

Научная сессия Объединенного ученого совета  
по физическим наукам Сибирского отделения  
Российской академии наук

Институт физического материаловедения  
СО РАН



**Бороалитирование сталей  
электронно-лучевой наплавкой/легированием**

В рамках проекта № 0270-2021-0001

Разработка физических основ применения газоразрядной плазмы и пучков заряженных частиц в новых технологиях создания функциональных покрытий, плазмохимических и биомедицинских технологиях. Руководитель проекта – проф., д.т.н. Семенов А.П.

Мишигдоржийн Ундрах  
Лхагвасуренович  
зав. лабораторией физического  
материаловедения, к.т.н.

21.12.2022г.



# Содержание

---

1. Методы нанесения покрытий и слоев. Борирование: преимущества и недостатки.
2. Цель, методы поверхностной модификации и исследуемые материалы
3. Электронно-лучевая поверхностная модификация: легирование и комбинированная обработка
4. Оборудование и режимы электронно-лучевого легирования
5. Электронно-лучевое легирование стали Ст3
6. Электронно-лучевое легирование стали 3Х2В8Ф и 5ХНМ
7. Трибологические характеристики сталей после электронно-лучевого легирования
8. Выводы
9. Дальнейшие планы: комбинированная обработка

# 1. Методы нанесения покрытий и слоев



## Методы поверхностной инженерии

### Без диффузионные:

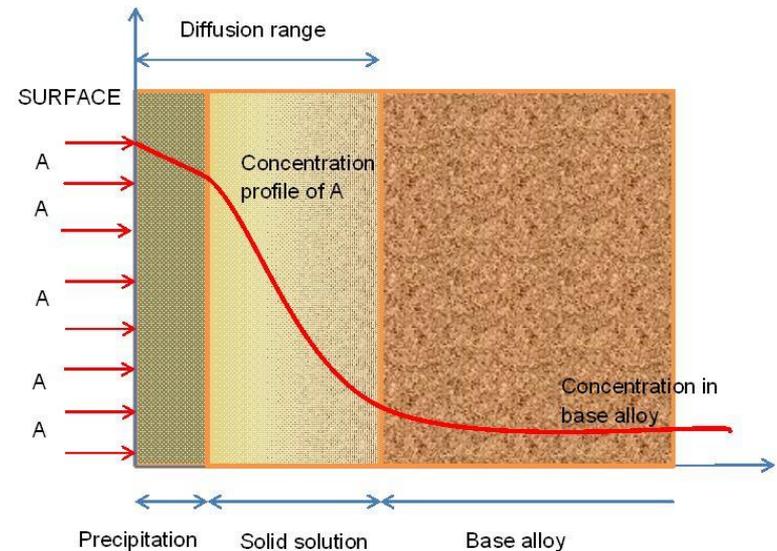
- CVD
- PVD
- Газотермическое напыление
- Наплавка
- Ионная имплантация

### Диффузионные:

- Борирование
- Азотирование
- Цементация
- Многокомпонентная химико-термическая обработка (ХТО)
- Поверхностное легирование

Нагрев: печной, ТВЧ, концентрированными потоками энергии (КПЭ)

Насыщающая среда: растворы солей, газы, порошки и пасты.



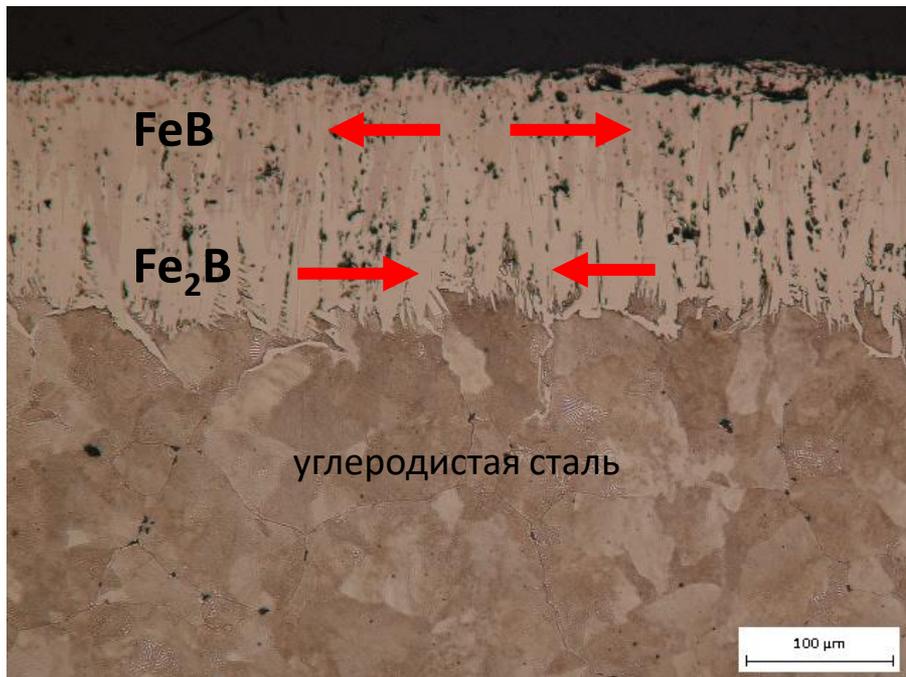
Строение диффузионного слоя [1]

# 1. Борирование: преимущества и недостатки



Преимущества:

- Высокая твердость (до 2300 HV)
- Низкий коэффициент трения
- Высокая износо-, жаро- и коррозионная стойкость



Коэффициент теплового расширения:

$$\text{FeB} - 23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\text{Fe}_2\text{B} - 7.65 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Недостатки:

- Хрупкость фазы FeB
- Склонность к образованию трещин





## 2. Цель и исследуемый материал

### Цель работы:

1. Получение на поверхности сталей борсодержащих слоев и покрытий с высокими механическими и теплофизическими свойствами;
2. Снижение хрупкости боридных слоев и снижение шероховатости сталей после различных видов поверхностной модификации.

### Виды поверхностной модификации:

Электронно-лучевое легирование (ЭЛЛ) одним карбидом бора и в сочетании с алюминием.

### Исследуемый материал:

1. Углеродистая сталь Ст3;
2. Легированная сталь 3X2B8Ф - аналог стали AISI H21. Используется для изготовления тяжело нагруженного прессового инструмента.
3. Легированная сталь 5XНМ - аналог стали AISI L6. Используется для изготовления молотовых, прессовых штампов и штампов машинной скоростной штамповки для горячего деформирования легких цветных сплавов.

Таблица 1. Химический состав стали 3X2B8Ф, вес. %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	W	V
0,3–0,4	0,15–0,4	0,15–0,4	до 0,03	до 0,03	2,2–2,7	до 0,35	до 0,03	8,5–10,0	0,3–0,6

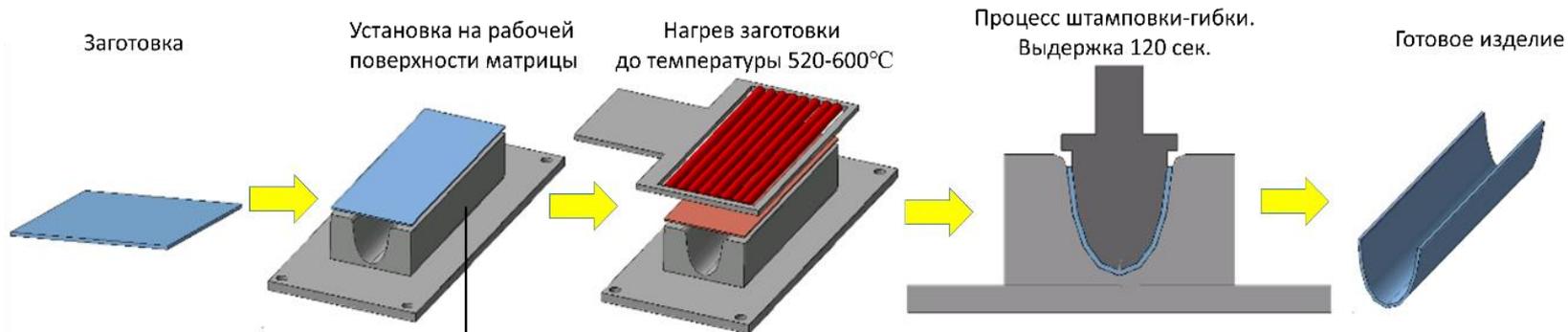
Таблица 2. Химический состав стали 5XНМ, вес. %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	Cu
0.5 - 0.6	0.1 - 0.4	0.5 - 0.8	1.4 - 1.8	до 0.03	до 0.03	0.5 - 0.8	0.15 - 0.3	до 0.3

# 2. Цель и исследуемый материал



Технология горячей гибки титановых оковок (в качестве инструмента используется матрица из стали 3Х2В8Ф)

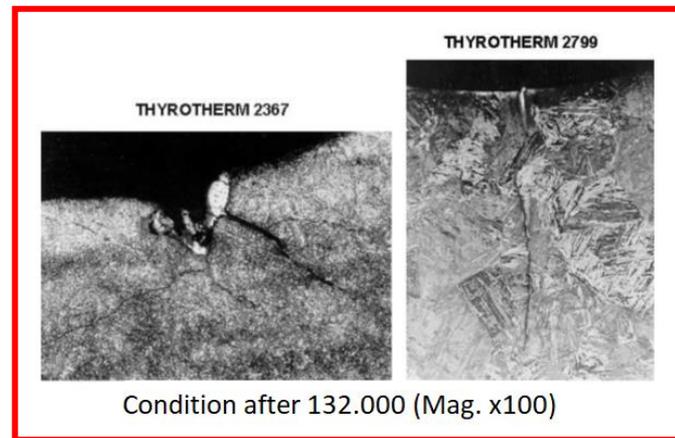


### Требования к рабочим поверхностям

- высокая износостойкость для сохранения формы и размеров поковки;
- повышенная жаростойкость для сопротивления образованию окалины, возникающей из-за высокого перепада температур;
- высокая разгаростойкость для предотвращения образования разгарных трещин, образующихся вследствие циклических нагревов и охлаждений штампа в процессе работы;
- минимальную схватываемость со штампуемым изделием;
- низкую шероховатость рабочих поверхностей ( $Ra \leq 0,8 \mu\text{м}$ ).



Матрица из штамповой стали



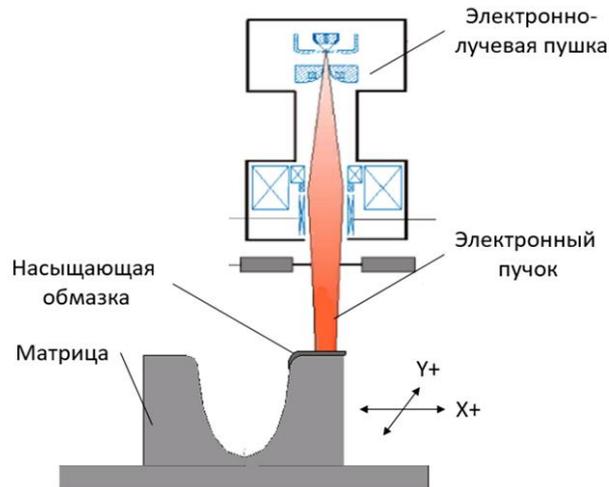
Поверхностные трещины

# 3. Электронно-лучевая поверхностная модификация



## ЭЛ поверхностная модификация

### ЭЛ легирование/ наплавка

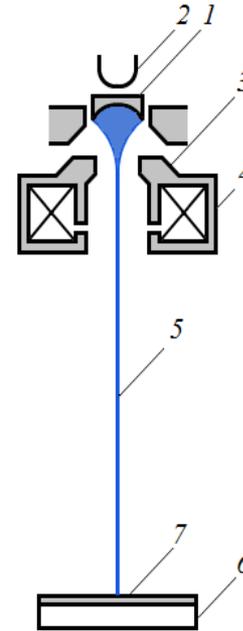


- Паста из карбида бора или в сочетании с алюминием в соотношении  $0,8 B_4C + 0,2 Al$
- Нагрев осуществляли в течение 55 сек при удельной мощности  $W = 6,1 \cdot 10^2 \text{ Вт/мм}^2$
- Диаметр сканирующего электронного луча  $d = 1 \text{ мм}$ , частота  $f = 50 \text{ Гц}$
- Остаточное давление в вакуумной камере не превышало  $2 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$
- Ускоряющее напряжение 24 кВ и ток электронного пучка 20 мА

# 4. Оборудование и режимы ЭЛЛ



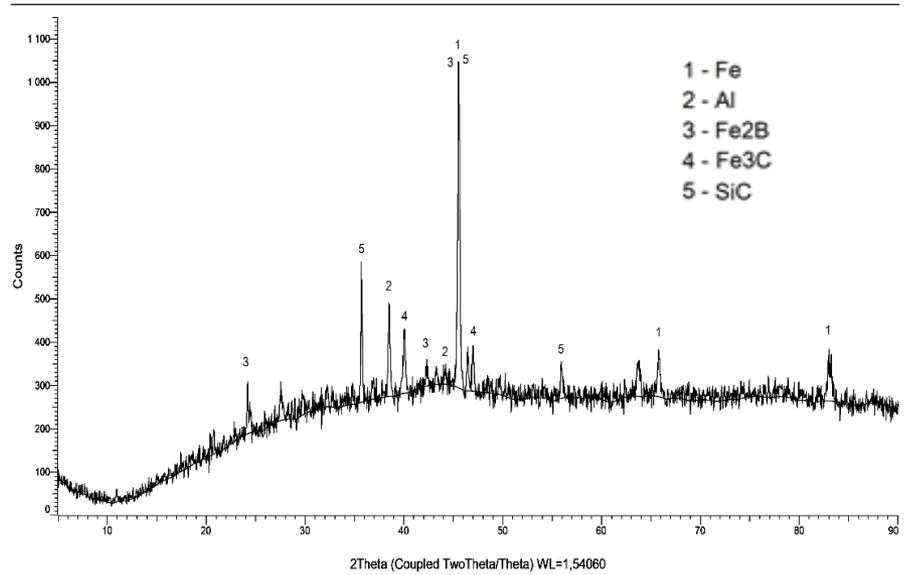
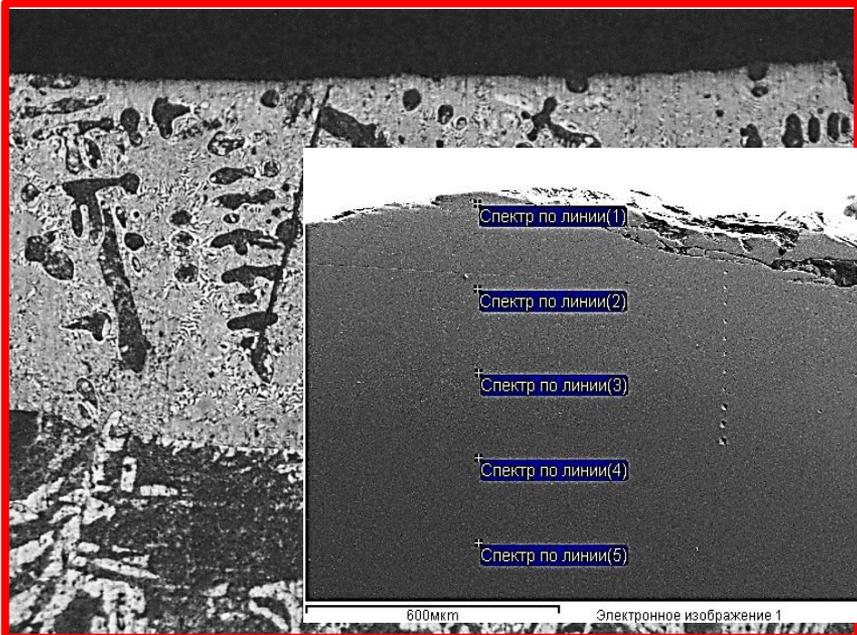
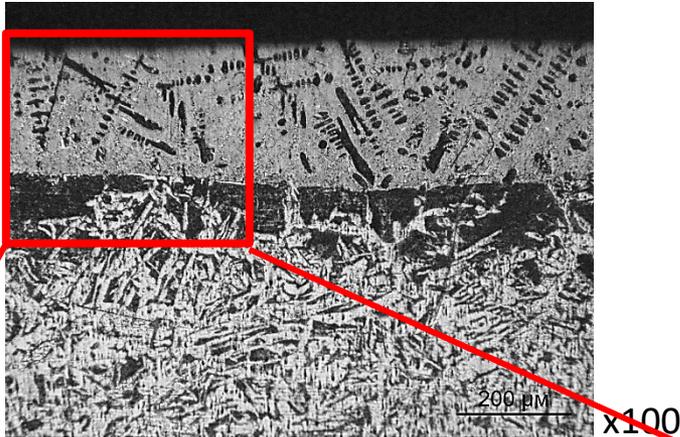
Электронно-лучевая установка с аксиальной электронной пушкой ЭПА-60-04.2 с блоком управления БУЭЛ, высоковольтным выпрямителем и системой вакуумного обеспечения



1, 2 – катоды,  
3 – ускоряющий электрод,  
4 – электромагнитная фокусирующая и отклоняющая система,  
5 – пучок электронов,  
6 – образец,  
7 – насыщающая смесь

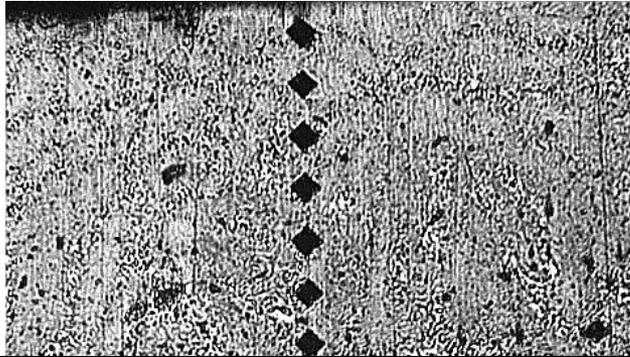
Марка стали	Масса образца, т (г.)	Масса до обработки с нанесенной обмазкой, т (г.)	Масса после обработки, т (г.)	Время обработки, t (с.)	Ток накала, мА ( $I_n$ )	Ускоряющее напряжение, $U_y$ (кВ)	Ток электронного пучка $I_n$ (мА)
Ст3	14,4831	14,6111 (+0.128)	14,506 (+0.0229)	55	32	24	20
3Х2В8Ф + В <sub>4</sub> С	8.9615	8.9993 (+0.0378)	8.9804 (+0.0189)	115			
3Х2В8Ф + В <sub>4</sub> С+Al	8.3262	8.3743 (+0.0481)	8.3295 (+0.0033)	36			
5ХНМ + В <sub>4</sub> С	9.3693	9.4062 (+0.0369)	9.3933 (+0.024)	115			
5ХНМ + В <sub>4</sub> С+Al	9.0249	9.0761 (+0.0512)	9.0443 (+0.0194)	57			

# 5. ЭЛ легирование стали Ст3



Спектр по линии	B	C	Al	Si	Fe	Итог
1	12,23	17,18	0,19	0,15	70,26	100
2	-	17,93	1,00	0,58	80,49	100
3	-	22,03	0,63	0,47	76,88	100
4	-	23,38	0,03	0,43	76,16	100
5	-	24,46	0,01	0,41	75,12	100
Макс.	12,23	24,46	1,00	0,58	80,49	
Мин.	12,23	17,18	0,01	0,15	70,26	

# 5. ЭЛ легирование стали Ст3: микротвердость и балл хрупкости



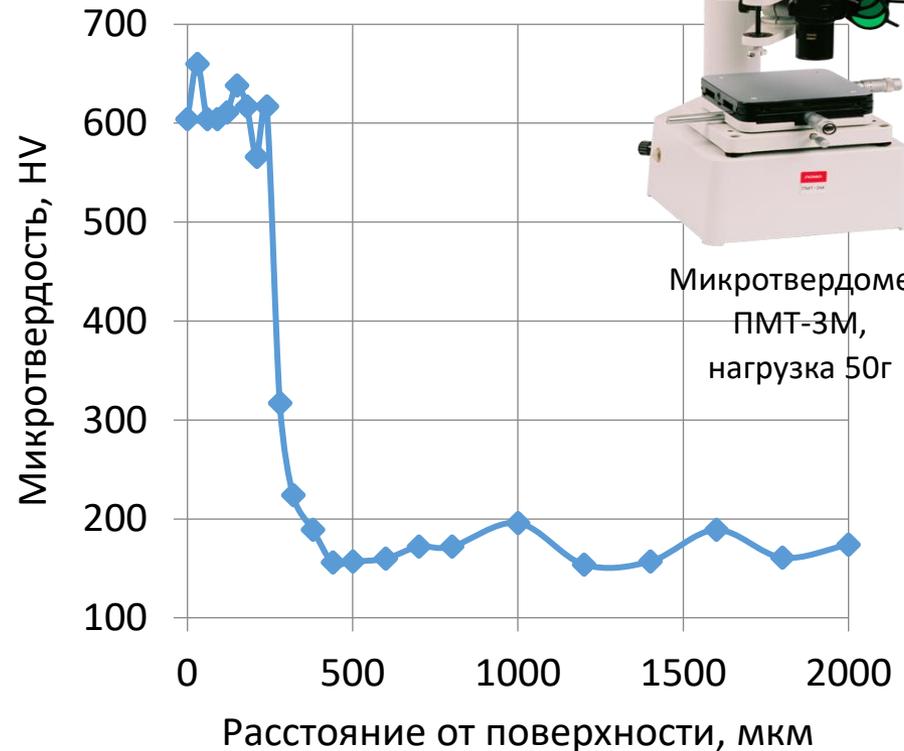
Помимо микротвердости определяли величину предельной пластичности слоя ( $\epsilon_{\text{пред}}$ ) по формуле Скуднова В.А.[1]:

$$\epsilon_{\text{пред}} = D_{\text{отп}} / L_{\text{тр}}$$

где,  $D_{\text{отп}}$  - диагональ отпечатка;  $L_{\text{тр}}$  - длина трещины между отпечатками.

$\epsilon_{\text{пред}} = 8$  единиц после ЭЛЛ

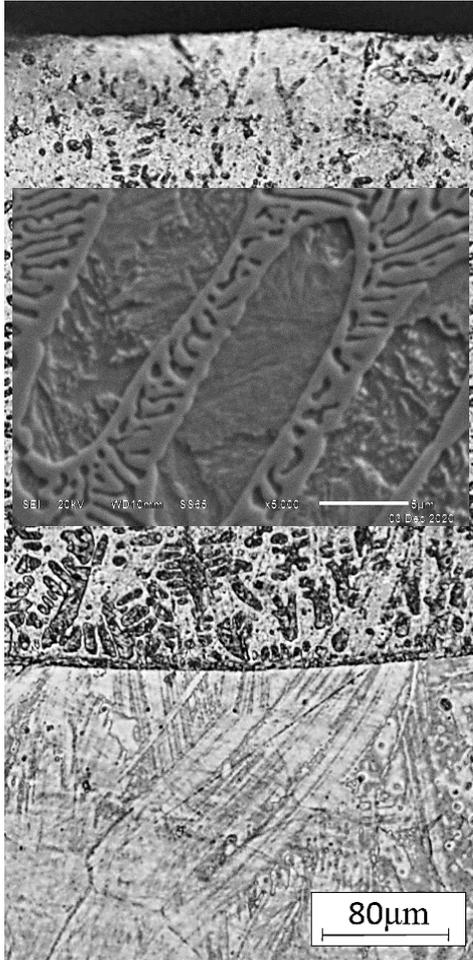
$\epsilon_{\text{пред}} = 1.13$  единиц после твердофазного борирования



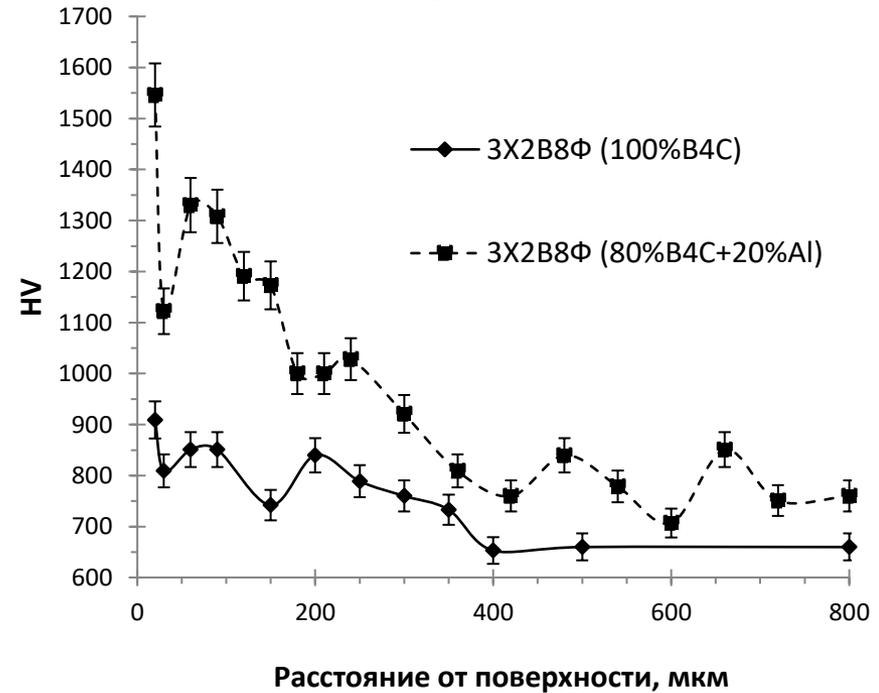
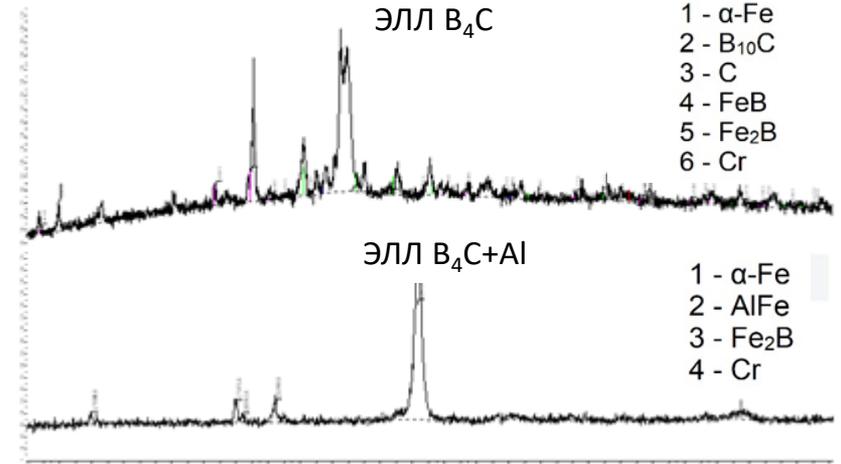
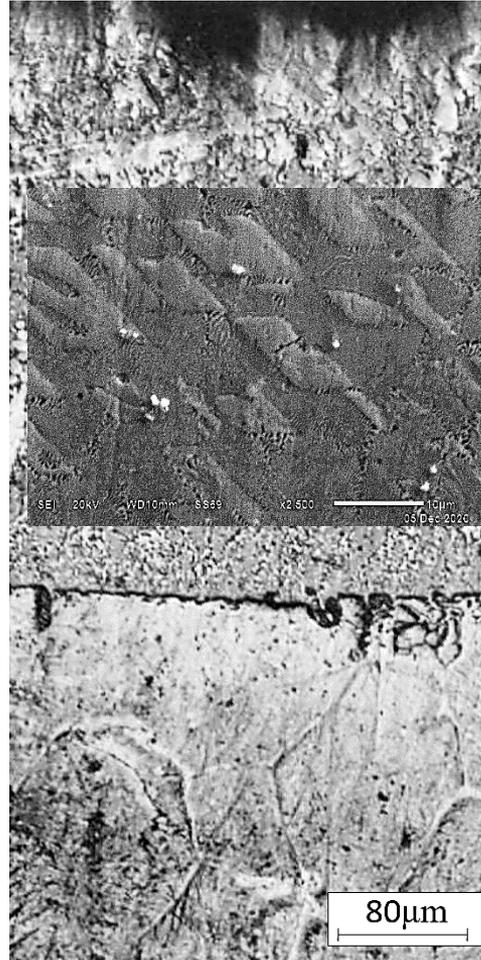
Микротвердомер  
ПМТ-3М,  
нагрузка 50г

# 6. ЭЛ легирование стали 3Х2В8Ф

ЭЛ В<sub>4</sub>С



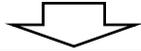
ЭЛ В<sub>4</sub>С+Al



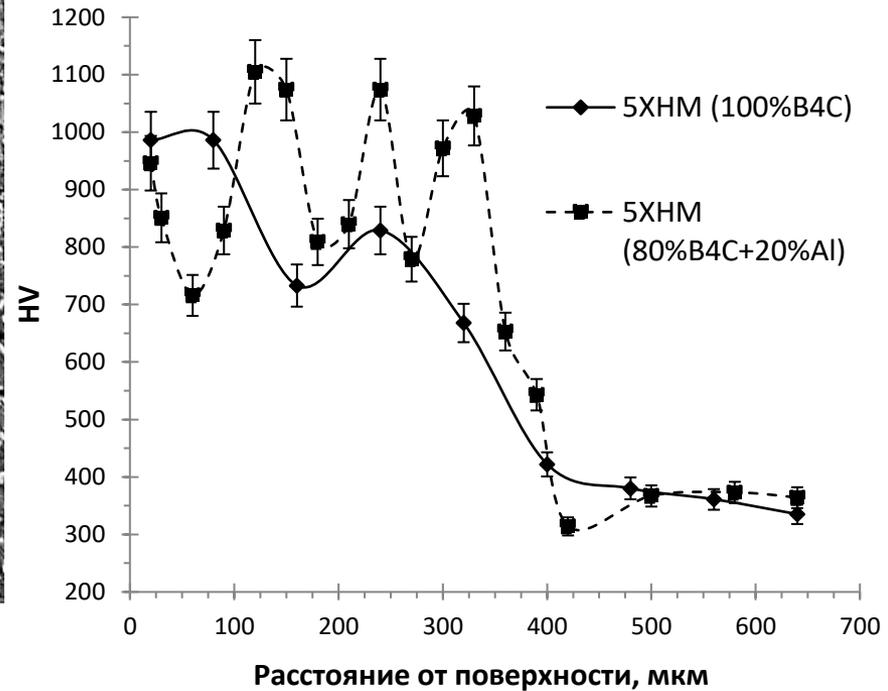
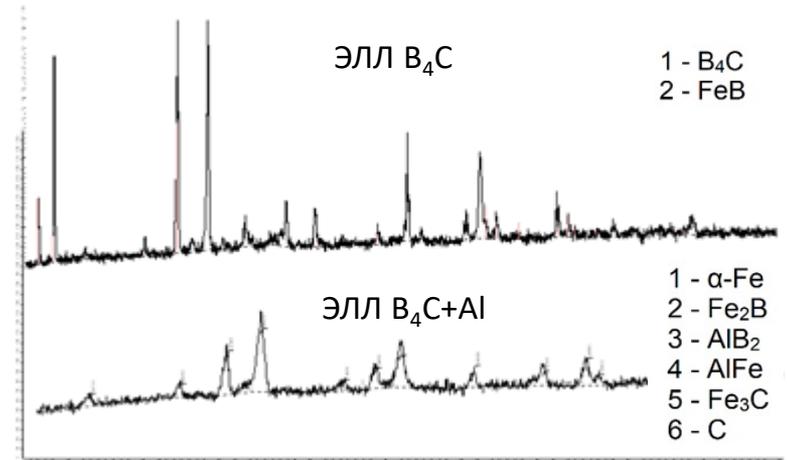
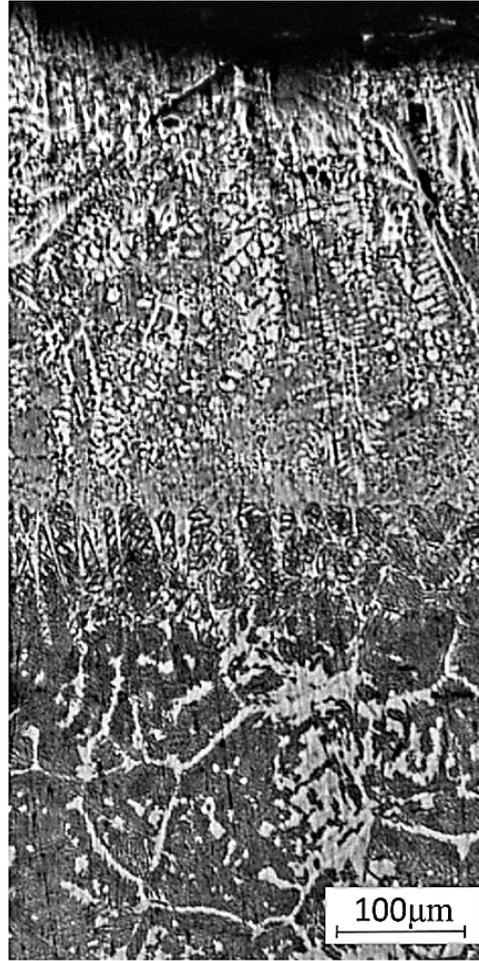
# 6. ЭЛ легирование стали 5ХНМ



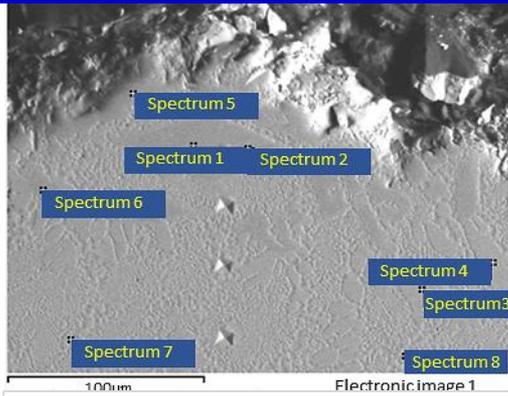
ЭЛ  $B_4C$



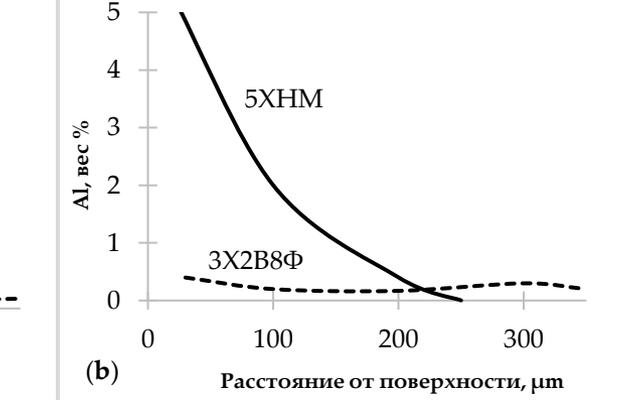
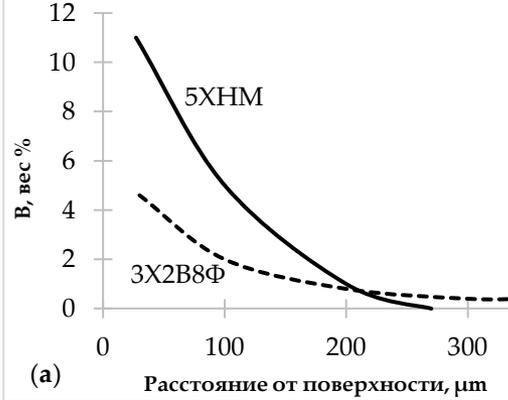
ЭЛ  $B_4C+Al$



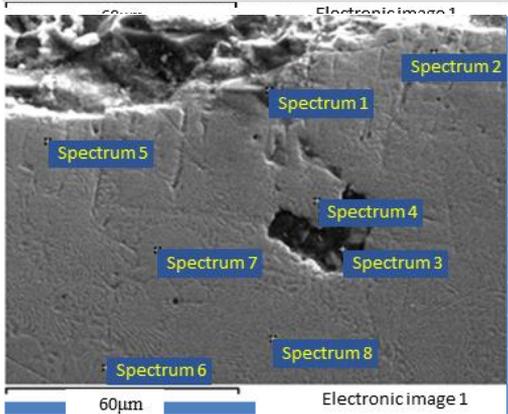
# 6. Изменение элементного состава по глубине упрочненного слоя



No спектра	Элементы в весовых %							Итого
	B	C	Al	V	Cr	Fe	W	
1	3.88	1.09	0.11	0.67	4.19	83.15	6.91	100
2	5.65	1.91	0.09	0.60	3.73	83.44	4.58	100
3	5.28	1.55	0.07	0.62	3.66	83.57	5.26	100
4	1.75	1.38	0.03	0.61	4.23	86.53	5.47	100
5	-	2.78	0.10	0.66	3.60	83.93	8.94	100
6	-	4.81	0.09	0.67	3.16	82.40	8.87	100
7	-	4.98	0.02	0.86	2.90	79.32	11.92	100
8	-	6.01	0.26	0.46	2.63	81.49	9.16	100
Макс.	5.65	6.01	0.31	0.86	4.23	90.08	11.92	
Мин.	0.10	0.87	0.02	0.34	1.96	79.32	4.58	



	Fe	Ni	Итого
	2.65	0.78	100
	5.76	1.04	100
	9.88	1.02	100
	2.53	1.27	100
	5.76	1.27	
	9.88	0.78	



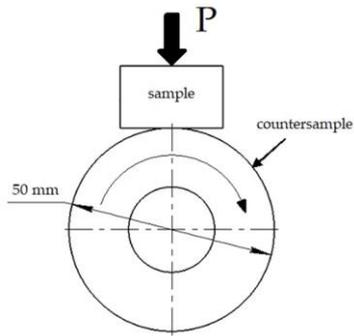
No спектра	Элементы в весовых %										Итого
	B	C	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni		
1	62.58	35.98	1.21					0.24		100	
2	11.14	9.07		5.13	0.94	0.50	0.54	70.65	2.01	100	
3		63.54	23.21	0.06	0.09	0.24		12.86		100	
4	3.59	8.30		0.71	0.29	0.65	0.54	84.60	1.32	100	
5	10.50	9.23		1.10	0.46	0.47	0.46	76.16	1.62	100	
6		7.16		0.43	0.04	0.73	0.54	90.14	0.94	100	
7		9.02		0.67	0.35	0.56	0.53	87.63	1.24	100	
8		10.05		1.01	0.32	0.55	0.54	86.10	1.42		
Макс.	62.58	63.10	23.21	5.13	0.94	0.73	0.54	90.14	2.01		
Мин.	62.58	7.16	1.21	0.06	0.04	0.24	0.46	0.24	0.94		

3X2B8Φ  
(B<sub>4</sub>C+Al)

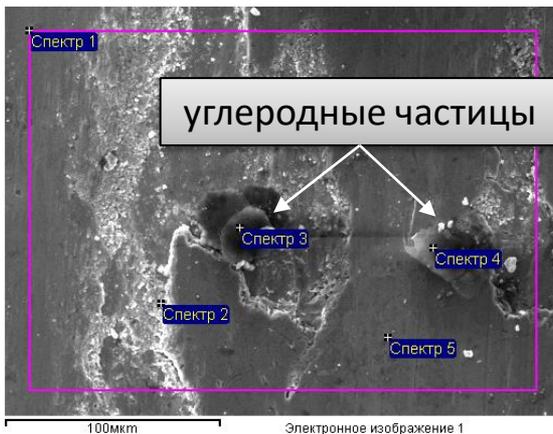
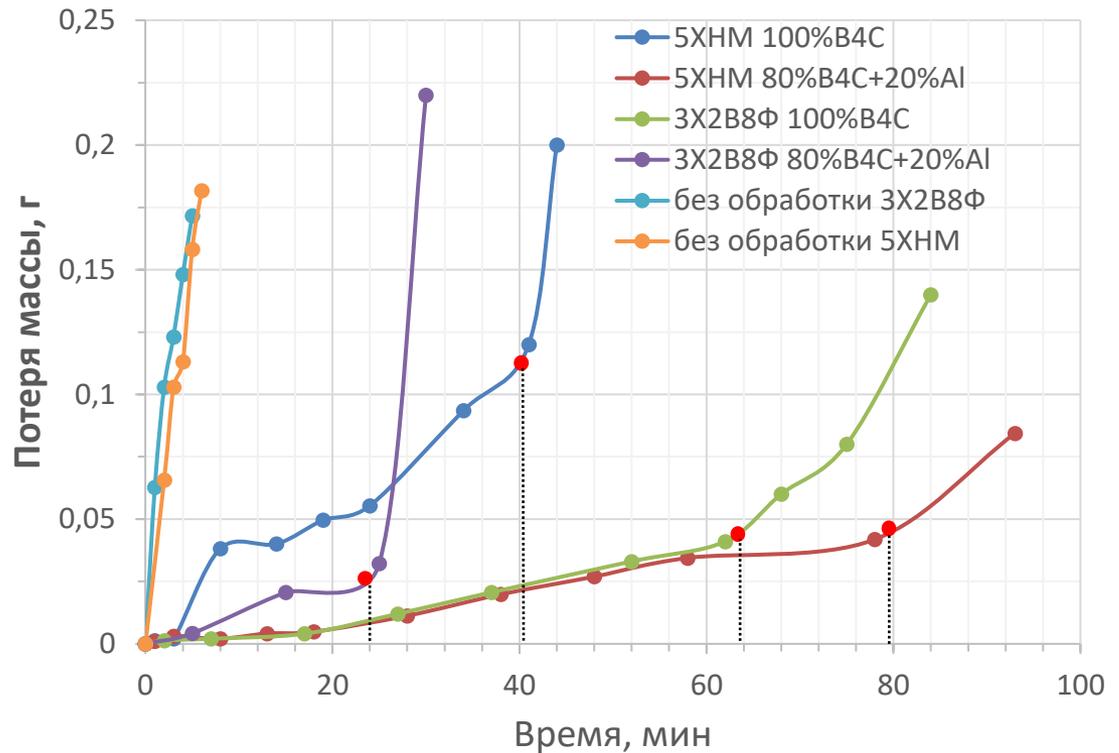
5XHM  
(B<sub>4</sub>C)

5XHM  
(B<sub>4</sub>C+Al)

# 7. Трибологические характеристики сталей после ЭЛЛ



Машина трения СМЦ-2  
 Схема вкладыш-кольцо  
 Скорость скольжения – 0,8 м/с  
 ( $n=300 \text{ мин}^{-1}$ )  
 Нагрузка ( $P$ ) – 6,86 Н/мм<sup>2</sup>  
 Контр тело из быстрорежущей  
 стали Р6М5 (аналог стали AISI M2)



No спектра	Элементы в весовых %													Итого
	C	N	O	Al	Si	S	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Ni		
1	8,15	-	26,99	0,54	0,25	-	-	-	0,37	0,51	62,18	1,01	100	
2	2,72	-	26,17	0,37	0,22	-	-	-	0,56	-	68,87	1,08	100	
3	51,81	10,35	15,02	0,18	0,16	0,45	-	-	-	-	22,03	-	100	
4	42,04	4,35	22,48	1,69	4,90	0,38	1,82	0,41	0,24	-	21,70	-	100	
5	7,33	-	8,84	-	0,27	-	-	-	0,56	-	80,92	2,07	100	
Макс.	51,81	10,35	26,99	1,69	4,90	0,45	1,82	0,41	0,56	0,51	80,92	2,07		
Мин.	2,72	4,35	8,84	0,18	0,16	0,38	1,82	0,41	0,24	0,51	21,70	1,01		

Поверхность стали 5XHM после  
 испытания на износостойкость



## 8. Выводы

---

1. Электронно-лучевое легирование приводит к образованию покрытий толщиной до 350 мкм с высокой твердостью и износостойкостью, значительно превышающей стойкость необработанных сталей.
2. Установлено, что микротвердость покрытий легированных В<sub>4</sub>С и Al выше, чем после легирования только В<sub>4</sub>С. Микротвердость слоев, полученных ЭЛЛ, ниже твердости диффузионных боридных слое в 1,5-2 раза, а пластичность выше в 7 раз.
3. Полученные данные позволяют рекомендовать поверхностную модификацию углеродистых и легированных сталей для нужд различных отраслей промышленности, где требуются сочетание высокой твердости и пластичности рабочих поверхностей деталей машин и инструментов.

Публикации по теме:

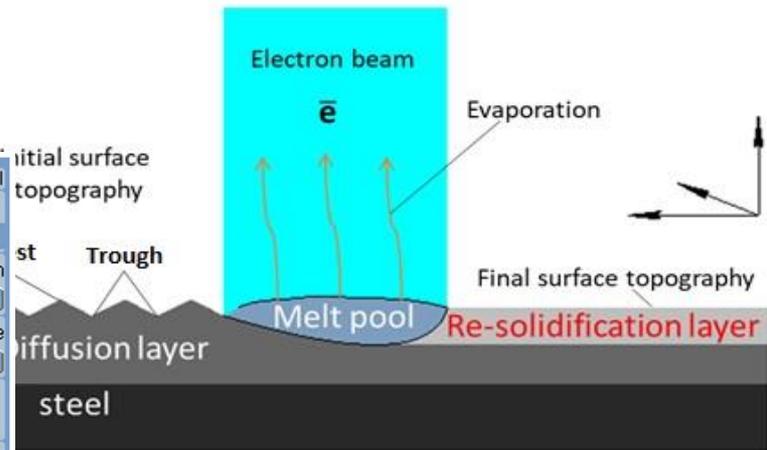
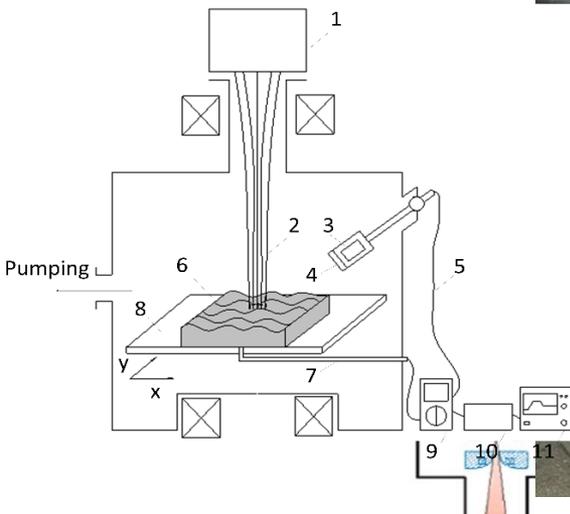
1. Пат. № 2778544 Российская Федерация, МПК С23С 12/02 Способ бороалитирования углеродистой стали / У.Л. Мишигдоржийн, А.П. Семенов, Н.С. Улаханов, А.С. Милонов, Д.Э. Дашеев, П.А. Гуляшинов; патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (RU) - № 2022103740; заявл. 15.02.2022; опубл. 22.08.2022, Бюл. № 24.  
<https://www.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/778/544/%D0%98%D0%97-02778544-00001/document.pdf>
2. Mishigdorzhijn U.L., Semenov A.P., Ulakhanov N.S., Milonov A.S., Dasheev D.E., Gulyashinov P.A. Microstructure and Wear Resistance of Hot-Work Tool Steels after Electron Beam Surface Alloying with В<sub>4</sub>С and Al // Lubricants. – 2022. - Vol. 10. - Issue 5, 90. <https://doi.org/10.3390/lubricants10050090>
3. Мишигдоржийн У.Л., Семенов А.П., Улаханов Н.С., Милонов А.С., Дашеев Д.Э. Наплавка на сталь 3Х2В8Ф и 5ХНМ пучком электронов в вакууме насыщающих смесей, содержащих В<sub>4</sub>С и Al // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2022, №6. С. 103-107  
<https://doi.org/10.31857/S1028096022030153>

# 9. Комбинированная обработка

ЭЛ поверхностная модификация

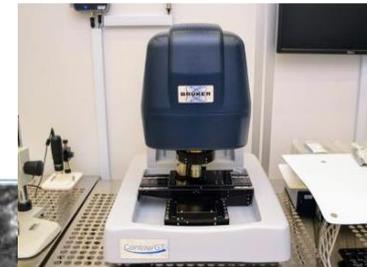
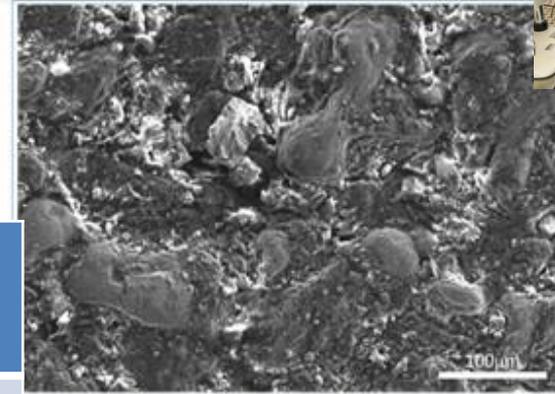
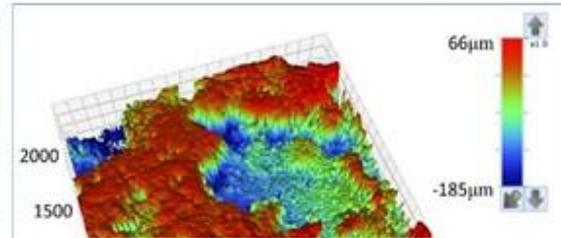
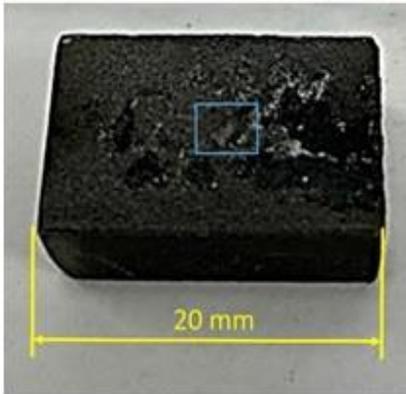


Комбинированная обработка  
(ХТО + ЭЛО)



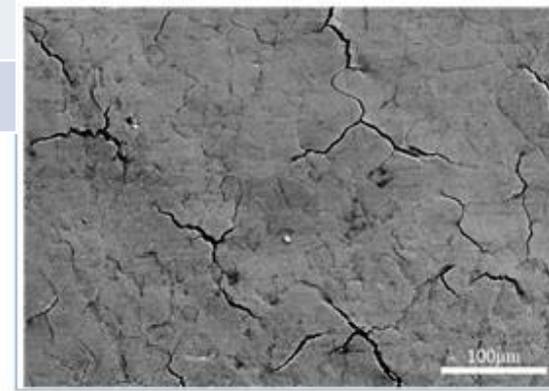
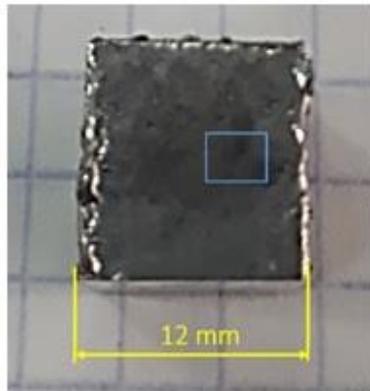
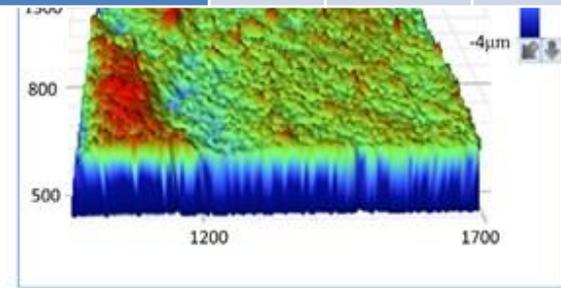
# 9. Комбинированная обработка

## Thermal-chemical Treatment



Оптический  
профилемер  
Bruker Contour  
GT-K1 (ИрНТУ)

Параметры шерохова- тости стали	Ra	Rz	Rmax
Исходное состояние	0,344	12,466	2,273
ХТО, 1050°C	4,376	243,308	54,692
ЭЛО	0,112	0,414	1,019





*Спасибо за внимание!*

Email: [undrakh@ipms.bscnet.ru](mailto:undrakh@ipms.bscnet.ru)

Тел.: (3012) 43-48-70