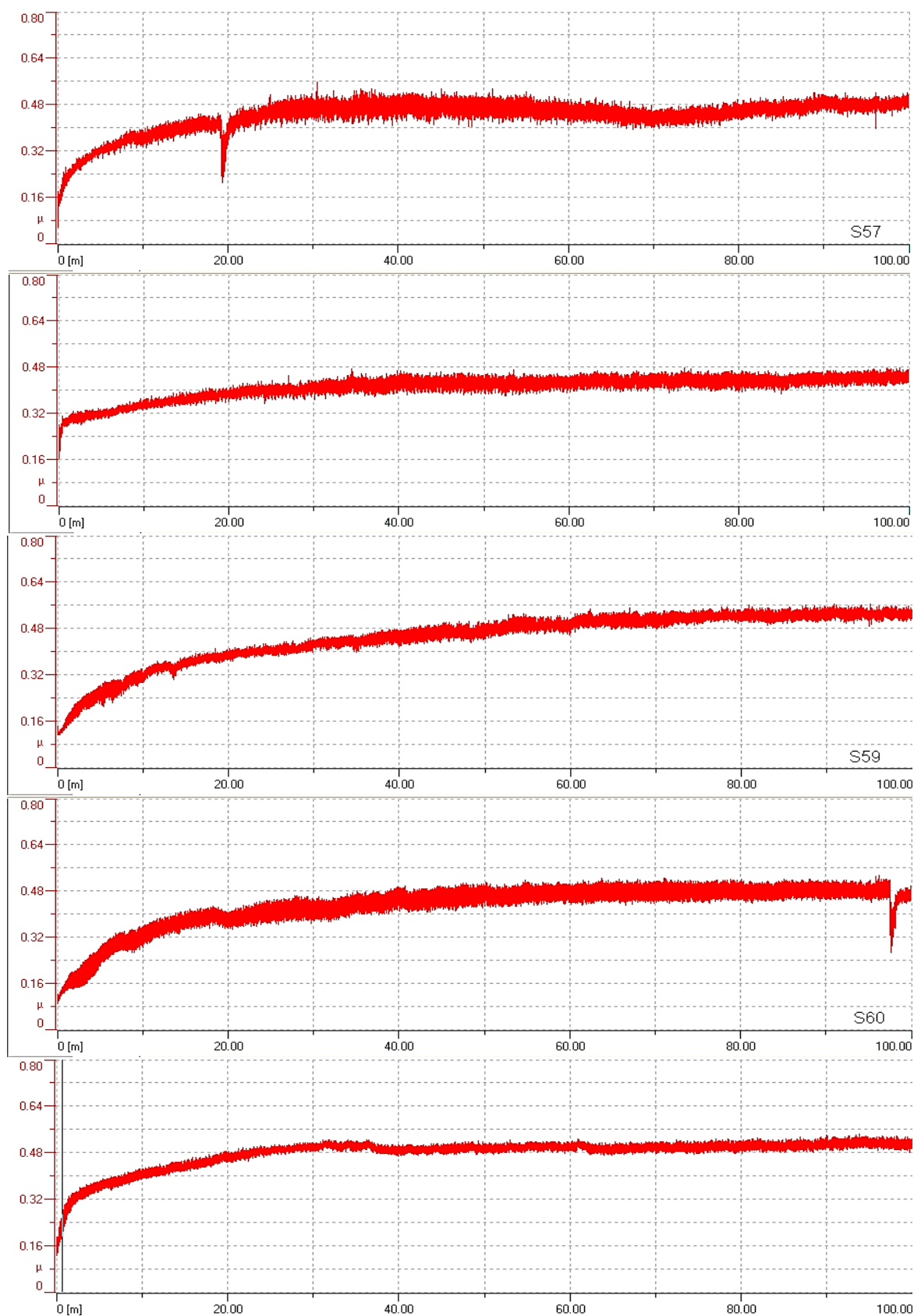


Рисунок 4 - Зависимость коэффициента трения от пробега (м) для образцов S57, S58, S59, S60, S61 соответственно

Для образцов S62, S63, S64, S65 значение коэффициента трения выше и находится в пределах от 0,54 до 0,67.

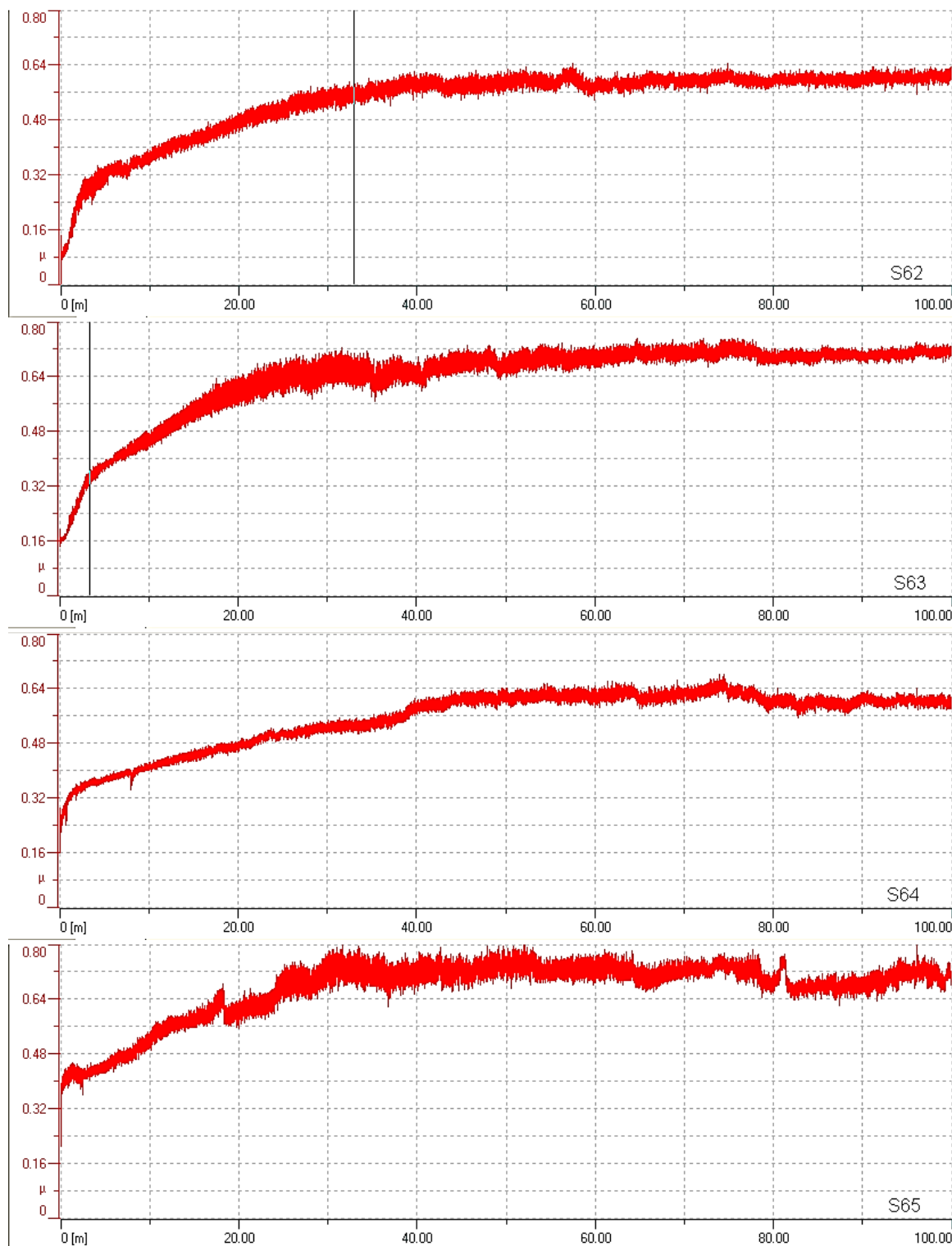


Рисунок 5 - Зависимость коэффициента трения от пробега (м) для образцов S62, S63, S64, S65 соответственно

Для расчета износа образца с помощью оптического профилометра были исследованы бороздки износа, по которым вычислялась площадь методом аппроксимации (Рис. 6)

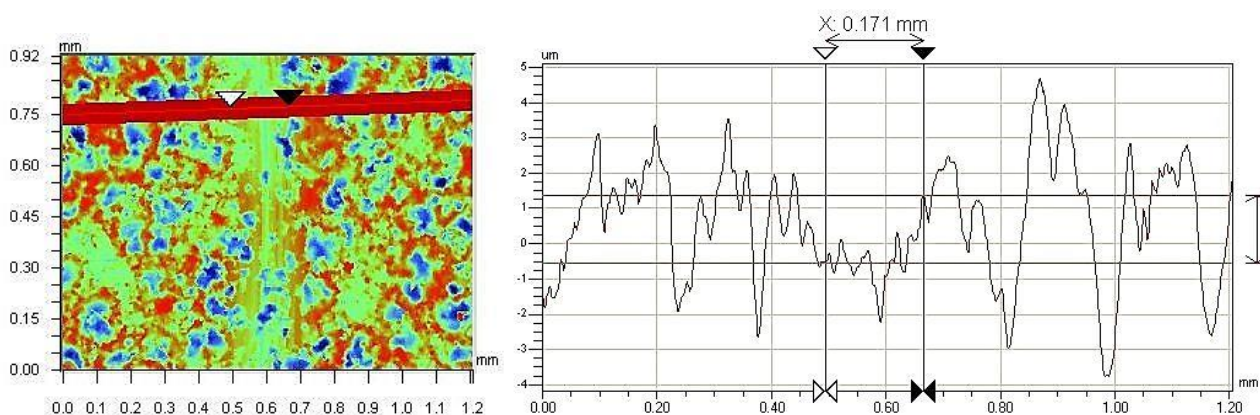


Рисунок 6 – профиль бороздки износа образца S58

Результаты испытаний приведены в таблице 8, из которой видно, что наименьший коэффициент трения (КТ) проявляет образец S58, наибольший S65. У остальных образцов КТ находится в пределах 0.432-0.636

Таблица 9

Трибологические характеристики исследованных образцов

Образец	Коэффициент трения (КТ)				Площадь мкм <sup>2</sup>	Износ *10 <sup>-5</sup> мм <sup>3</sup> /Н/м
	Начальный	Максимальный	Конечный	Средний		
S57	0,06	0.56	0.49	0.44	216.15	5.48
S58	0.28	0.48	0.45	0.41	336	8.5
S59	0.14	0.56	0.53	0.45	240.83	6.09
S60	0.12	0.54	0.47	0.43	538	13.6
S61	0.19	0.55	0.51	0.48	749	18.96
S62	0.15	0.64	0.62	0.54	1298	32.86
S63	0.15	0.75	0.71	0.64	853.83	21.62
S64	0.16	0.68	0.59	0.55	380.5	9.6
S65	0.21	0.83	0.70	0.67	490.25	12.4

Из таблицы 13 видно, что значения коэффициента трения для образцов, полученных при помощи СВС электродов меньше, чем у образцов, электроды которых были изготовлены методом порошковой металлургии. Отсюда следует, что тип и состав электрода оказывают влияние на значение КТ и износ

образцов. Согласно полученным данным, наименее изнашиваемым является образец S57, полученный в среде аргона с помощью электрода изготовленного методом силового СВС-компактирования с 15% содержанием Са<sub>3</sub>РО<sub>4</sub>. Среда получения покрытий не влияет ни на одну из данных характеристик.

После трибологических испытаний были сфотографированы образовавшиеся дорожки износа. При рассмотрении бороздки износа видно, что для всех исследуемых образцов она схожа (Рисунок. 7). Это сви-

детельствует о протекании изнашивания по одному механизму. Дорожка износа покрытия имеет неровную, шероховатую поверхность. Произошло частичное истирание покрытия.

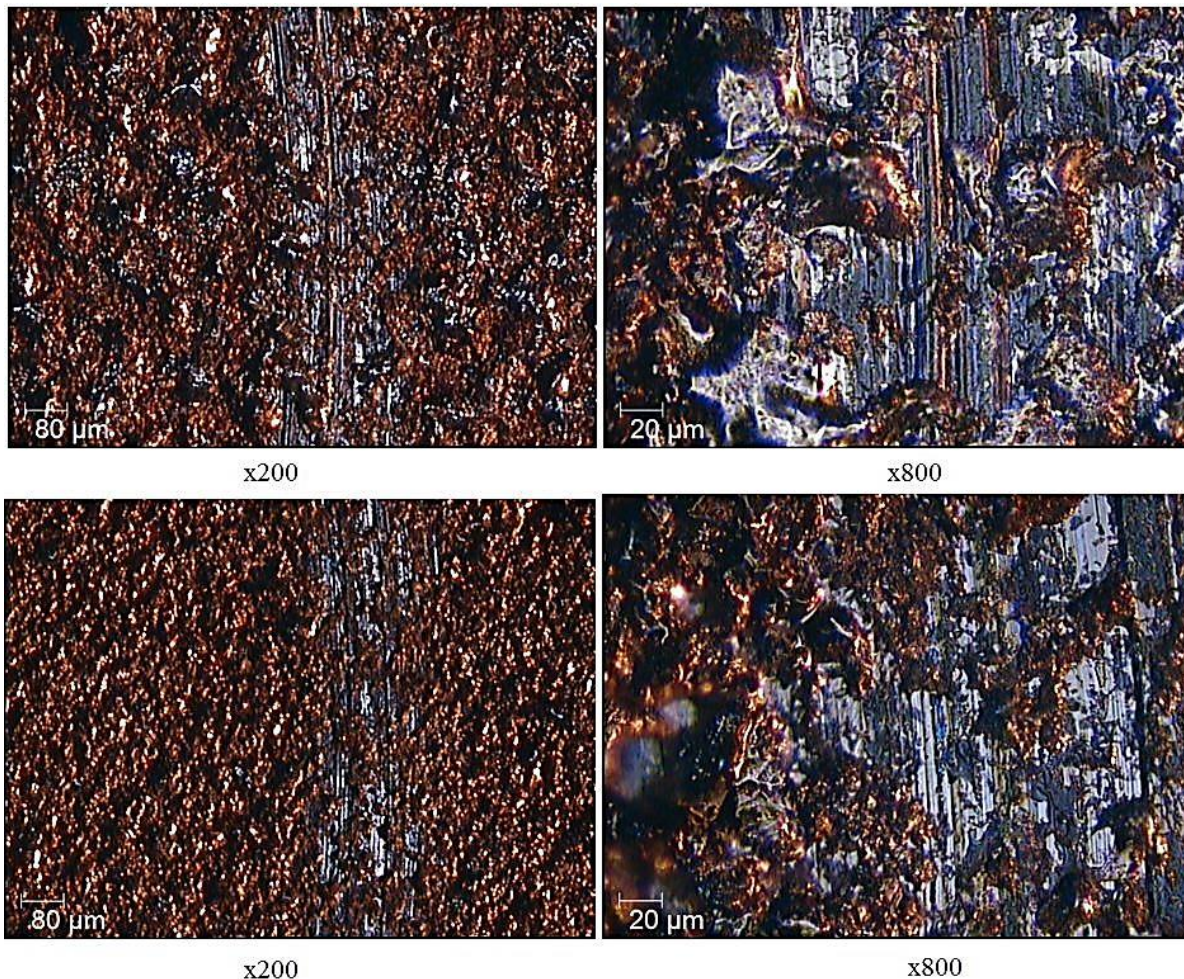


Рисунок 7 – Фото бороздки износа образцов S59 и S62 при разных увеличениях

При испытании покрытия, нанесенного на титановую подложку, произошел небольшой износ покрытия и износ шарика из оксида

алюминия. При изучении износа контртела видно, что произошло истирание поверхности шарика, а также частичное налипание (Рис. 8).

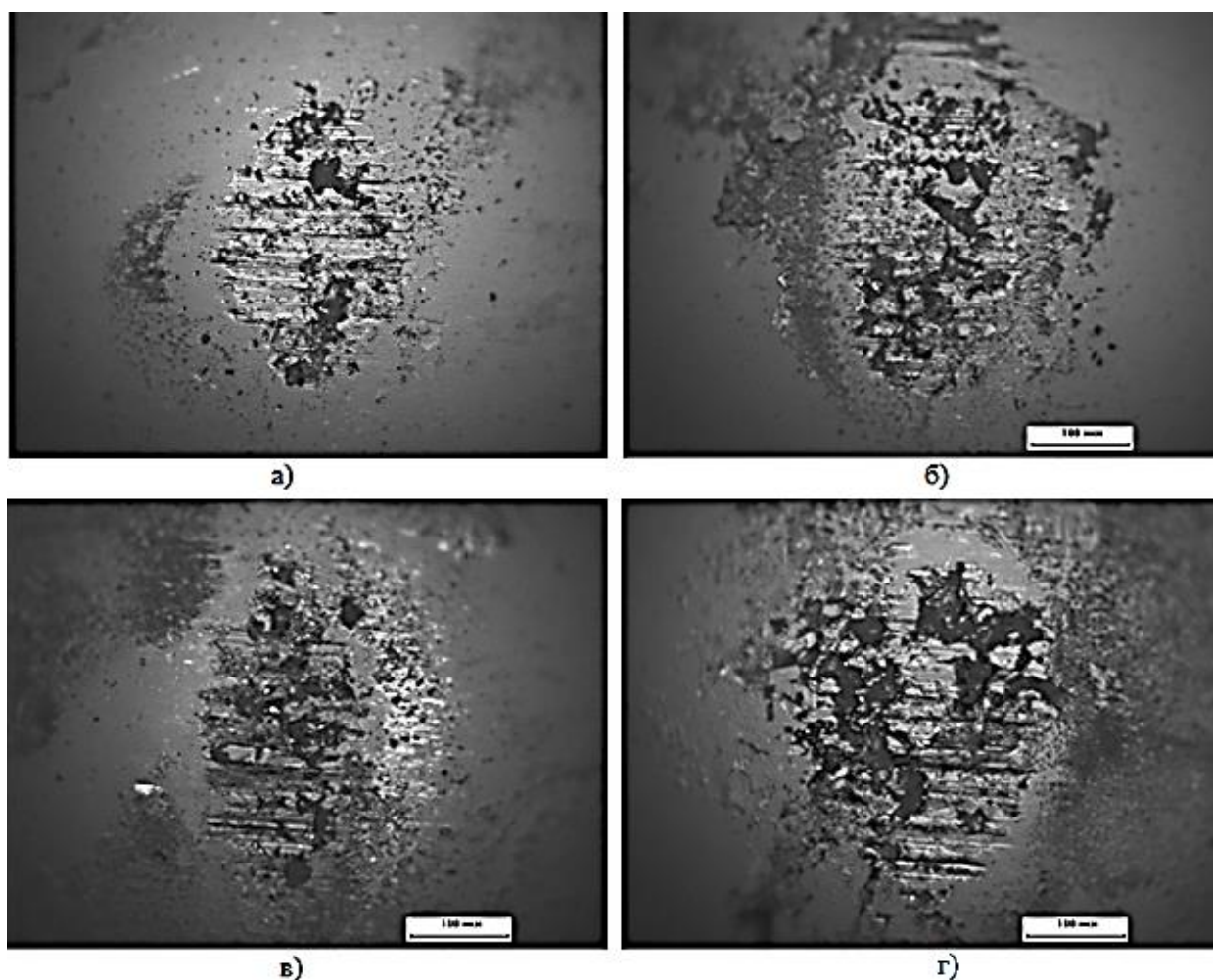


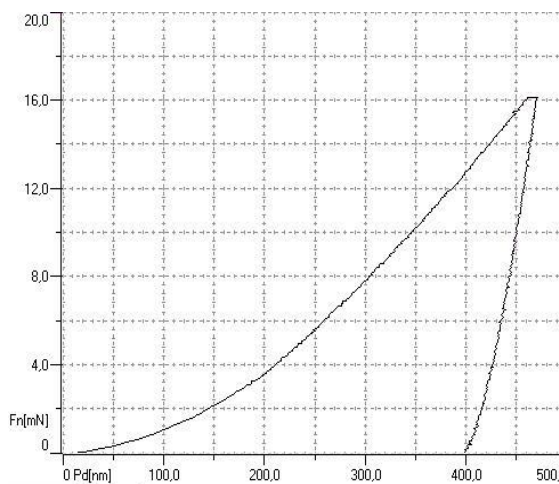
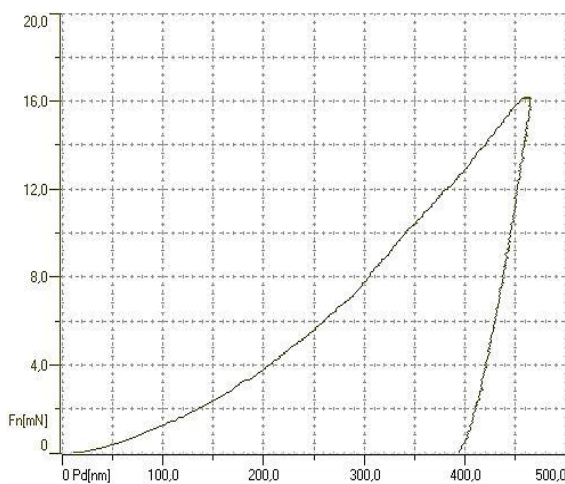
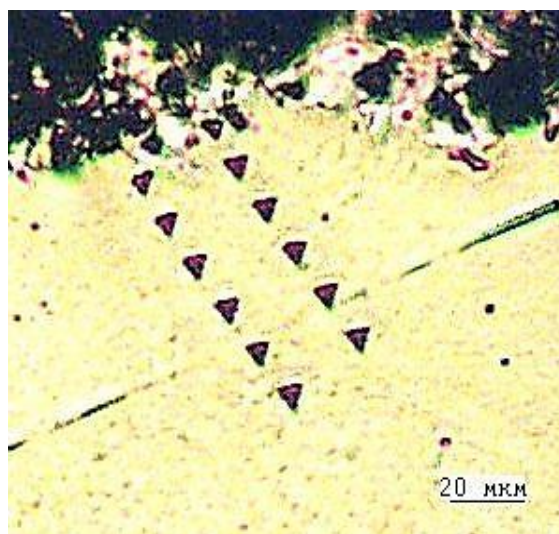
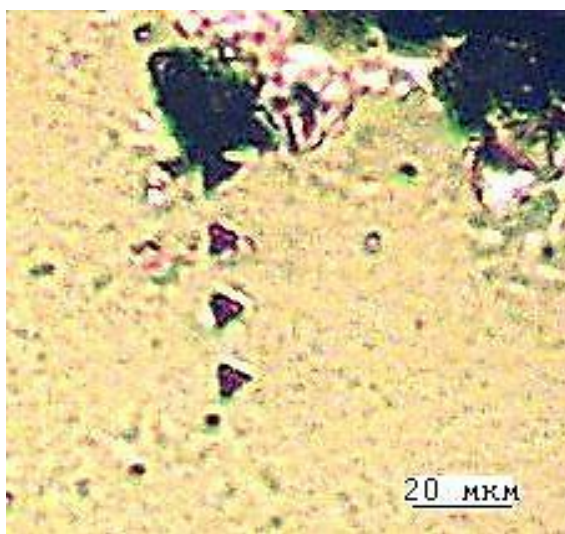
Рисунок 8 – Фотографии контртел при увеличении x200 а)S57 б)S58 в)S61 г)S62

После приготовления косо́го шлифа были проведены измерения механических свойств покрытий и подложки методом матричного индентирования. Условия проведения испытаний указаны в таблице 9. Были исследованы образцы S57 и S58, полученные нанесением электрода  $TiC_{0.5}-15\%Ca_3PO_4$  среде аргона и воздуха соответственно. Для обоих образцов было проведено по 2 наноиндентирования. Результаты представлены в таблице 10. При рассмотрении образца S57, оба измерения показали схожие значения твердости, модуля Юнга, а также глубины погружения индентора и глубины отпечатка после снятия нагрузки.

Таблица 10

Результаты измерений

Образец	Среднее значение твердости, ГПа		Среднее значение модуля упругости, ГПа		Ср. знач. глубины погружения индентора, нм		Ср. знач. глубины после снятия нагрузки, нм	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Испытание	1	2	1	2	1	2	1	2
S57	3.4	3.3	129	132	465	470	392	398
S58	3.3	8.5	130	150	468	348	394	245



а)

б)

Рисунок 9 – Фотографии и кривые образца S57 при первом (а) и втором (б) испытании

При исследовании первого измерения образца S58 оказалось, что твердость и модуль упругости идентичны предыдущему

образцу, равно как глубина погружения индентора и глубина после снятия нагрузки (Рис. 9).

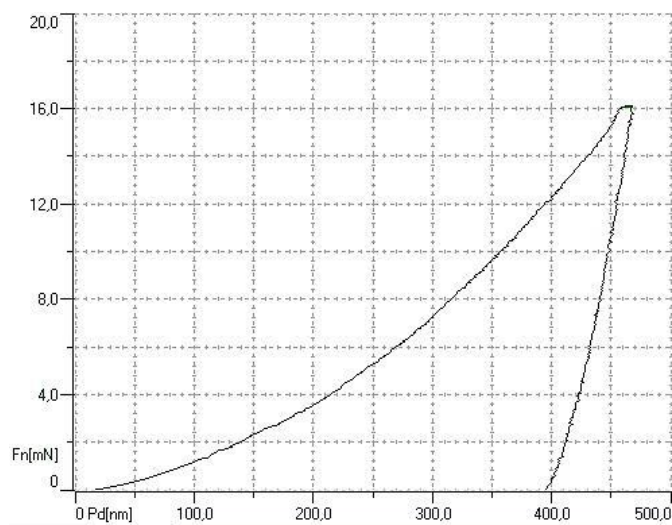


Рисунок 10 – Фотография и типичная кривая индентирования

Однако при исследовании второго измерения значения исследуемых характеристик оказались различны. Это видно на кривых,

представленных на рисунке 10. Значения твердости и модуля упругости показаны в таблице 11.

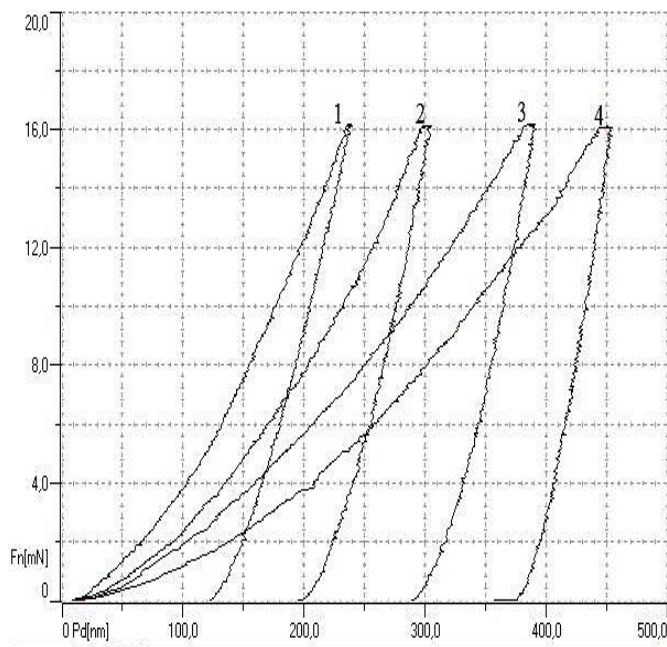
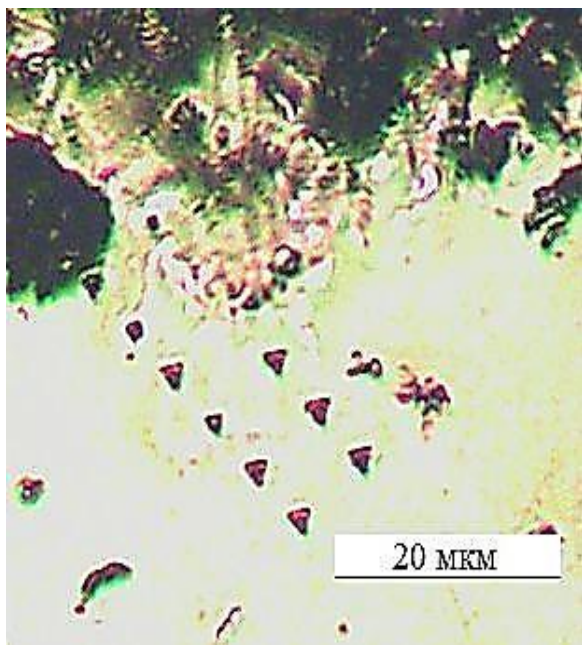


Рисунок 11 – Фотография и кривые индентирования образца S58

Таблица 11

Механические характеристики образца S58

Точка	Твердость, ГПа	Модуль упругости, ГПа	Глубина погружения индентора, нм	Глубина после снятия нагрузки, нм
1	16.6	187	240	120
2	8.8	157	305	195
3	5.1	126	390	285
4	3.5	128	454	378

Такое различие показывает, что во время измерения индентор попадал в разные фазы образца. Точка 1 соответствует фазе Ti(C,N), однако значение модуля упругости мало. Это можно объяснить тем, что содержание углерода в титане 0.5, что приводит к деформации структуры и уменьшению прочностных свойств. Точка 2 относится к фазе TiO(x). Точка 3 принадлежит к фазе CaO. Характеристики точки 4 соответствуют характеристикам титановой подложки.

Также было проведено индентирование подложки. На рисунке 12 представлена усредненная по 4 измерениям кривая индентирования подложки. Среднее значение твердости составило 3.6 ГПа (отклонение 334.2 ГПа), среднее значение модуля упругости 110 ГПа. (отклонение 5 ГПа). Значения характеристик совпадают со значениями исследованного образца. Это показывает, что при нанесении покрытия методом ИЭИО подложка не изменила свой состав.

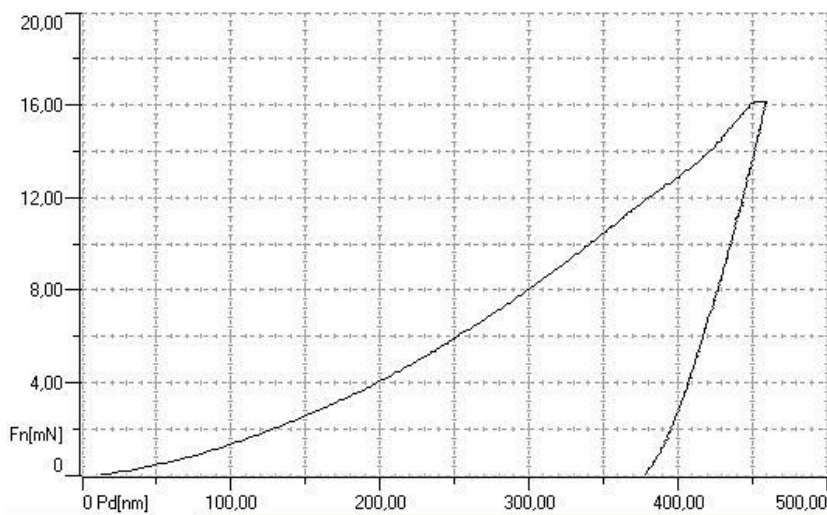


Рисунок 12 – Кривая индентирования подложки.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что среда осаждения при нанесении покрытия не влияет на механические свойства исследуемых образцов.

### Выводы

1. Проведен сравнительный анализ условий получения и формирования функциональных слоев образцов и изучены триболо-



гические и механические свойства электроискровых покрытий, полученных с использованием спечённых и СВС электродов.. Выяснено, что среда осаждения при нанесении покрытия не влияет ни на коэффициент трения (КТ), ни на износ, ни на механические свойства исследуемых образцов. Значение шероховатости чуть больше у покрытий, полученных с использованием порошковых электродов.

2. Изучено влияние метода получения электродов, содержание в них  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  и

среды осаждения покрытий. Обнаружено, что значения коэффициента трения для образцов, полученных при помощи СВС электродов меньше, чем у образцов, электроды которых были изготовлены методом порошковой металлургии. Отсюда следует, что тип и состав электрода оказывают влияние на значение КТ и износ образцов. Наименее изнашиваемым является образец S57, полученный в среде аргона с помощью электрода изготовленного методом силового СВС-компактирования с 15% содержанием  $\text{Ca}_3\text{PO}_4$ .

#### Литература

1. Зенин Б.С., Овечкин Б.Б. Современные технологии модифицирования поверхности и нанесения покрытий // Учебное пособие. – 2008.
2. А.Д. Верхотуров, С.В. Николенко. Классификация, разработка и создание электродных материалов для электроискрового легирования // Упрочняющие технологии и покрытия.– 2010, №2.
3. Musil J., Zeman H., Kunc F., Vlček // J. Mater. Sci. Eng. 2002. V. 340. P. 281.
4. Петржик М.И., Филонов М.Р., Печеркин К.А., Левашов Е.А. Износостойкость и механические свойства сплавов медицинского назначения. // Изв. Вузов. Цв. Металлургия. 2005. №6. С.62
5. Puszynski J. A. // Int. J. of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. Vol. 10, № 3. 2001. P. 265.