

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КИНЕТИКИ МАССОПЕРЕНОСА ОТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЭИЛ ЭЛЕКТРОДАМИ TiCNiCr

Сытченко А.Д.,  
Кирюханцев-Корнеев Ф.В.

«Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»», Москва

Развитие современной техники, связанной с повышением ее производительности и надежности, требует увеличения износостойкости оборудования. При исчерпании ресурсов прочности материалов используют различные технологии упрочнения и восстановления рабочих поверхностей машин. В настоящее время, наиболее эффективными экономически целесообразным из них является метод электроискрового легирования (ЭИЛ). В качестве электродных материалов для ЭИЛ в основном используют твердые сплавы на основе карбида вольфрама. Переход к безвольфрамовым твердым сплавам системы TiC-Ni позволяет снизить себестоимость процесса упрочнения. Введение Cr в состав электродов позволяет изменить структуру и химический состав поверхностных слоев стальных подложек, тем самым повысить коррозионную стойкость и жаростойкость.

Данная работа посвящена исследованию кинетики массопереноса при ЭИЛ стальных заготовок электродами TiCNiCr в зависимости от прямой (подложка-катод) (ПП) и обратной (подложка-анод) (ОП) полярности, а также изучение структуры и свойств полученных покрытий.

## Методика эксперимента

Для осаждения покрытий использовались электроды TiCNiCr размером 4×4×50 мм, полученные методом порошковой металлургии из порошков TiC (81.05 вес. %), Cr (8.20 вес. %), Ni (5.10 вес. %). Покрытия наносили на диски из стали 40х размером Ø30х5 мм методом электроискрового легирования в среде Ag на установке «Alier-Metal 303» в течение 30 мин. Предварительно была произведена механическая шлифовка и полировка подложек на установке Struers RotoPol-21.

Кинетика массопереноса (удельный привес катода Δk и удельная эрозия анода Δa) была исследована гравиметрическим методом. Взвешивание электродов и подложек проводили на весах ALC-210d4 Acculab. Структуру и состав электродов и покрытий определяли методом ЭДС с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на установке S-3400 Hitachi с приставкой Noran 7 Thermo. Распределение элементов с глубиной слоев было получено с помощью оптического эмиссионного спектрометра тлеющего разряда (ОЭСТР) GD Profiler-2 производства компании HORIBA Jobin Yvon (Франция) в режиме послойного элементного анализа материала. Шероховатость поверхности электроискровых покрытий оценивалась на оптическом профилометре «WYKO NT 110». Рентгенодифракционный анализ (РДА) был выполнен с использованием рентгеновского дифрактометра AXS D8 ADVANCE (Bruker, Германия) с использованием Cu-Kα излучения. Трибологические испытания по определению коэффициента трения проводили на трибометре фирмы «CSM Instruments» по схеме «шарик-диск» (шарик – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, диск – образец с покрытием) при нагрузке 5 Н.

## Экспериментальная установка ЭИЛ

### Параметры ЭИЛ:

- прямая и обратная полярность
- сила тока 120 А
- напряжение 20 В
- длительность импульса 20 мкс
- частота 640 Гц
- коэффициент заполнения 1.3 %

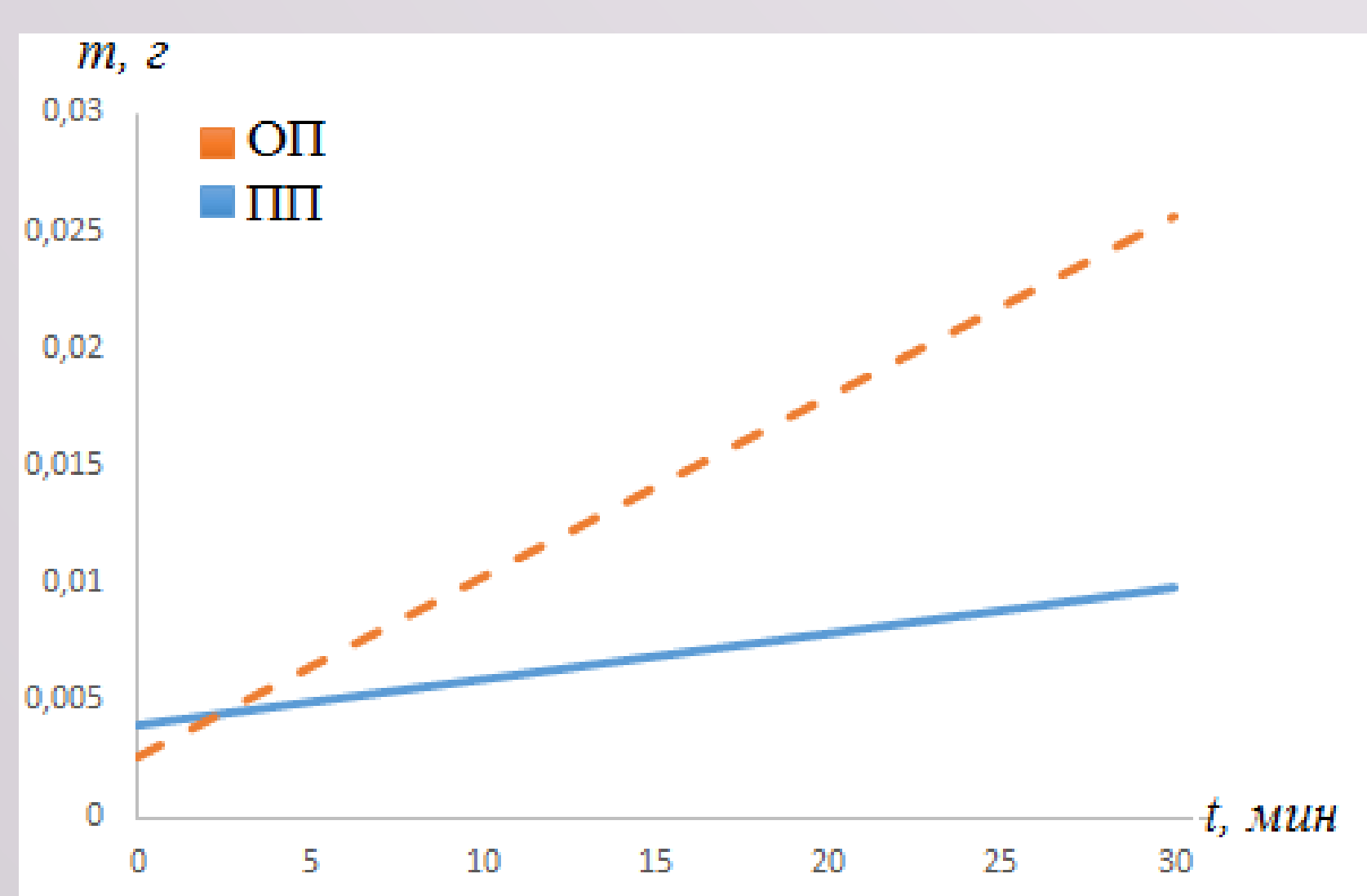


## Состав электрода и покрытий

Электроды	Состав, % ат.			
	Ti	C	Ni	Cr
TiC-Ni-Cr	45,7	48,8	4,1	1,4

Покрытие	Состав покрытия, % ат.				
	C	Ti	Ni	Cr	Fe
Прямая полярность					
TiC-Ni-Cr	37,9	25,8	2,8	5,5	27,9
Обратная полярность					
TiC-Ni-Cr	39,7	30,3	2,1	3,7	24,1

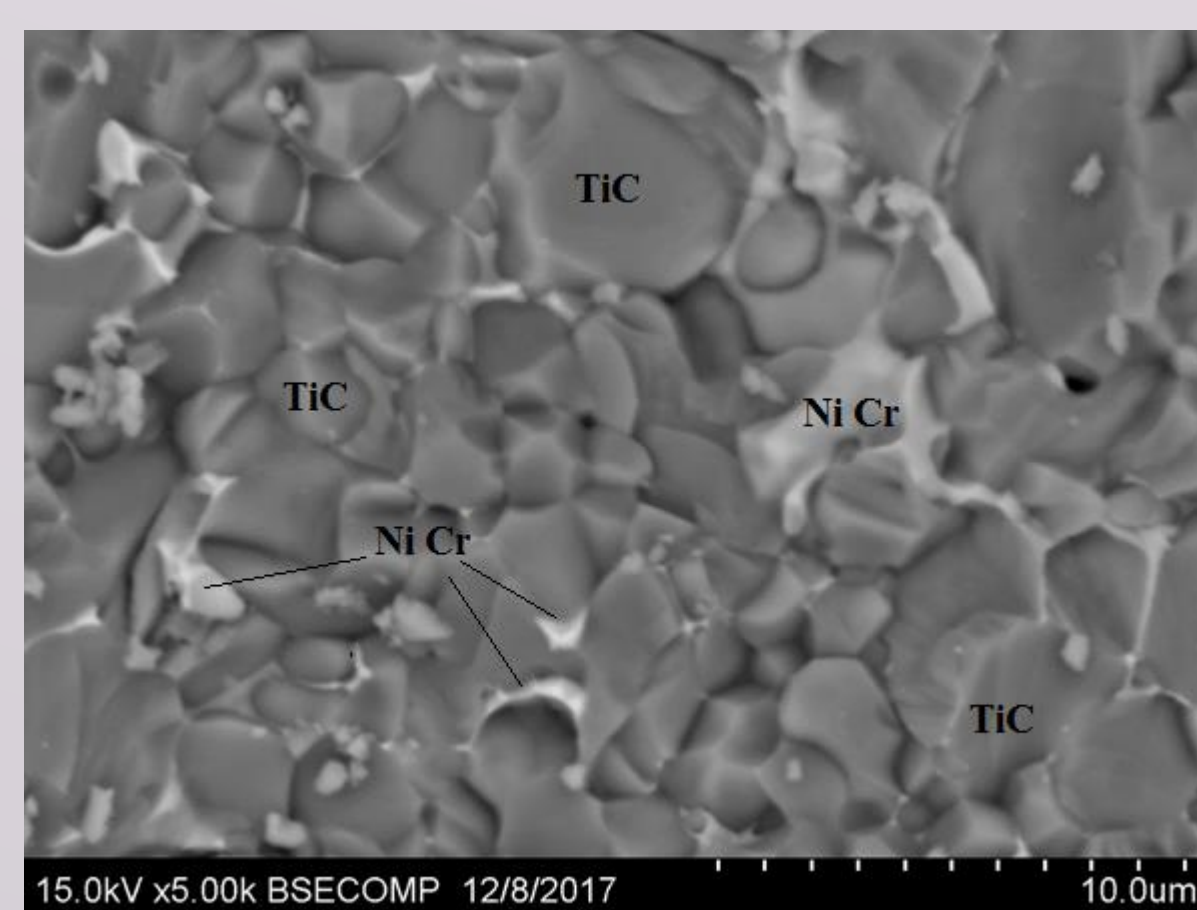
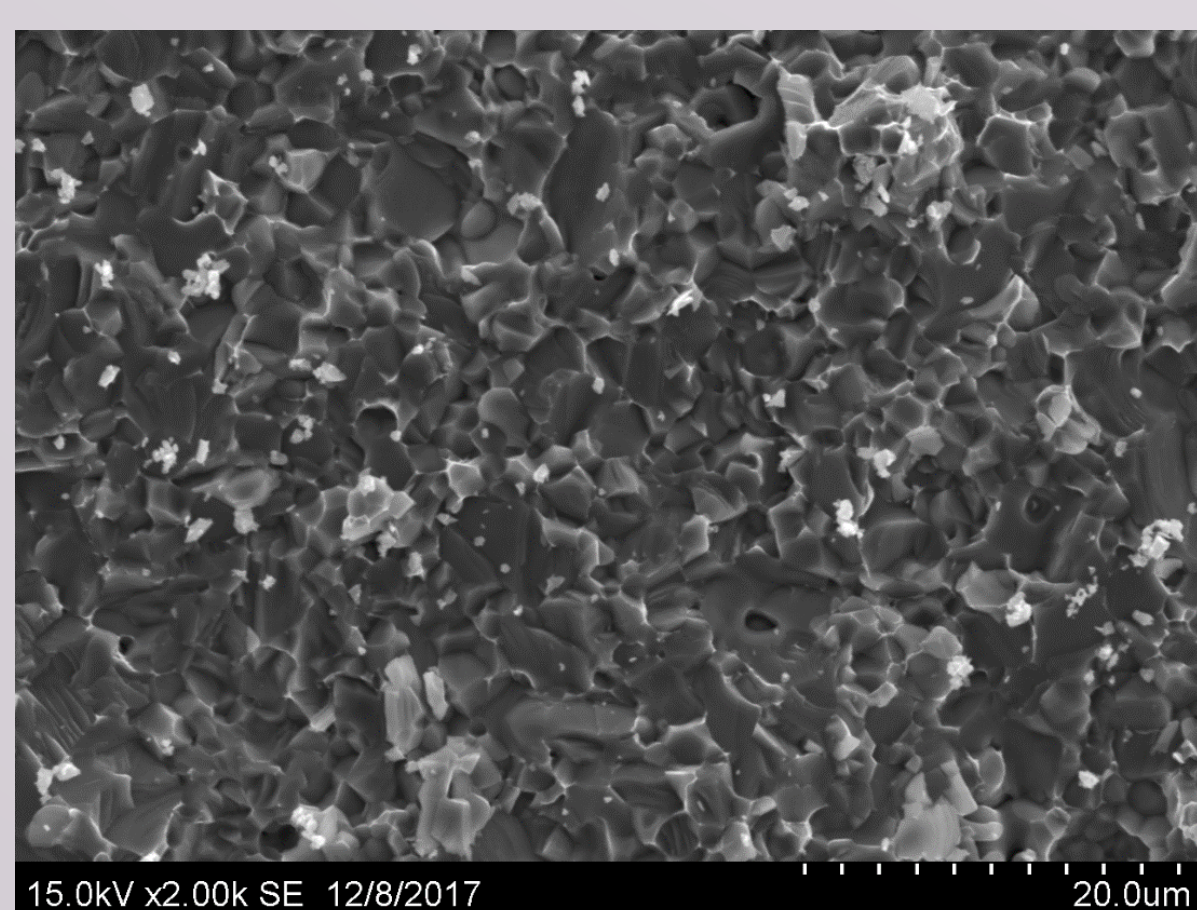
## Кинетика массопереноса



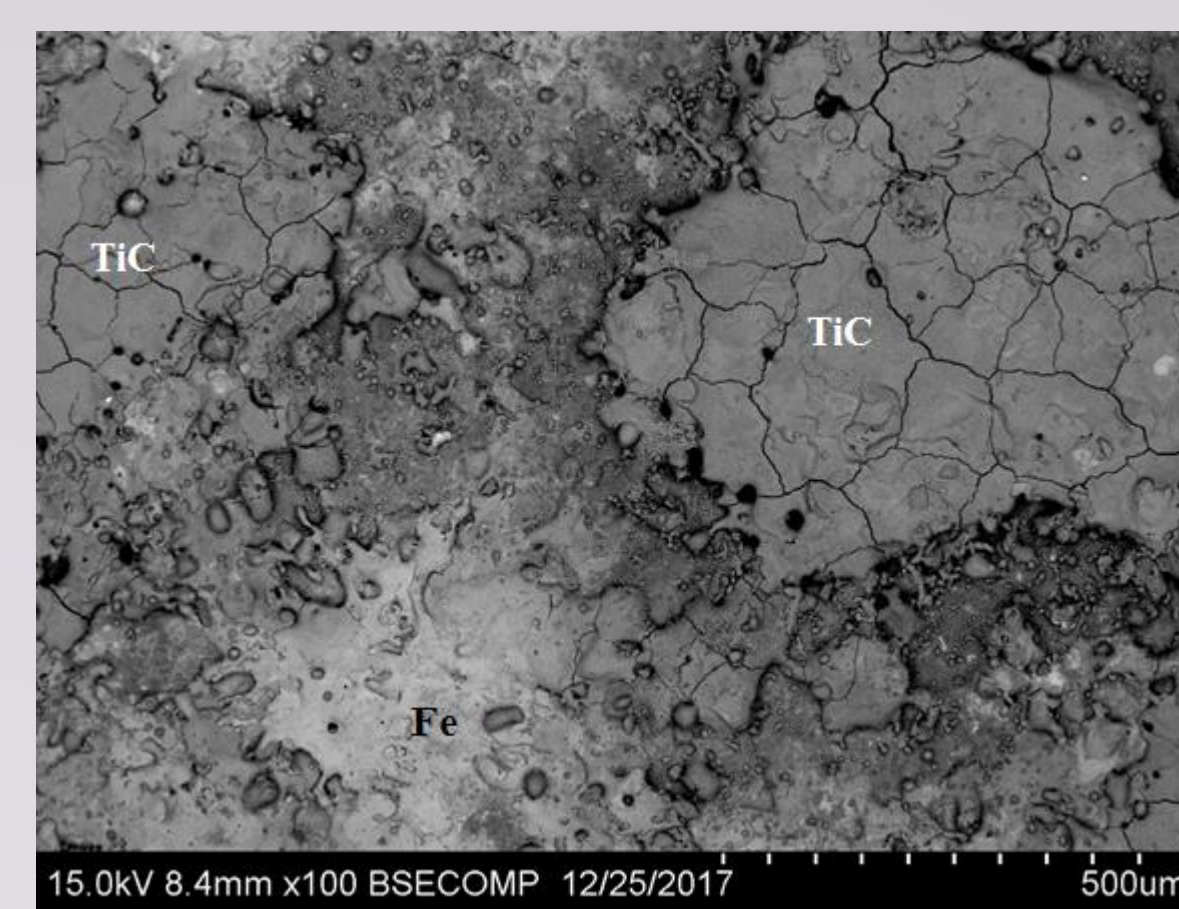
Удельный привес катода Δk

ОП		ПП	
Подложка	Электрод	Подложка	Электрод
Средний привес покрытия и средняя эрозия электрода, мг			
15,5	-21,2	7,5	-23,3
Суммарный привес покрытия и средняя эрозия электрода, мг			
24,4	-33,6	9,5	-39,3
Скорость роста покрытия и скорость эрозии электрода, мг/мин			
0,2	-1,3	0,8	-1,1

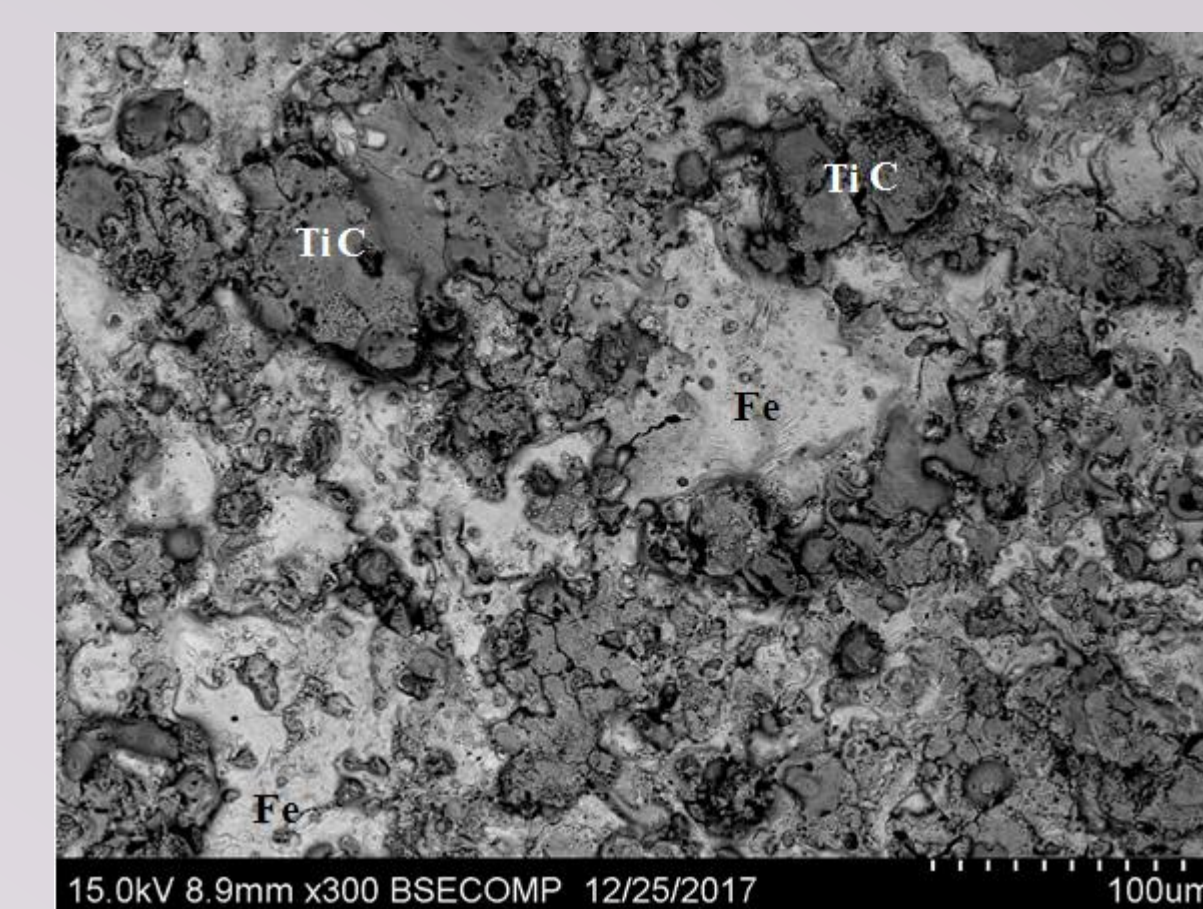
## Структура электрода и покрытий TiCNiCr



Данные СЭМ для электрода TiCNiCr



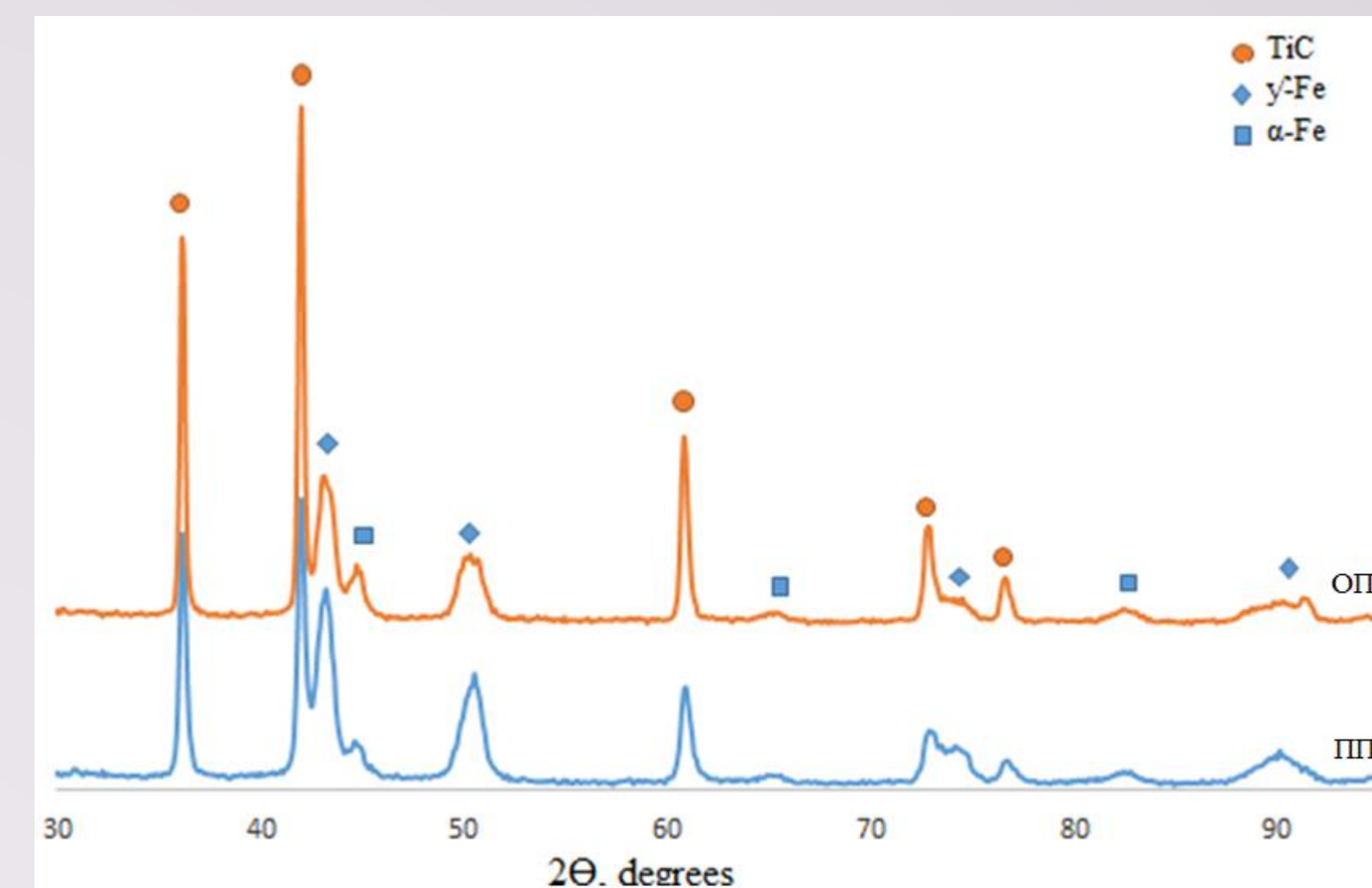
а)



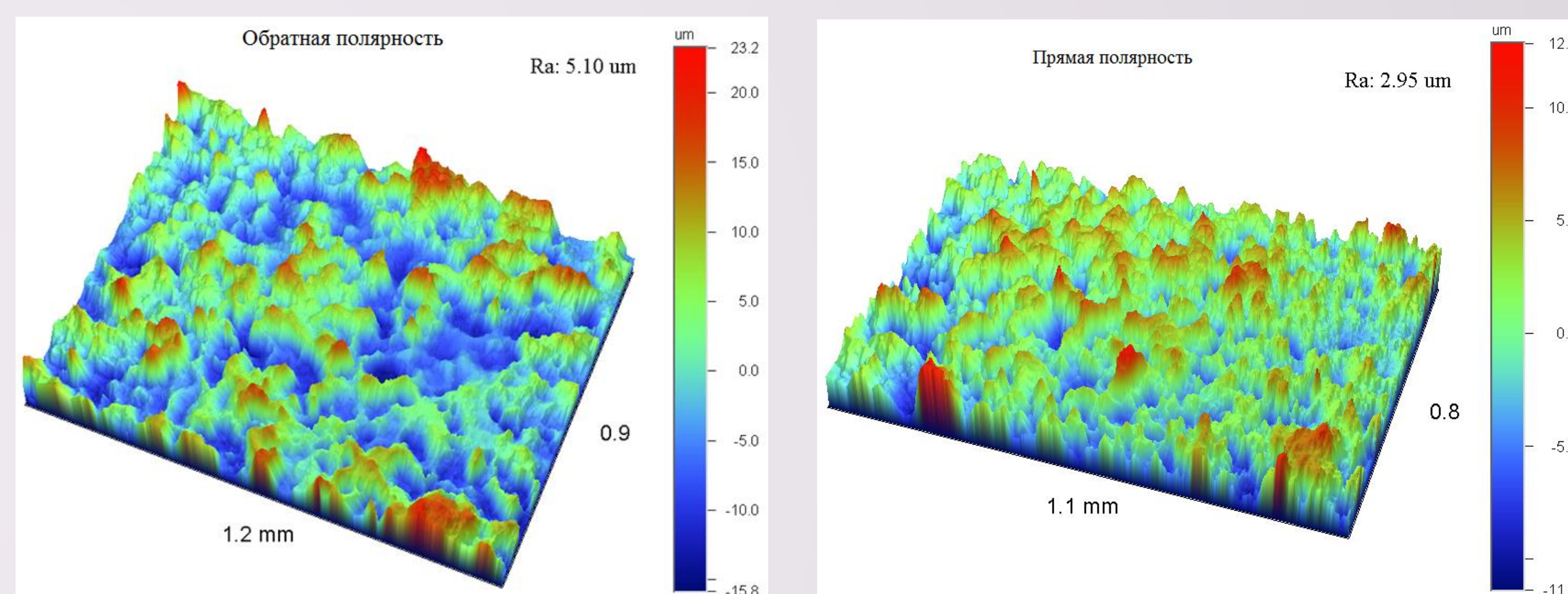
б)

Данные СЭМ для покрытий TiCNiCr, нанесённых при  
а) обратной полярности; б) прямой полярности

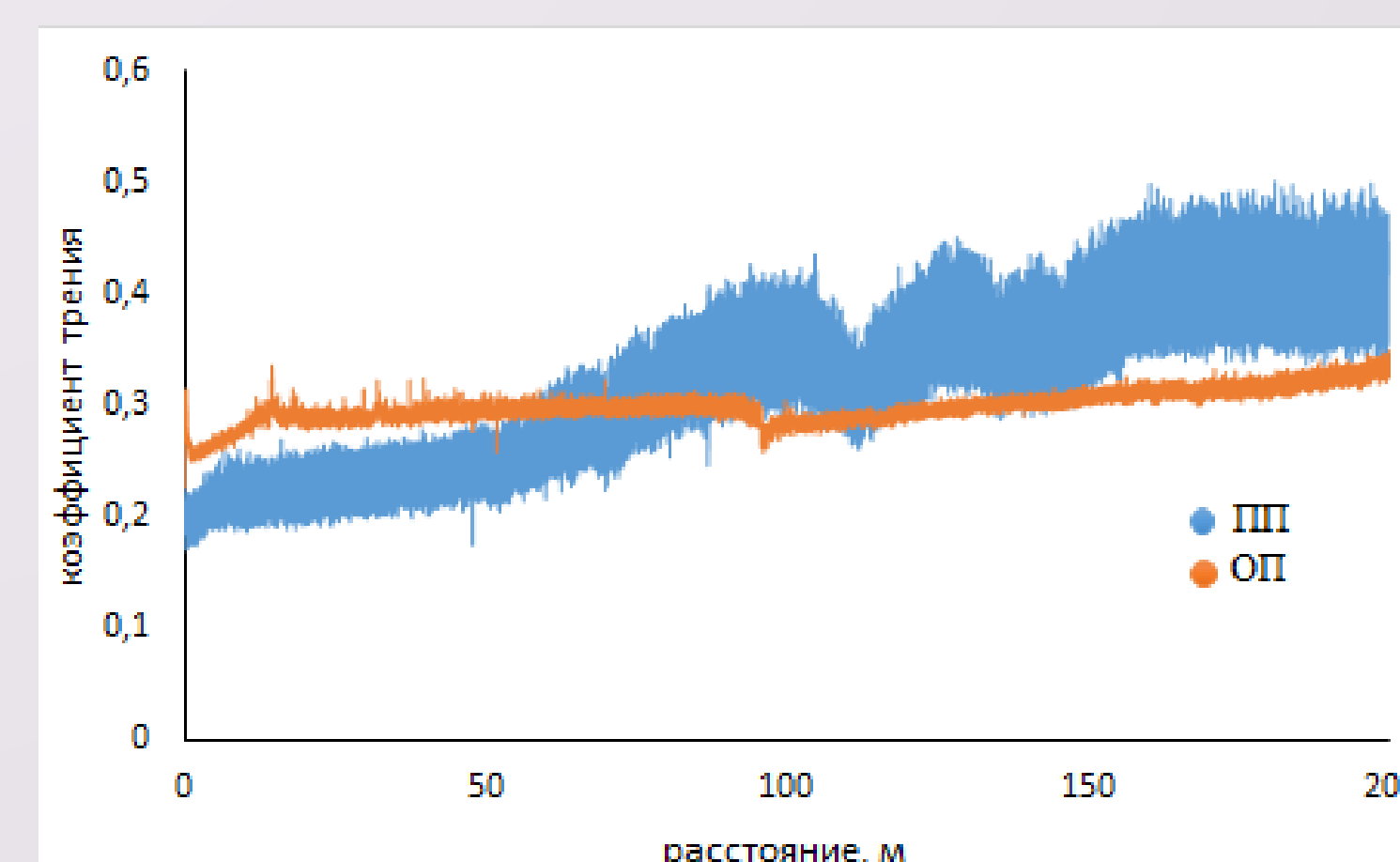
## Фазовый состав покрытий



## Шероховатость покрытий



## Трибологические свойства покрытий



Коэффициент трения	
Прямая полярность	Обратная полярность
Средний μ	
0,33	0,30
Максимальный μ	
0,50	0,35



Износ поверхности

В результате покрытия имеют идентичную равномерную структуру поверхности, типичную для электроискровых покрытий. В результате исследования кинетики массопереноса можно отметить, что при переключении полярности с ПП на ОП концентрации Ti и C повышаются на 14 и 4 %, тогда как концентрация Fe, являющегося компонентом подложки, снижается на 16 %. Полученные различия могут косвенно свидетельствовать о влиянии режимов установки ЭИЛ на толщину электроискровых покрытий. Шероховатость полученных образцов значительно отличается: для покрытия, нанесенного в режиме ПП Ra=2,95 мкм, для ОП Ra=5,10 мкм. Методом РДА установлено, что фазовые составы на всех режимах обработки в исследуемых образцах близки, основным элементом покрытия является карбид титана TiC, также присутствуют фазы подложки γ-Fe и α-Fe. Коэффициенты трения для покрытий TiCNiCr при различных режимах легирования практически не отличаются и составляют для ПП 0,32, для ОП 0,30. Для данного ряда образцов дорожки не выявлены или выявлены слабо и износа поверхности не наблюдается. Максимальный износ поверхности составляет 6,7×10<sup>-8</sup> мм<sup>3</sup>/Н·м. Формирование слоя, содержащего Ni и Cr в стальной подложке, в процессе ЭИЛ позволяет повысить коррозионную стойкость подложки в 3 раза.