

Локальное плавление металла в оболочках в процессе взрывного нагружения

С.Г.Андреев, М.М.Бойко, Е.Ф.Грязнов, В.Ю.Клименко

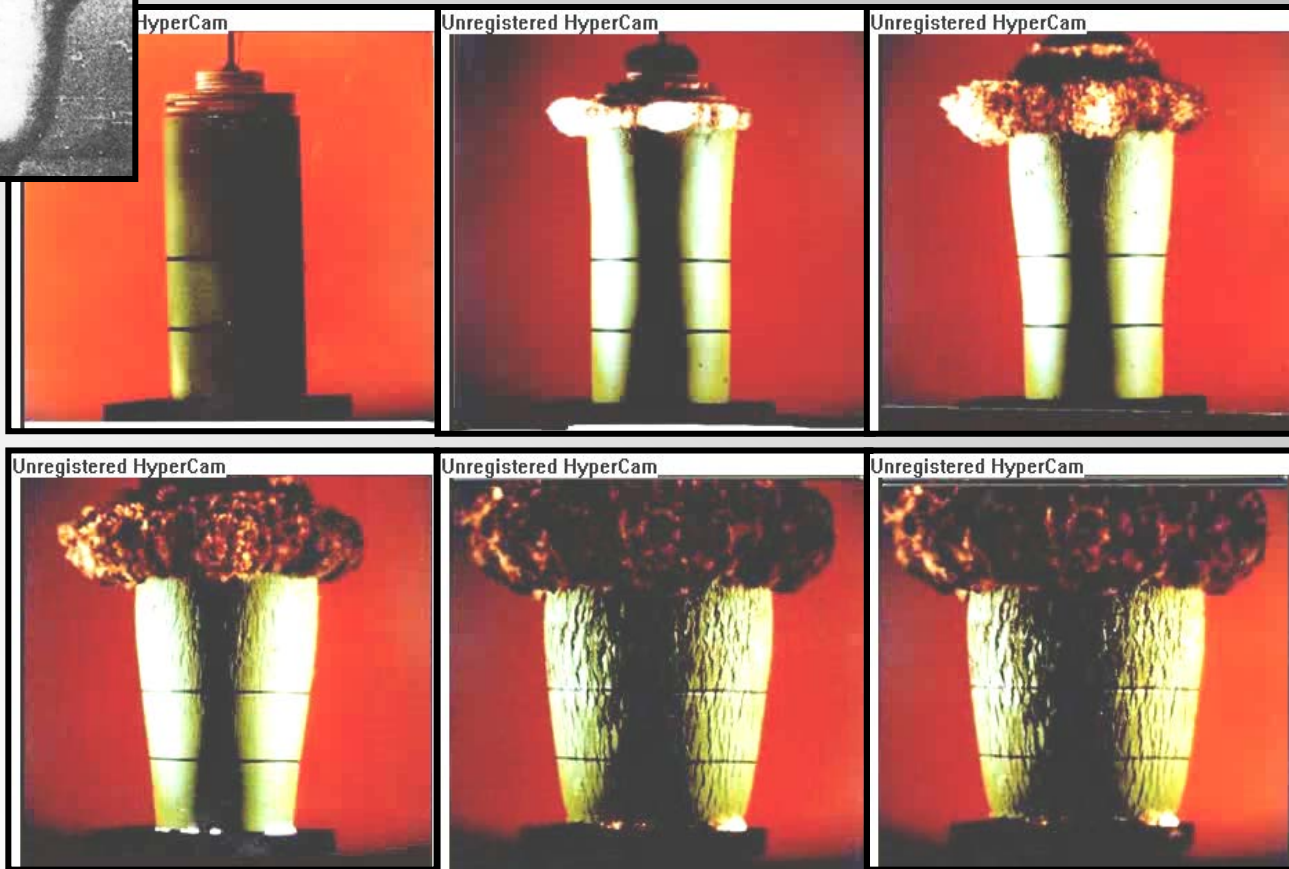
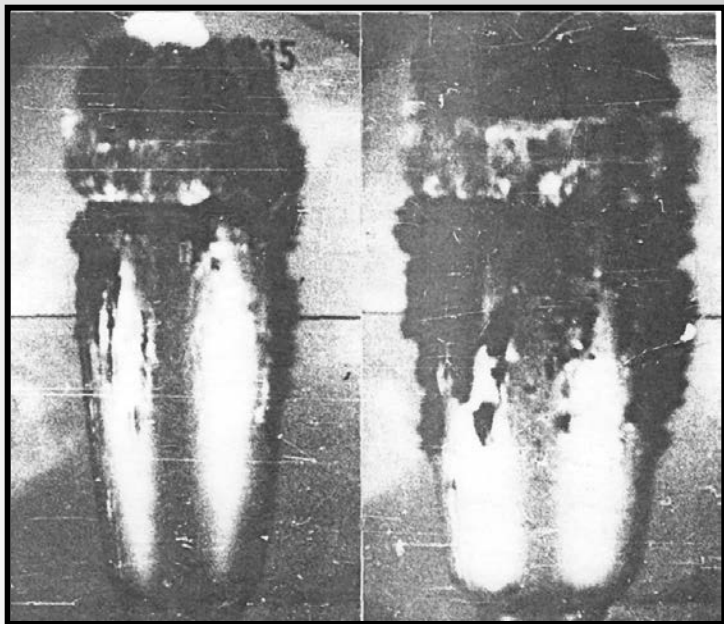
МГТУ им. Н.Э.Баумана

Москва

2019



Высокоскоростная оптическая регистрация процесса расширения стальных оболочек под действием продуктов детонации



Фрагменты стальной оболочки

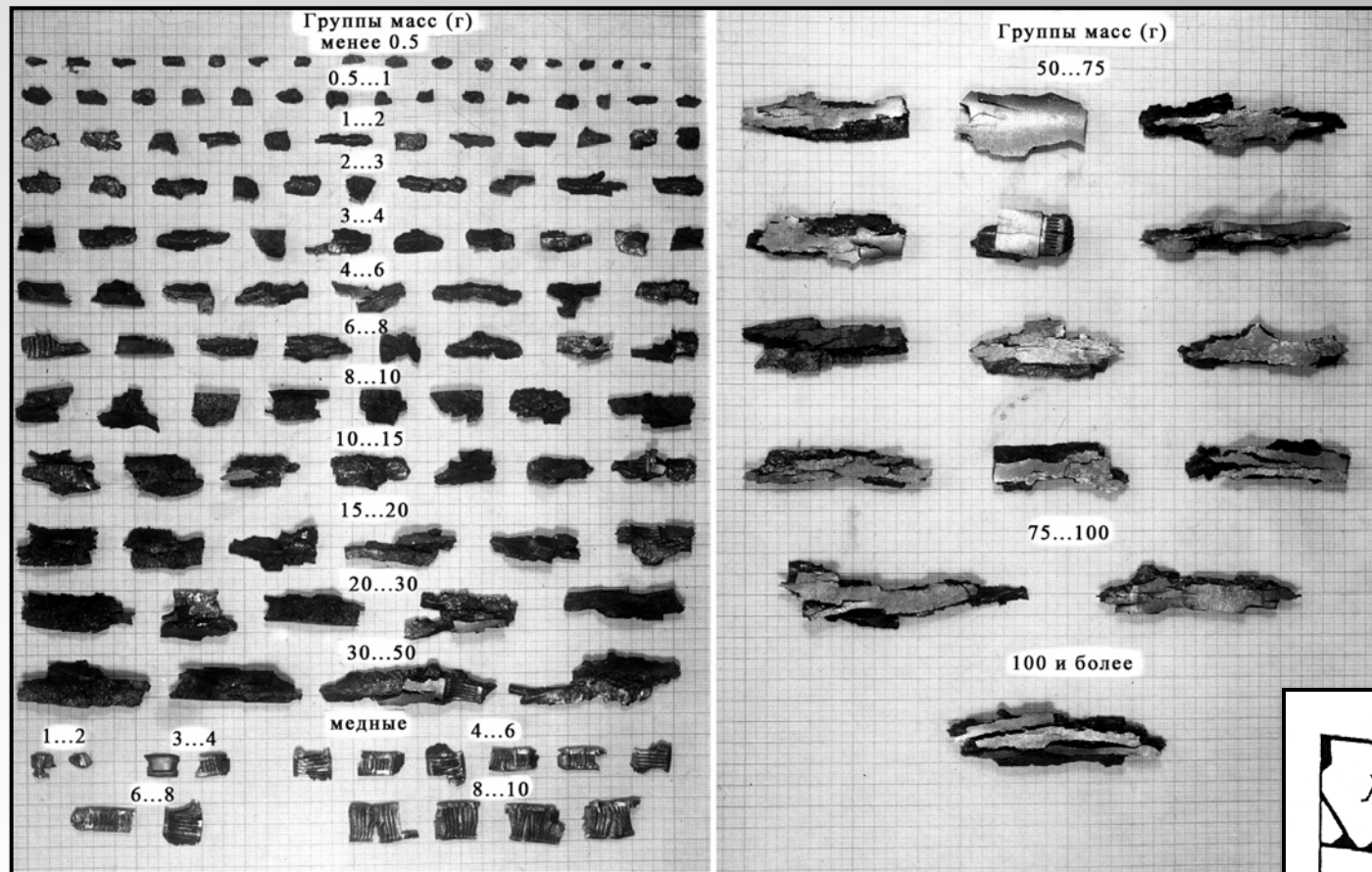
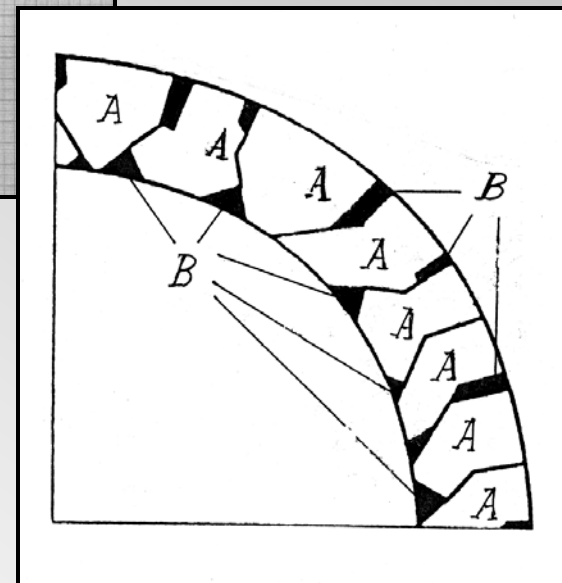
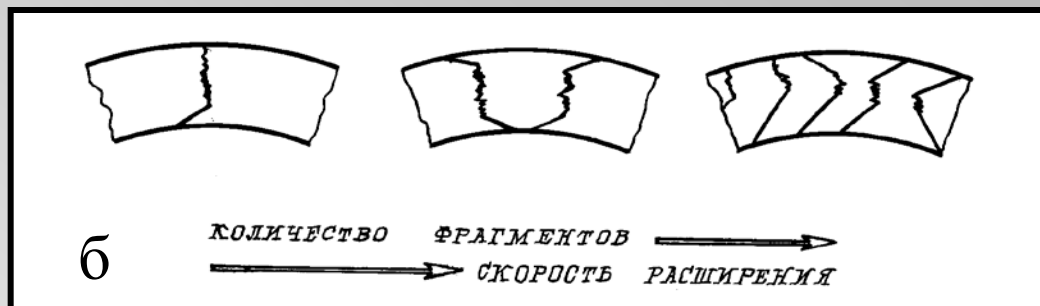
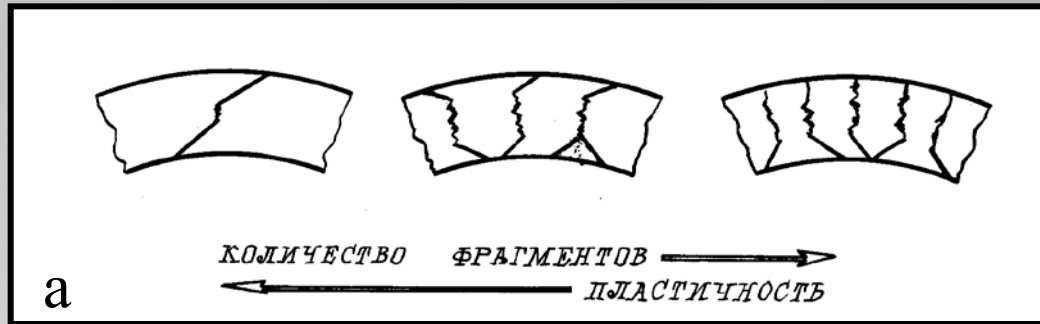
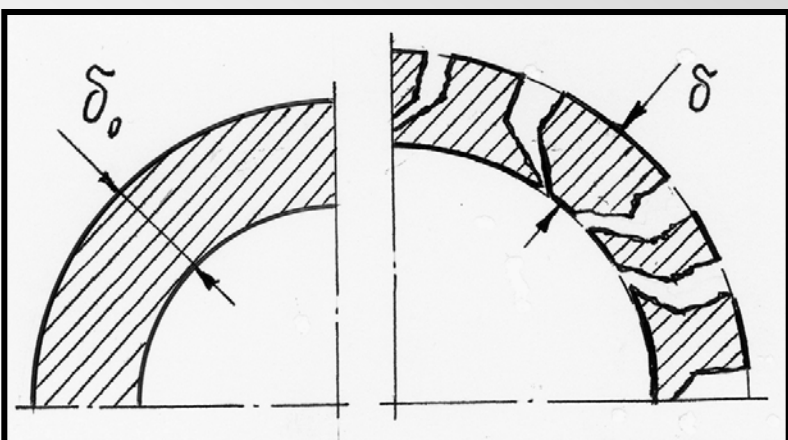


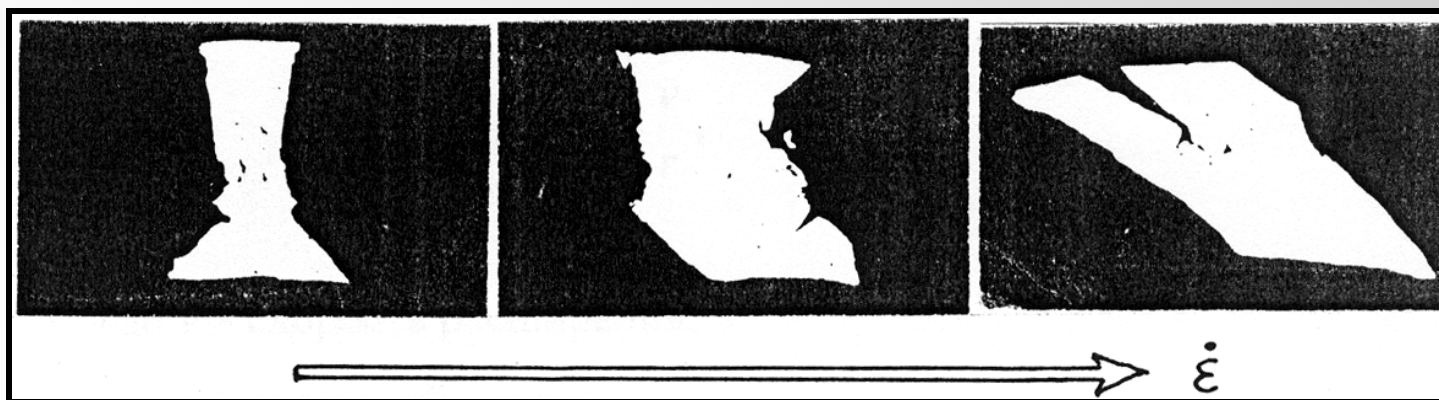
Схема разрушения оболочки на фрагменты:



Характерный вид сечений
фрагментов
(среднеуглеродистая сталь)

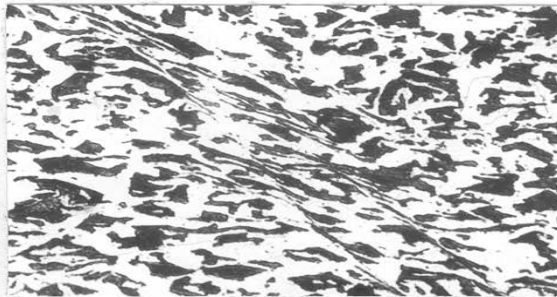


Связь характеристик дробления со
свойствами материала (а)
и параметрами нагружения оболочки (б)



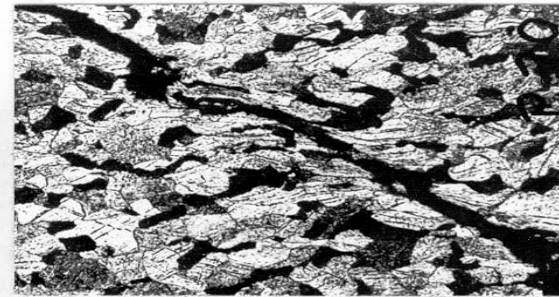
Влияние скорости деформации на механизм разрушения

Зоны локализации деформации
(полосы адиабатического сдвига)
на фрагментах оболочек
(а,б – сталь 20, в-е – сталь 60)



а)

125 мкм



б)

80 мкм



в)

50 мкм



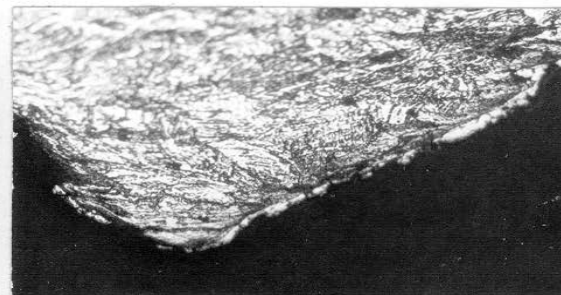
г)

40 мкм



д)

12,5 мкм



е)

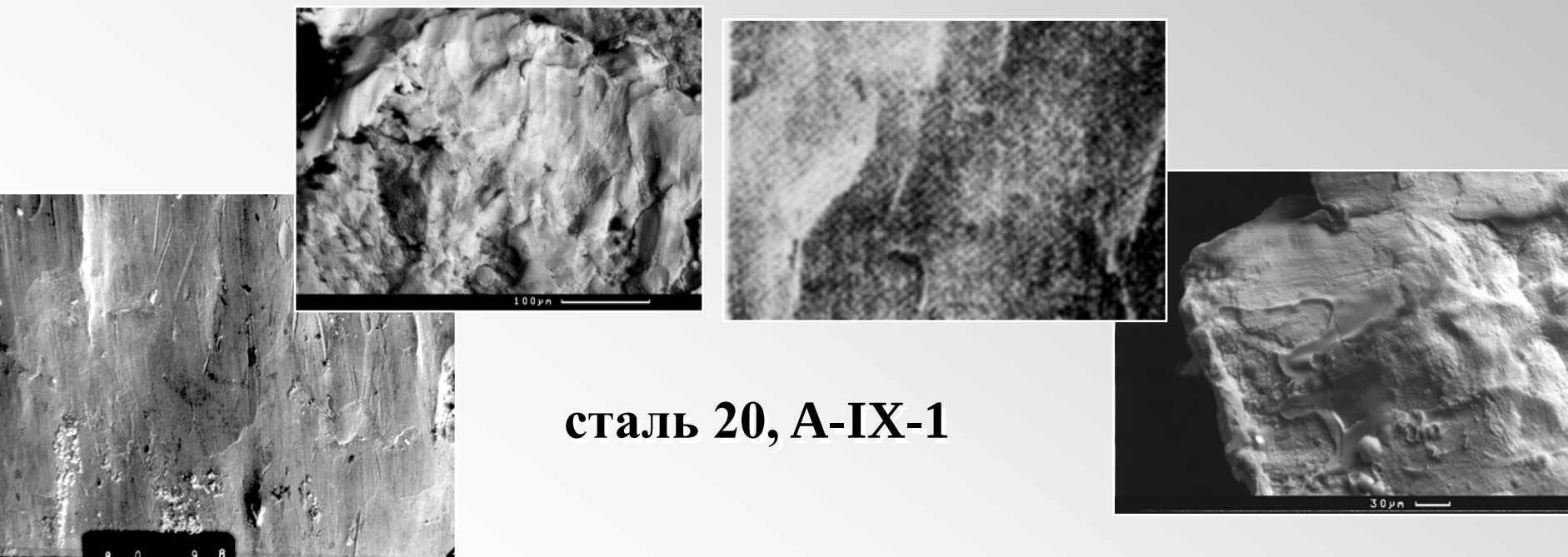
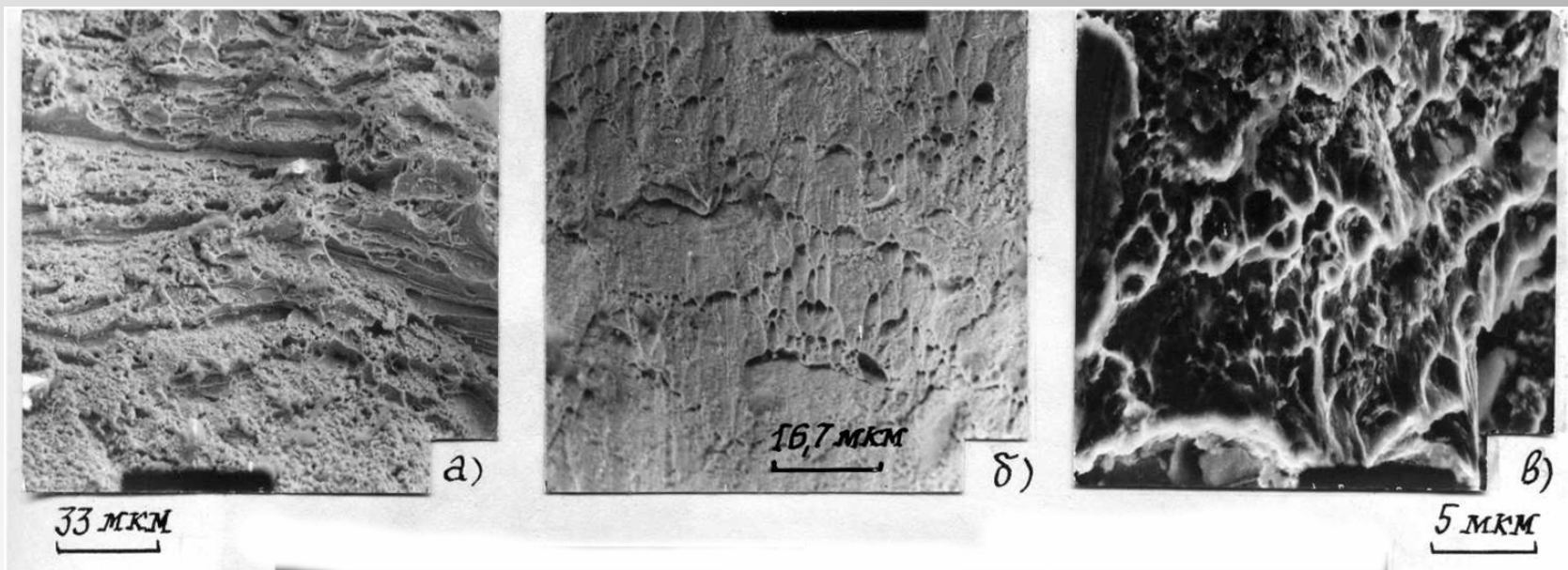
50 мкм



Температурный фон в оболочках

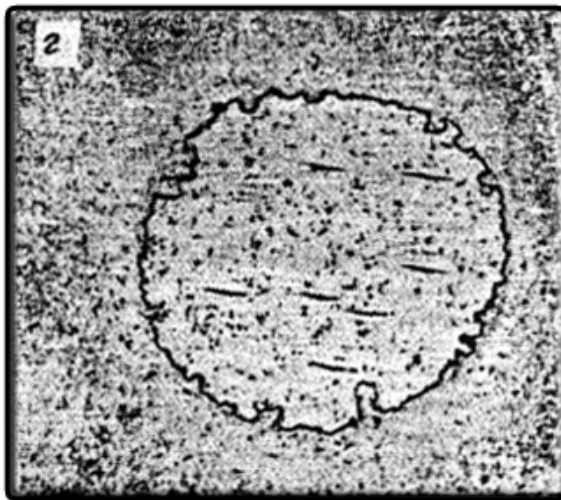
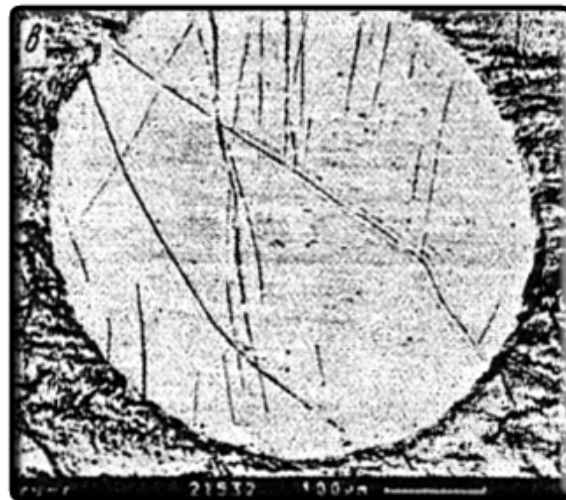
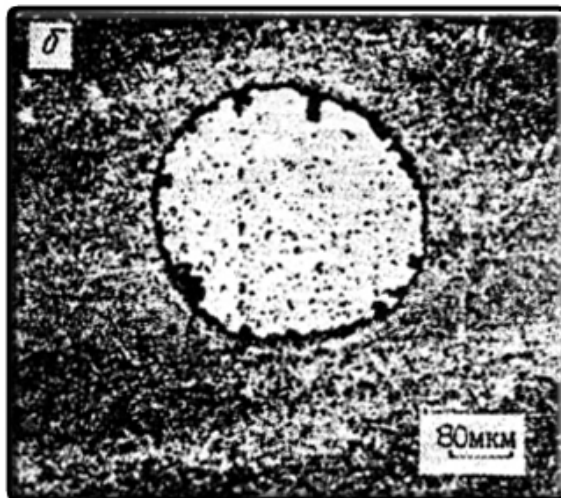
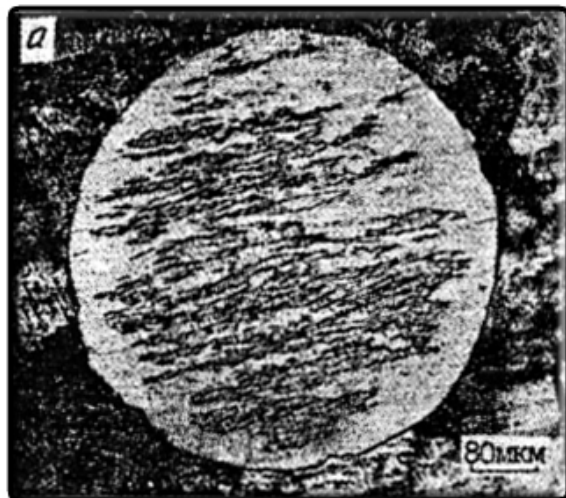
- ранее предполагалось, что средняя температура в стальных оболочках не превышает 400-500°С [Физика взрыва, М., 2002г.]
- расчеты, выполненные в последние годы, говорят о том, что средняя температура в стальных оболочках составляет 600-800°С
- в зонах локализации деформации (ПАС) температура достигает 1000-1100°С [Banks, J. Iron and Steels Inst., 1968]
- в последние годы оценка температуры в зонах локализации поднялась до 1400°С [Gray, Metallurg. and Mater. Trans., 2006]
- в оболочках из цветных металлов - индия и свинца температура достигает температуры плавления [Р. Slate и др., 1967 г.; А. Жиембетов и др. 2002 г.]

Микрорельеф поверхностей сдвига



сталь 20, А-IX-1

Дискообразные зоны плавления в ударных образцах



а,в - медь,
б,г - сталь 35ХМ2МФА
Ю.И. Мещеряков и др.
ФММ, №4, 1993

**Сферические частицы, образовавшиеся при
подрыве макета ВУ
(сталь 20, $d=90$ мм, $\delta=6$ мм, ВВ - А-IX-1).**

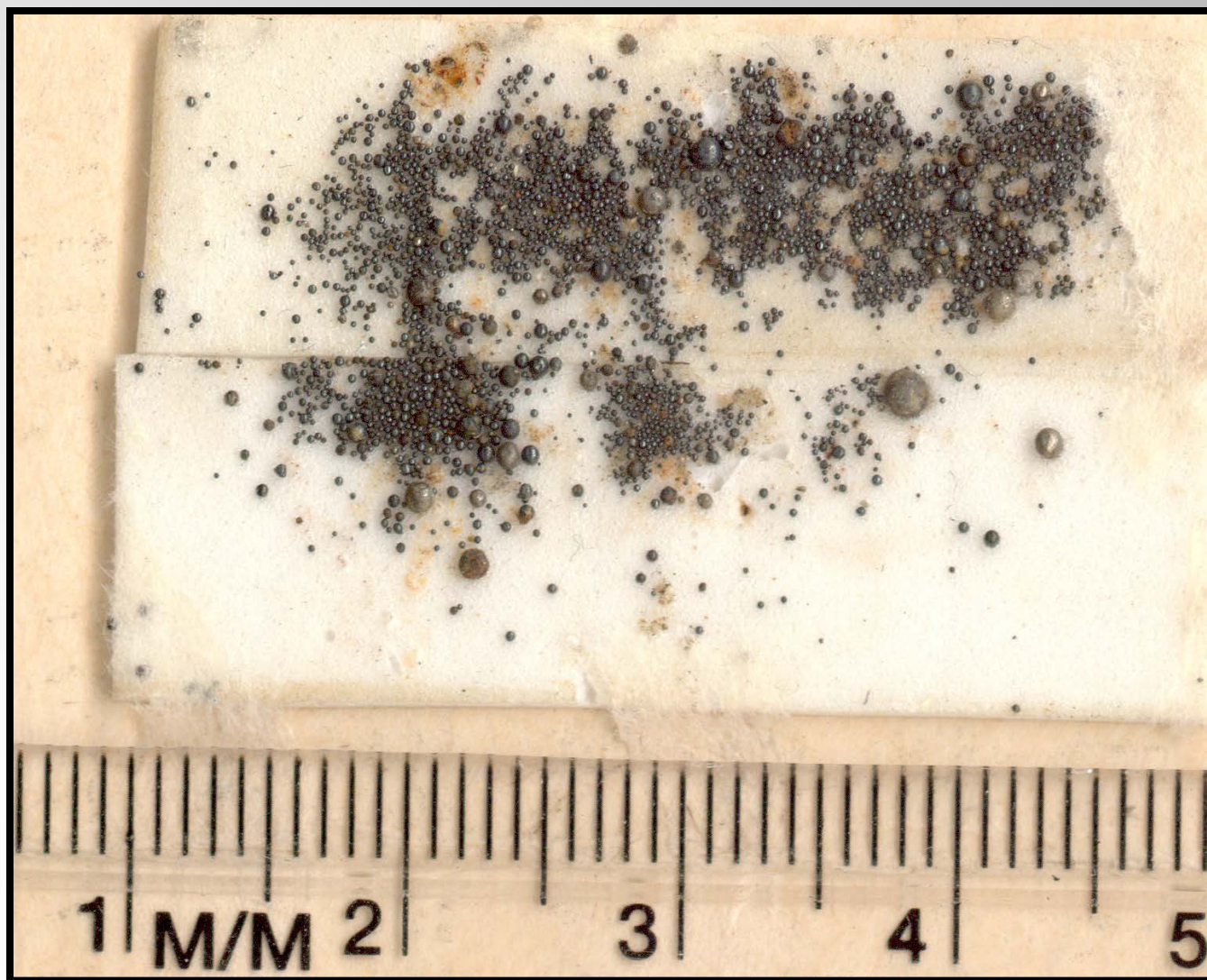
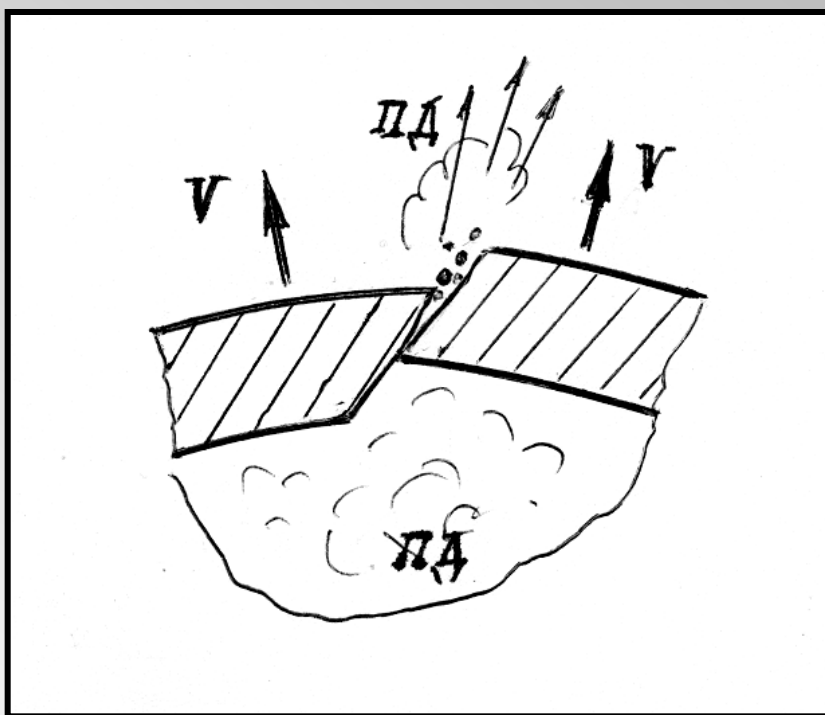
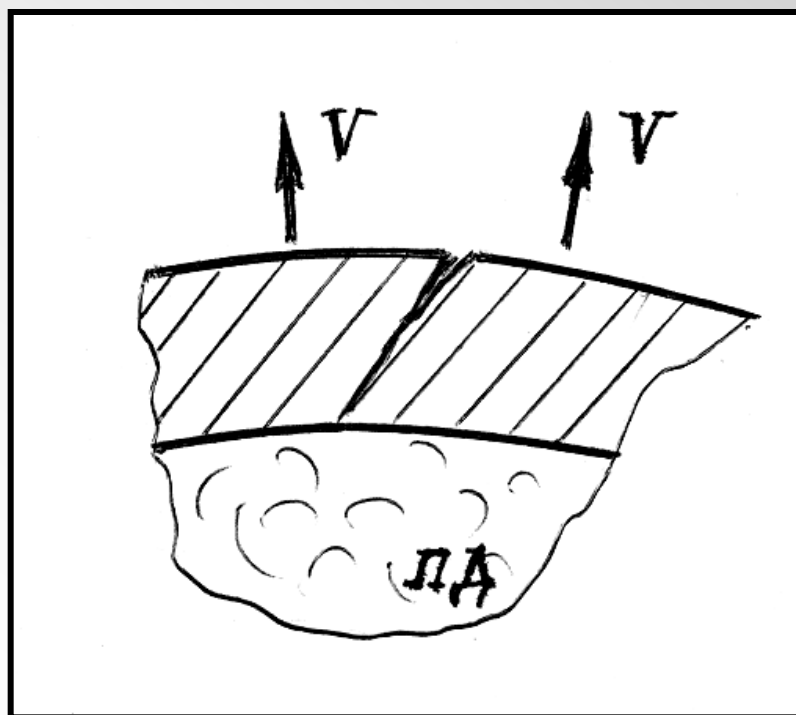
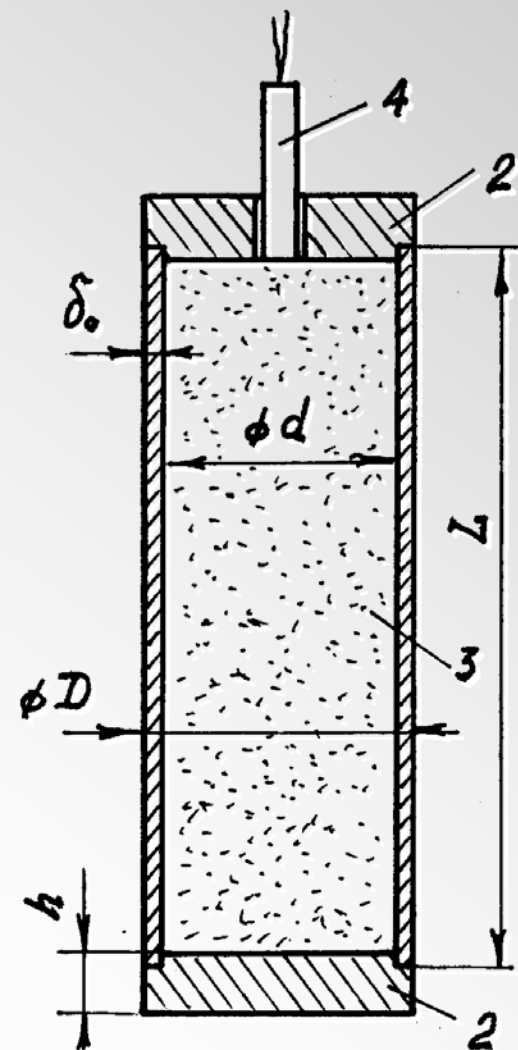


Схема выброса микрочастиц при разрушении оболочки в зонах локализованной деформации (сдвига).



Объект исследований – стальные цилиндрические оболочки



- 1 – оболочка,
- 2 – крышки,
- 3 – заряд ВВ,
- 4 - электродетонатор



Материалы: сталь 10, сталь 20, сталь 45,
сталь 60, сталь 60С2, сталь 110Г2С

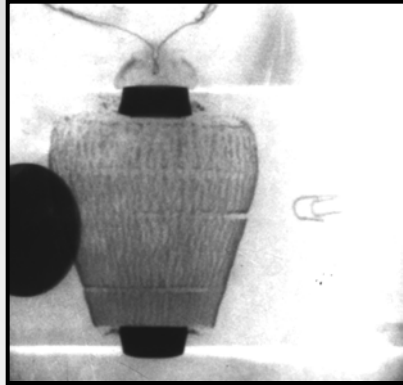
ВВ: порох «сокол» (детонация)
 смесь гексогена с мипорой, смесь
 аммиачной селитры с алюминием
 гексоген, ПВВ4, А-IX-1

Вид сферических частиц

Частицы правильной
сферической формы
(сталь 45, гексоген)

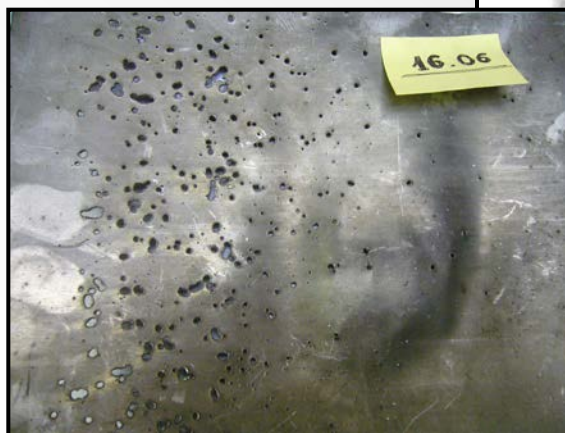
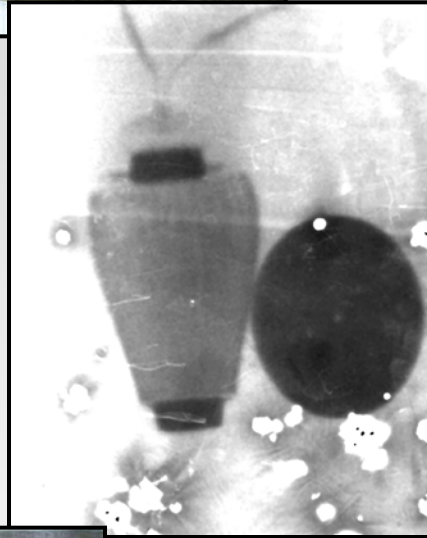


Тонкие стальные оболочки (рентген)



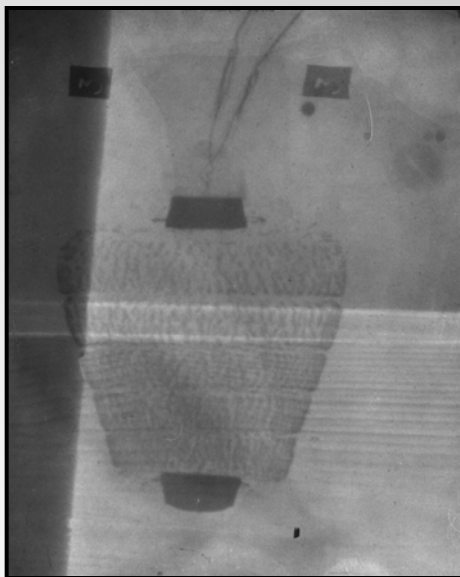
$\Delta_0=1.0$ мм,
 $V_0=2560$ м/с

$\Delta_0=0,5$ мм,
 $V_0=3130$ м/с

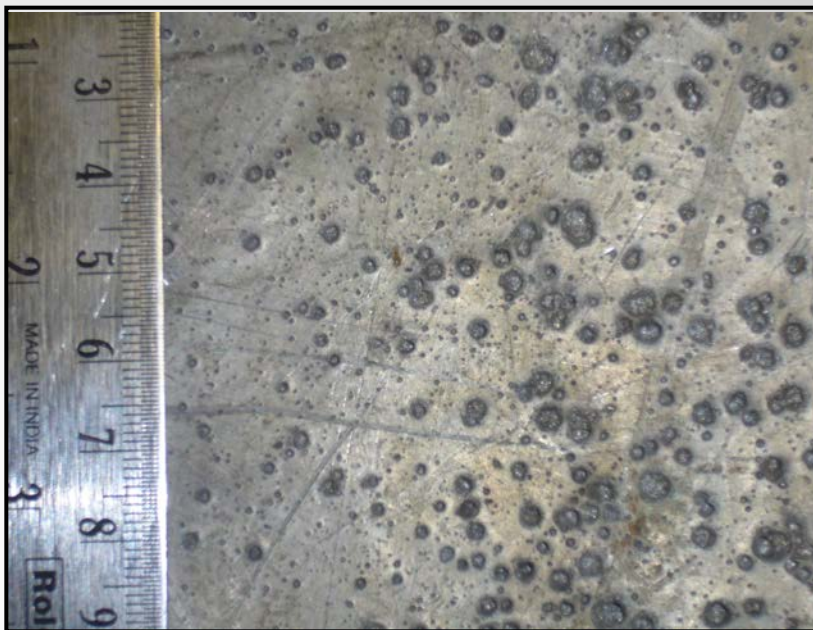
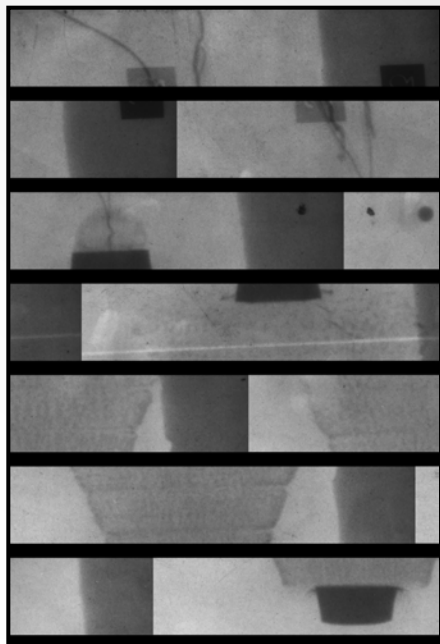


$\Delta_0=0,1$ мм,
 $V_0=3900$ м/с

Тонкие медные оболочки (рентген)



$\Delta_0 = 0,5$ мм,
 $V_0 = 3000$ м/с,



$\Delta_0 = 0,2$ мм,
 $V_0 = 3425$ м/с

Фрагменты с цветами побежалости

(сталь 10, $d=20$ мм, ВВ – ПВВ4)

Появляются при скоростях деформации более $0.8 \cdot 10^5 \text{с}^{-1}$

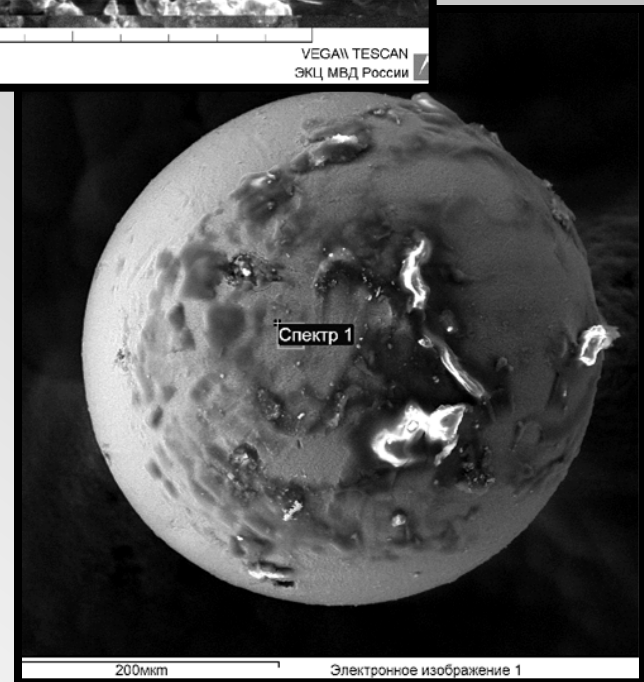
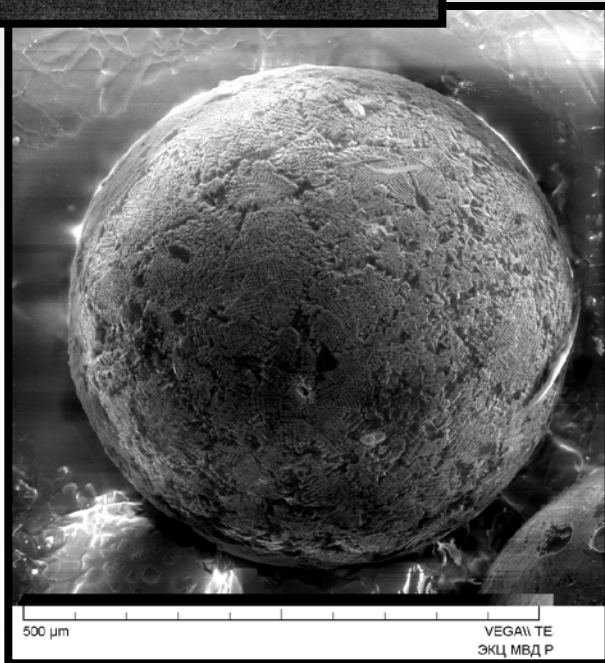
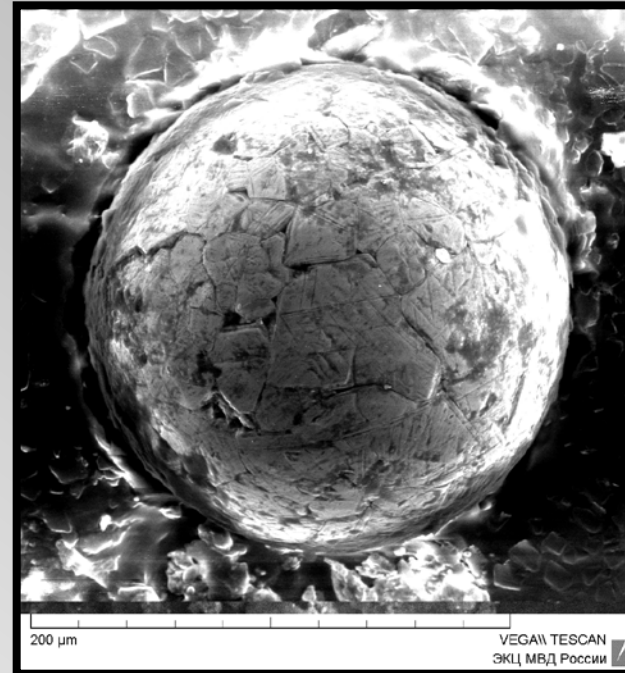
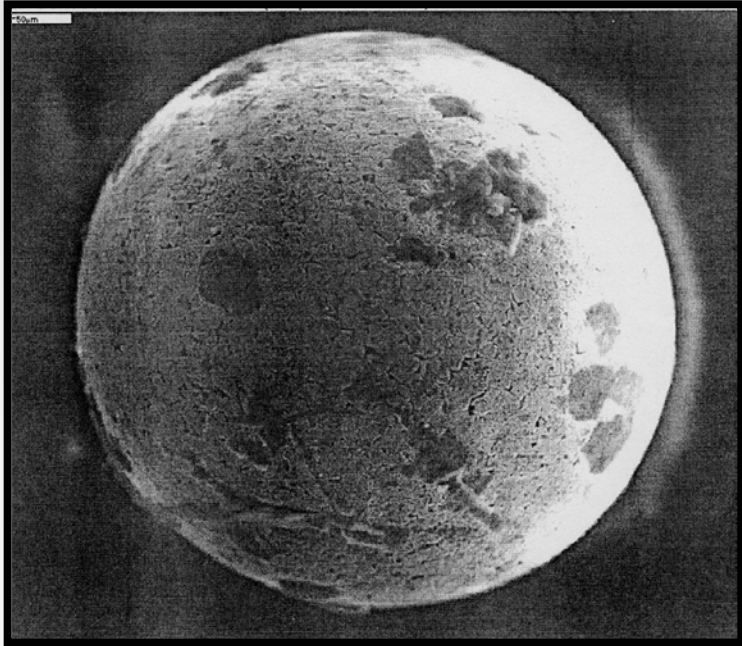


Толщина стенки 1.5 мм

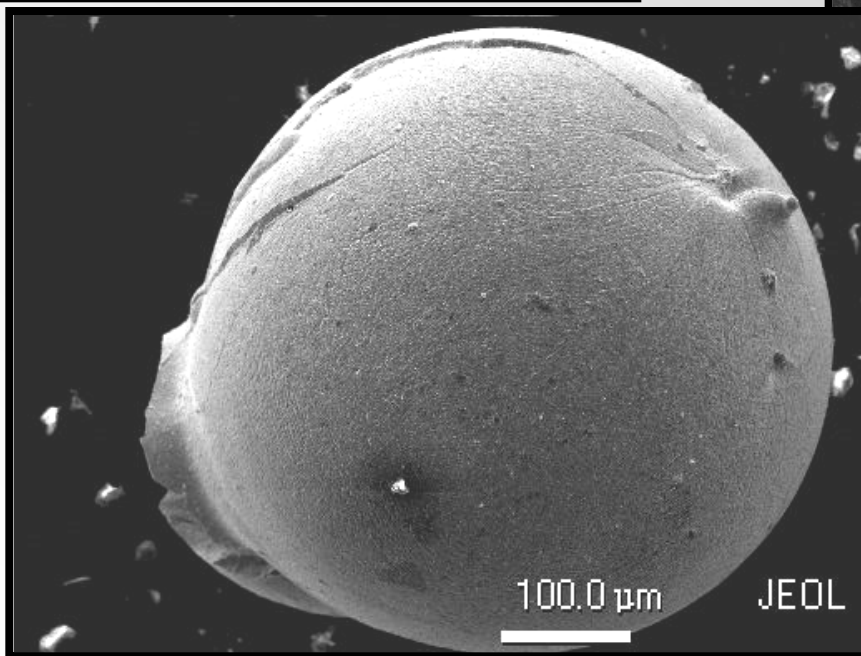
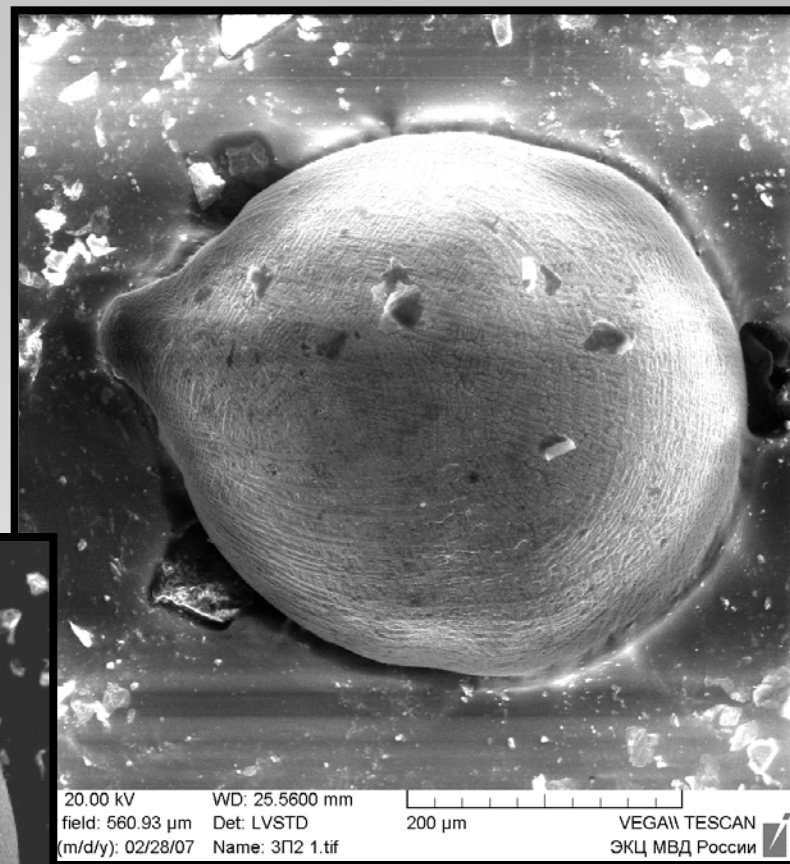
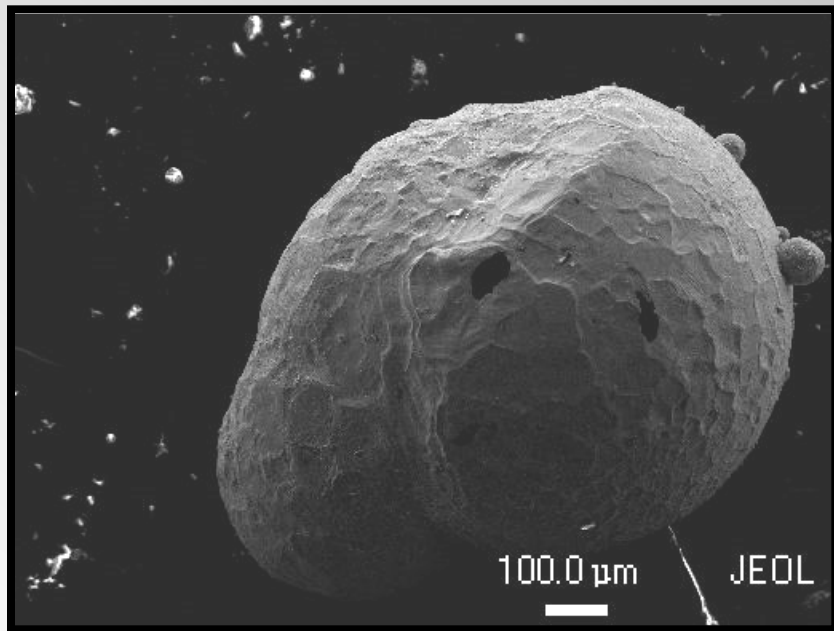


Толщина стенки 1.0 мм

Частицы правильной сферической формы



Частицы с искаженной формой



Вид сквозных отверстий в стенках полых сферических частиц

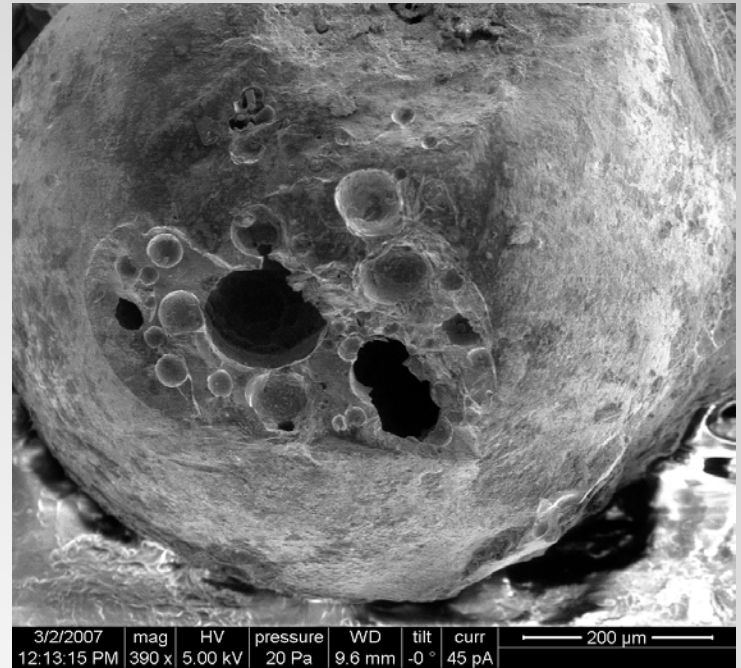
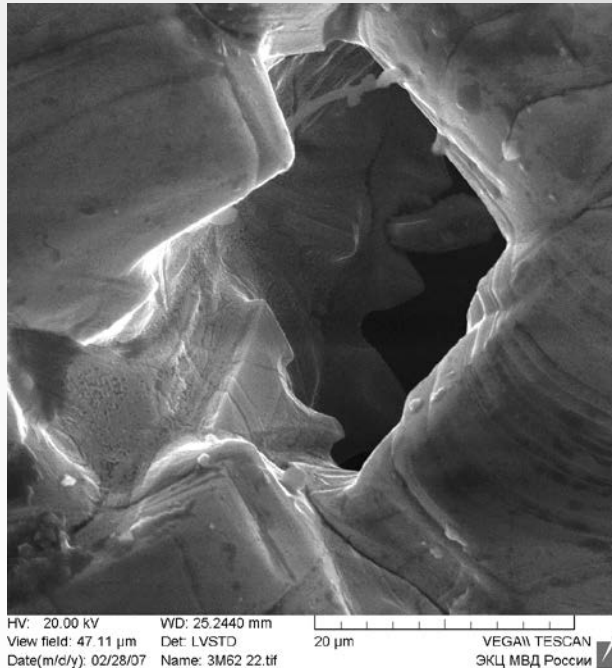
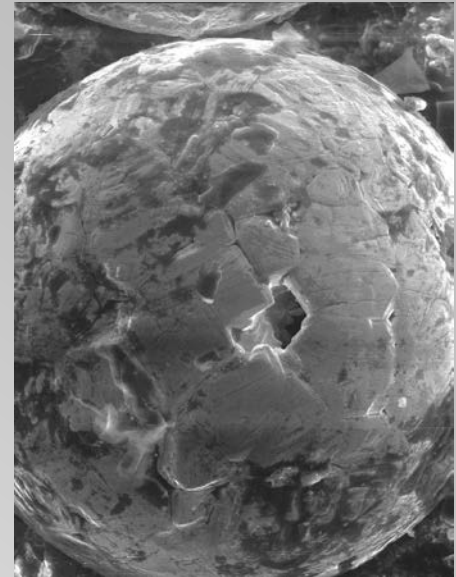
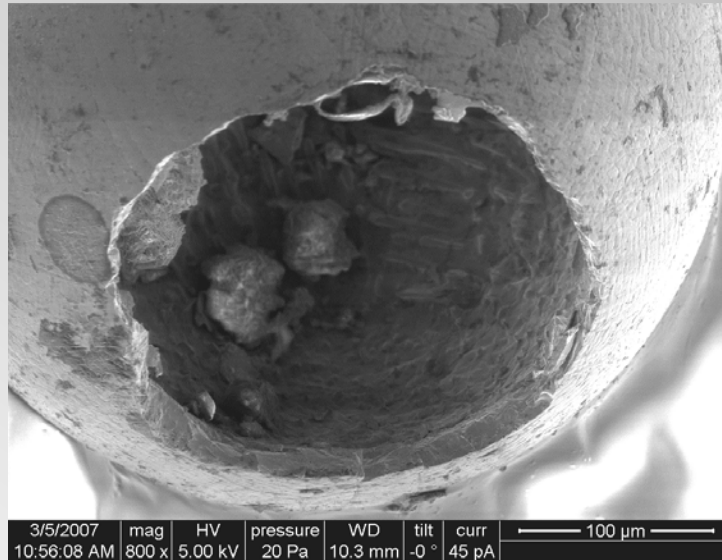
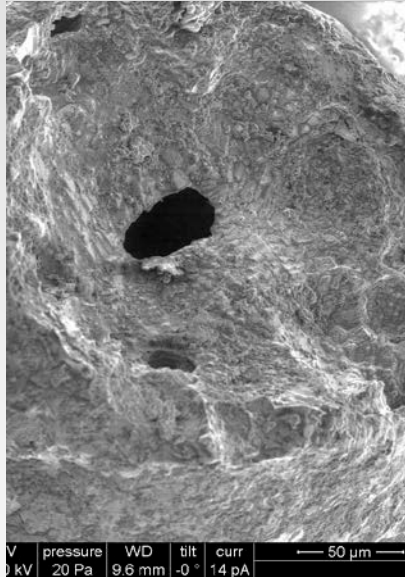
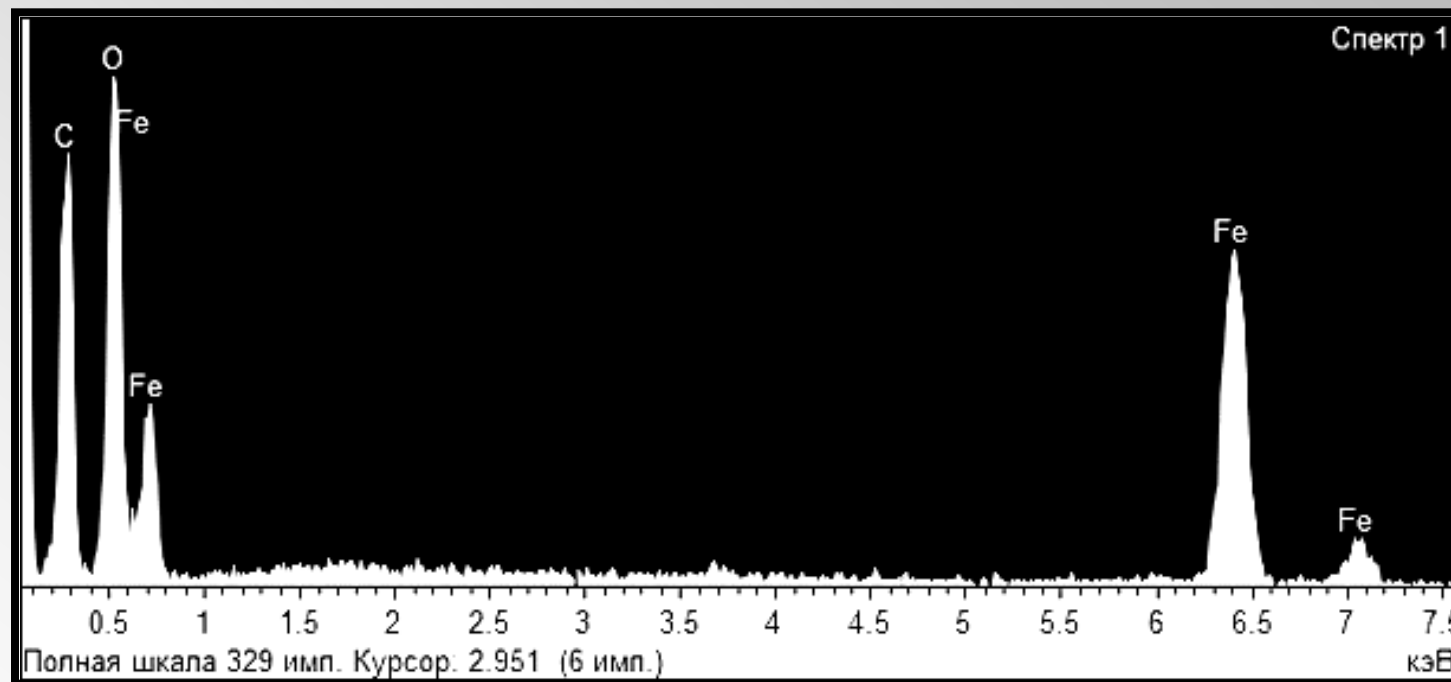


Диаграмма состава вещества поверхности сферической частицы



Поверхностный слой частиц состоит из окислов железа

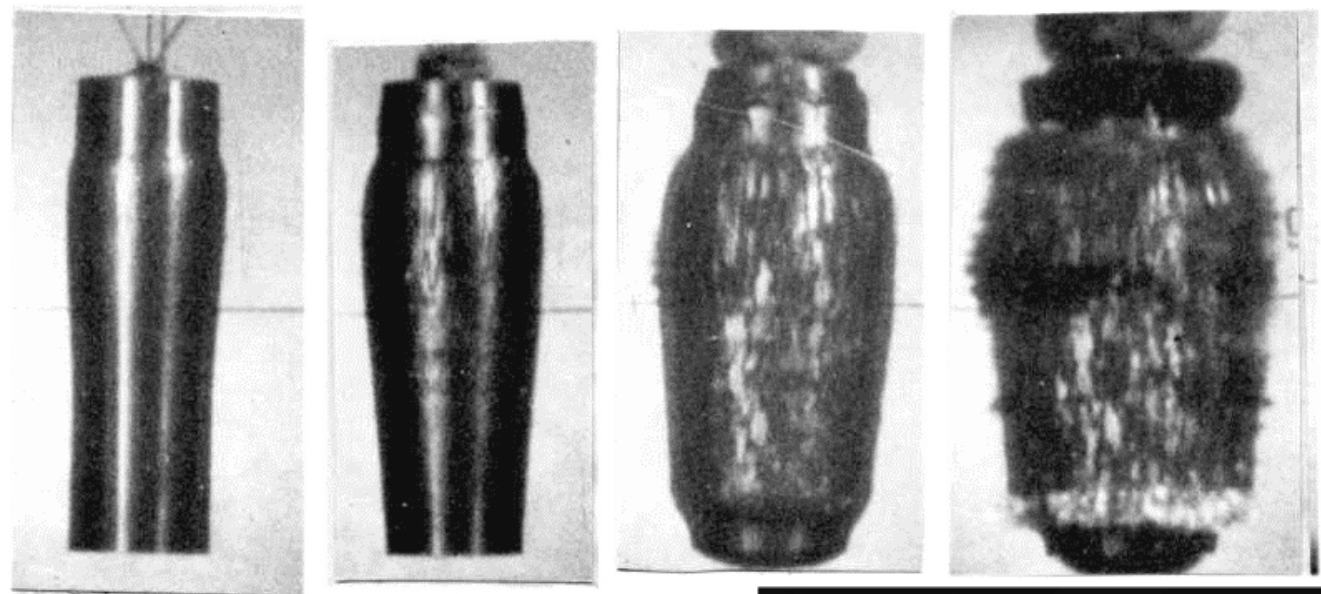
Иногда в поверхностном слое присутствуют

Si - легирующая добавка к стали и

Al и Ca - входящие в состав ВВ.

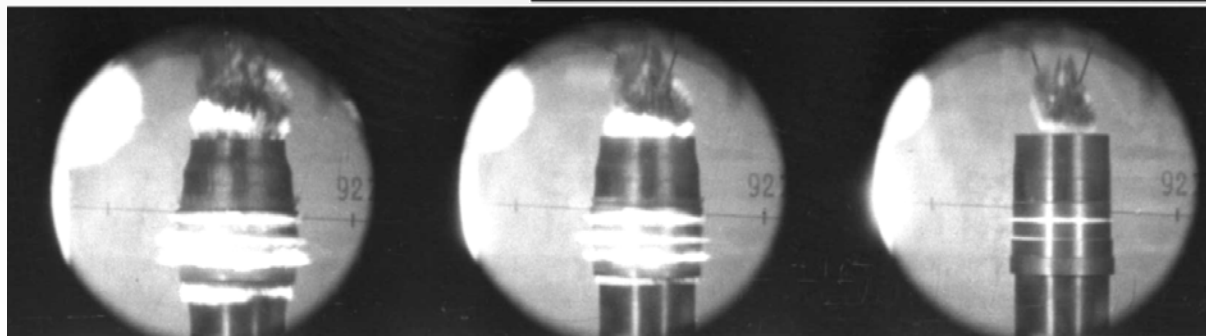
При использовании аммиачной селитры на поверхности частиц присутствует N (азот).

Оптическая регистрация процесса расширения оболочки



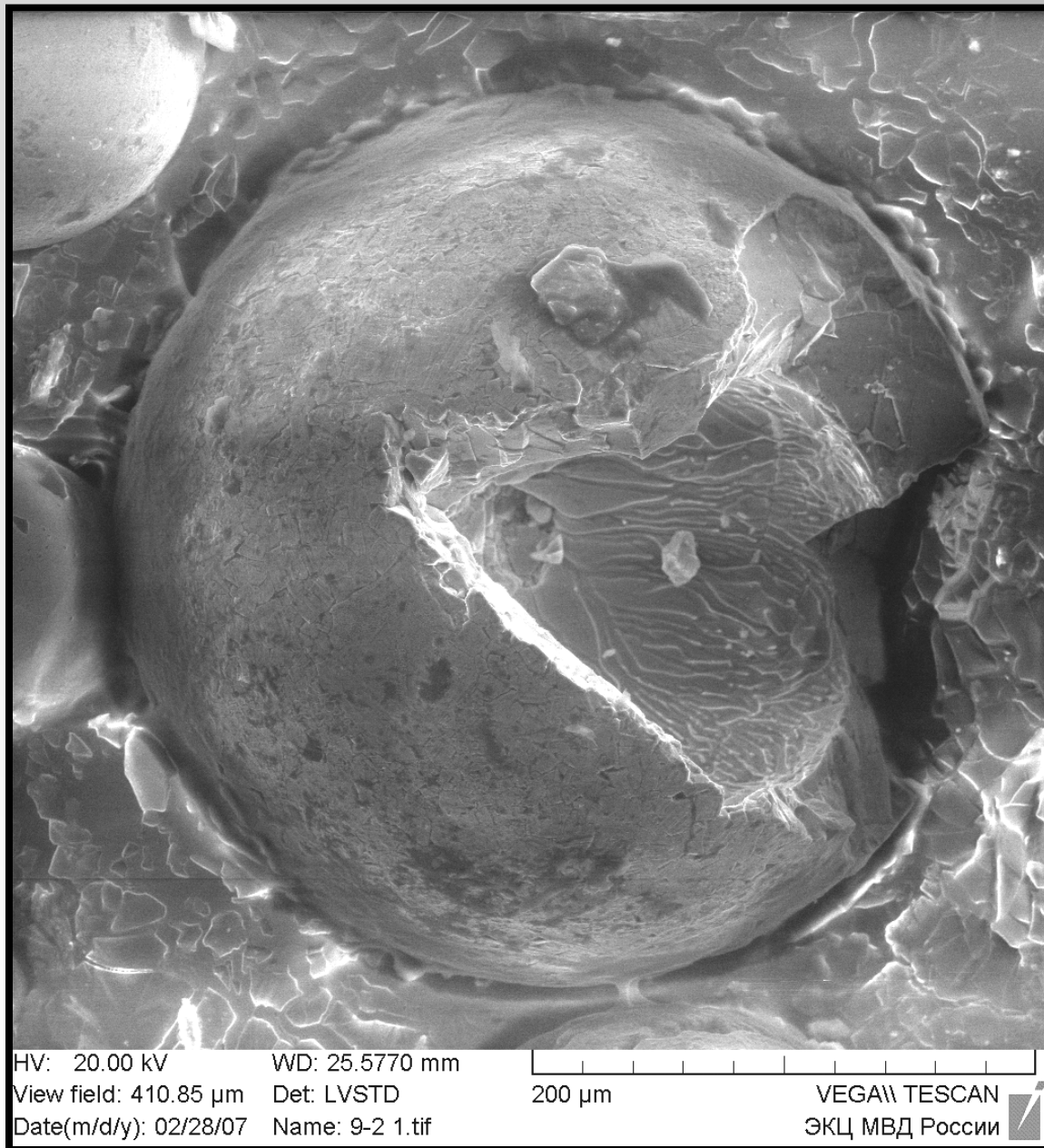
сталь 20

титан ВТ-6

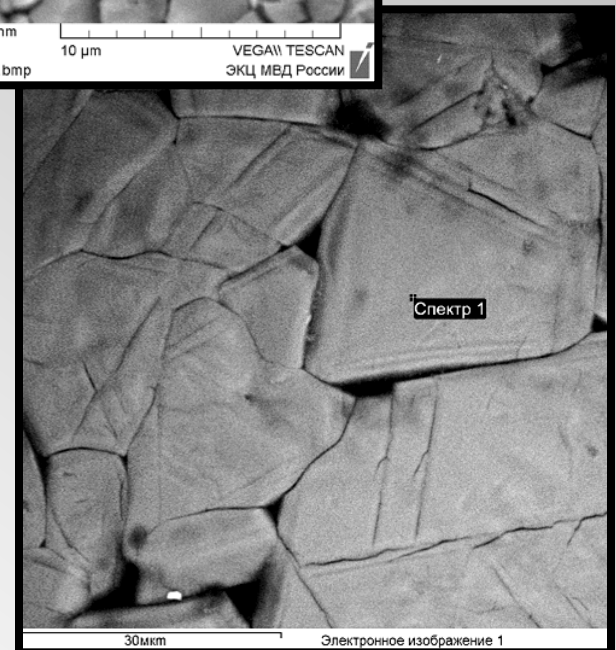
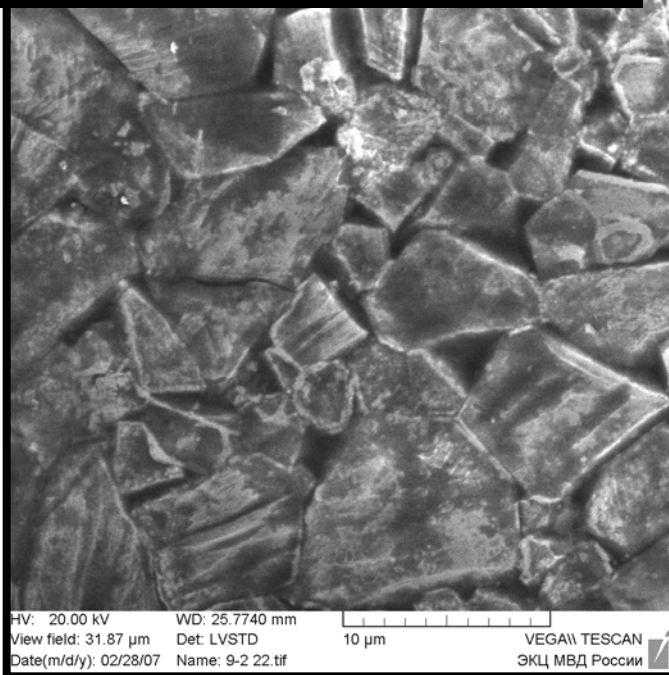
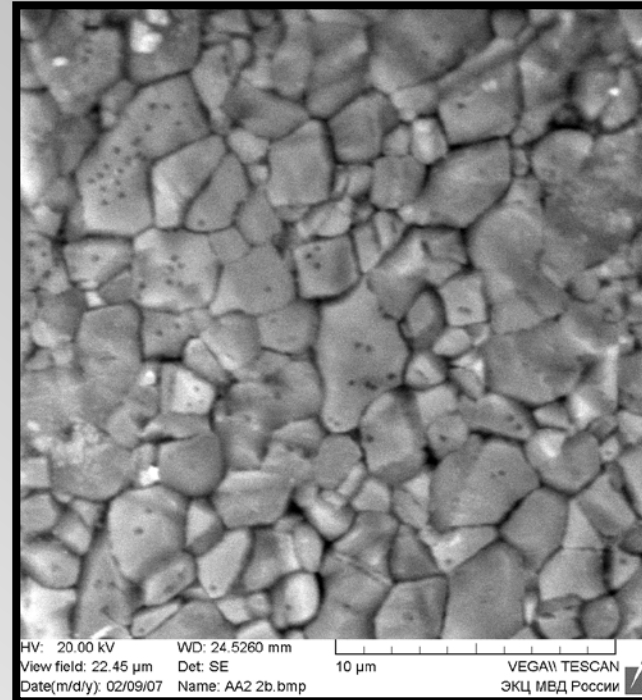
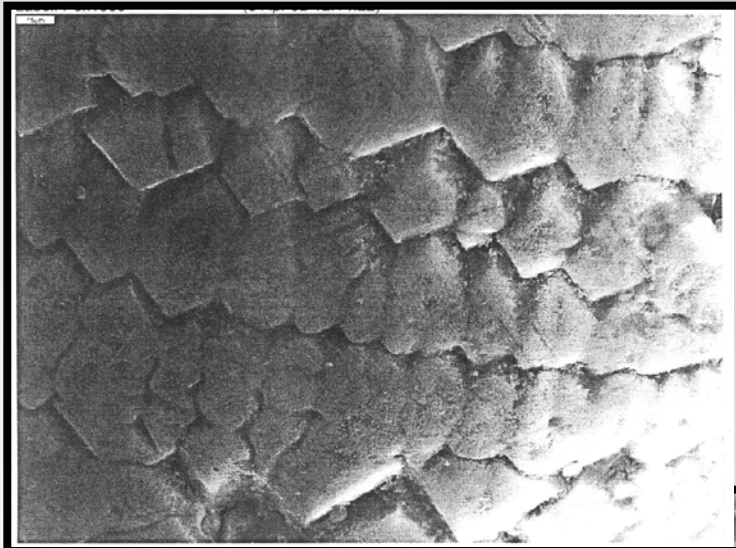


алюминий Д16

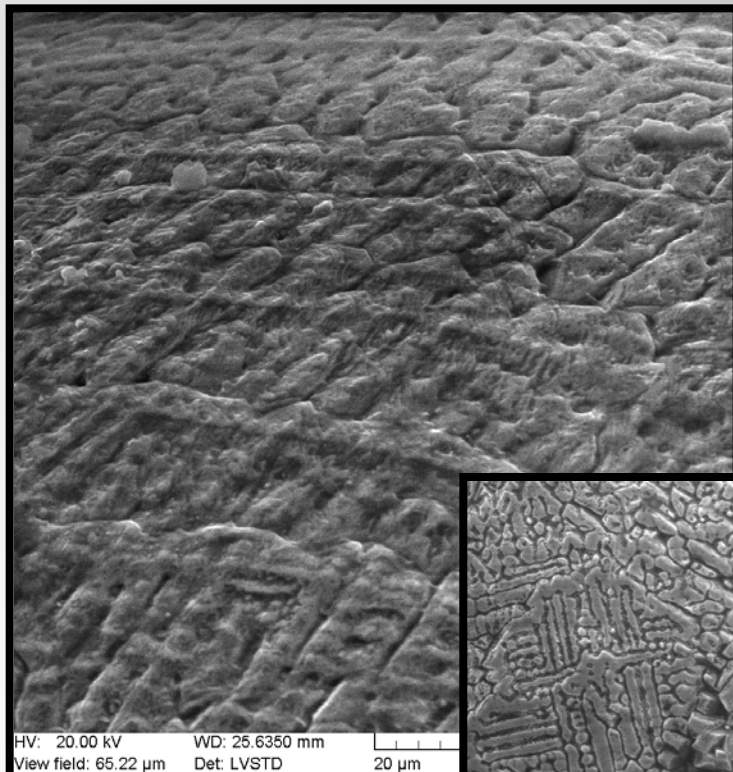
Частицы со сколами поверхностного слоя



Микроструктура поверхности частиц

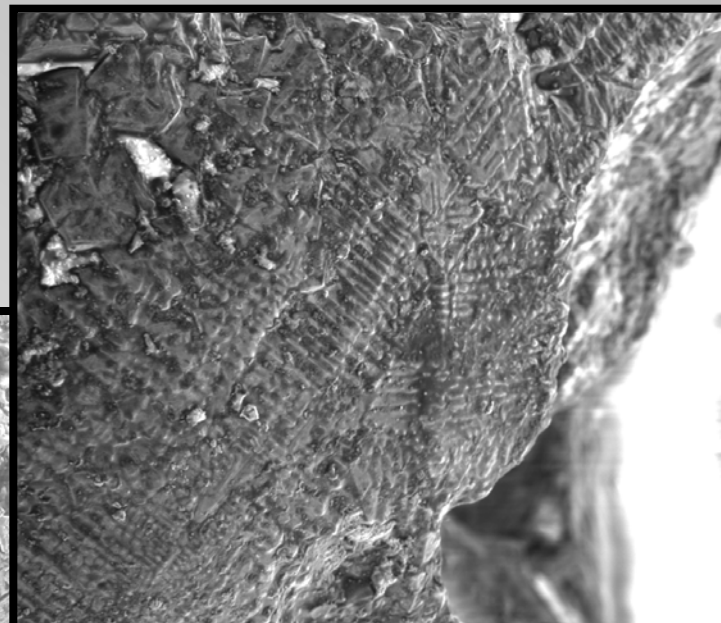


Дендриты на поверхности частиц



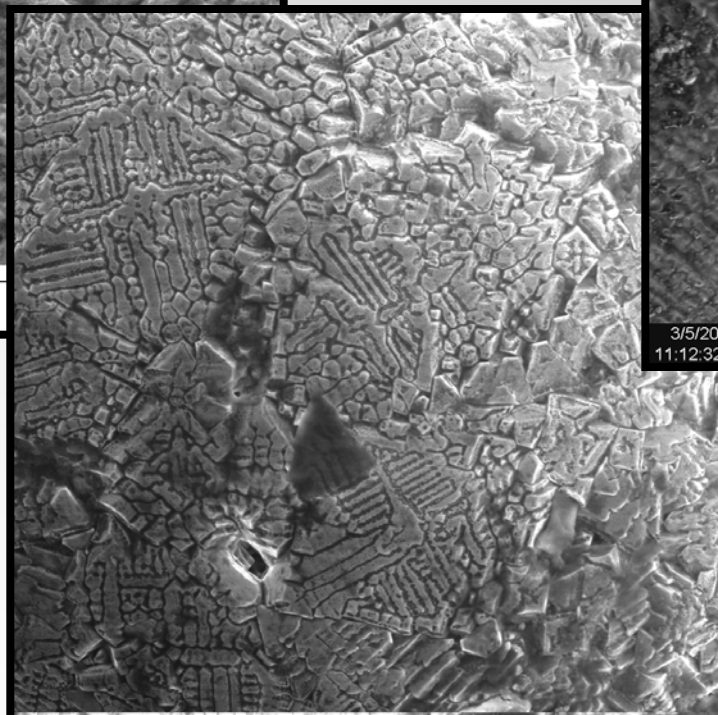
HV: 20.00 kV WD: 25.6350 mm
View field: 65.22 μm Det: LVSTD
Date(m/d/y): 02/28/07 Name: 3П2 2.tif

20 μm



3/5/2007 mag HV pressure WD tilt
11:12:32 AM 2 000 x 5.00 kV 20 Pa 10.7 mm -0 °

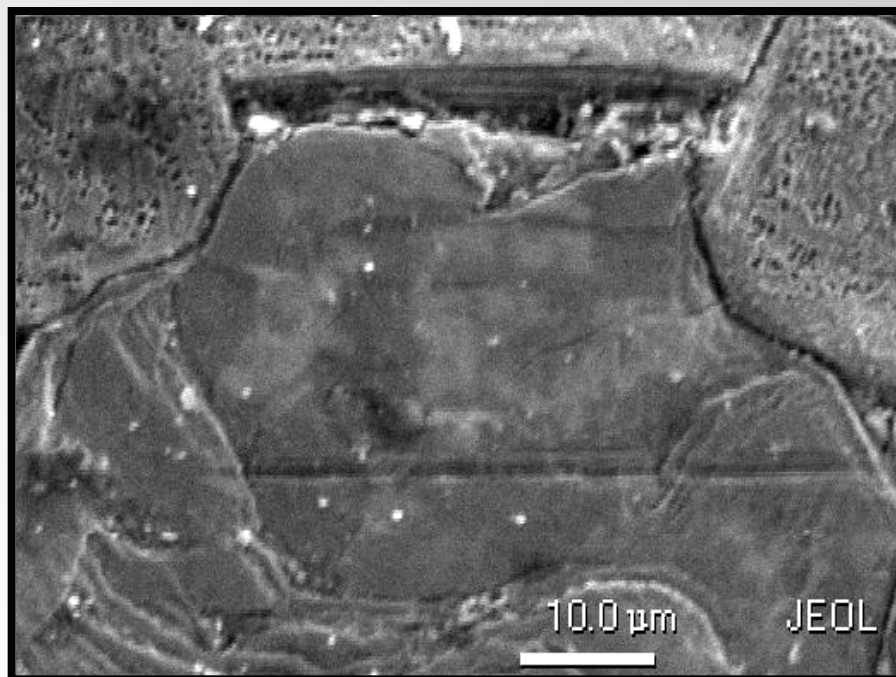
50 μm



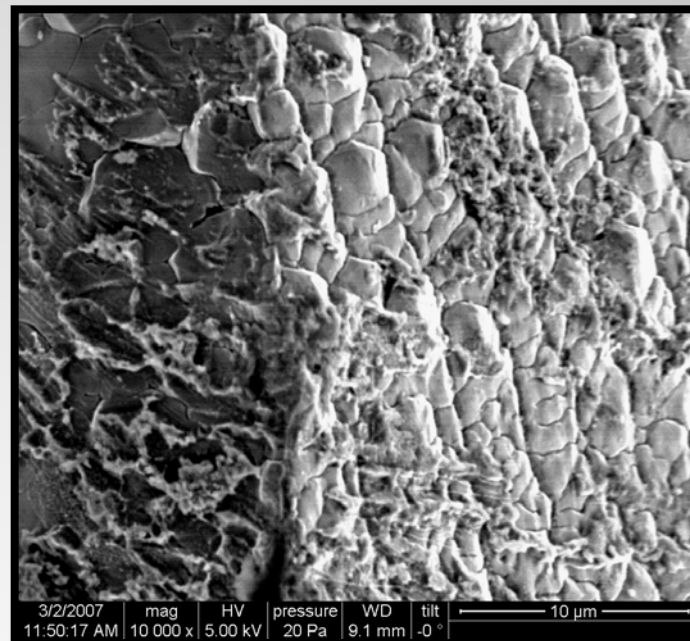
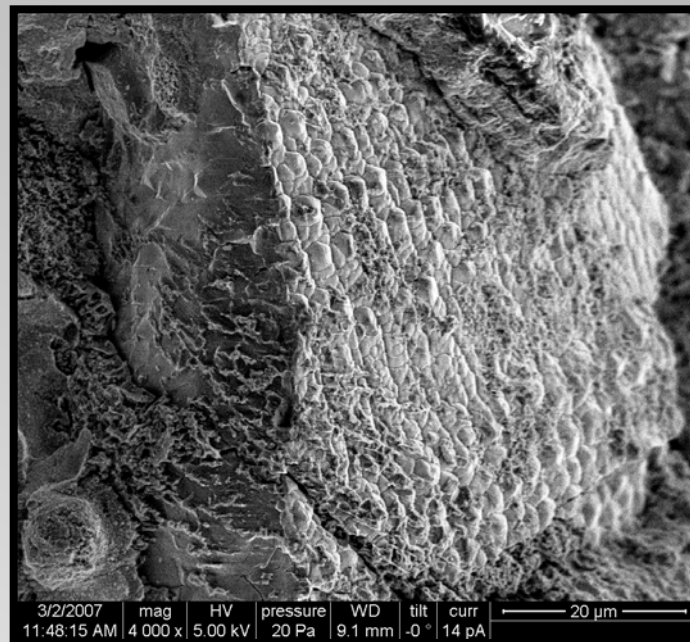
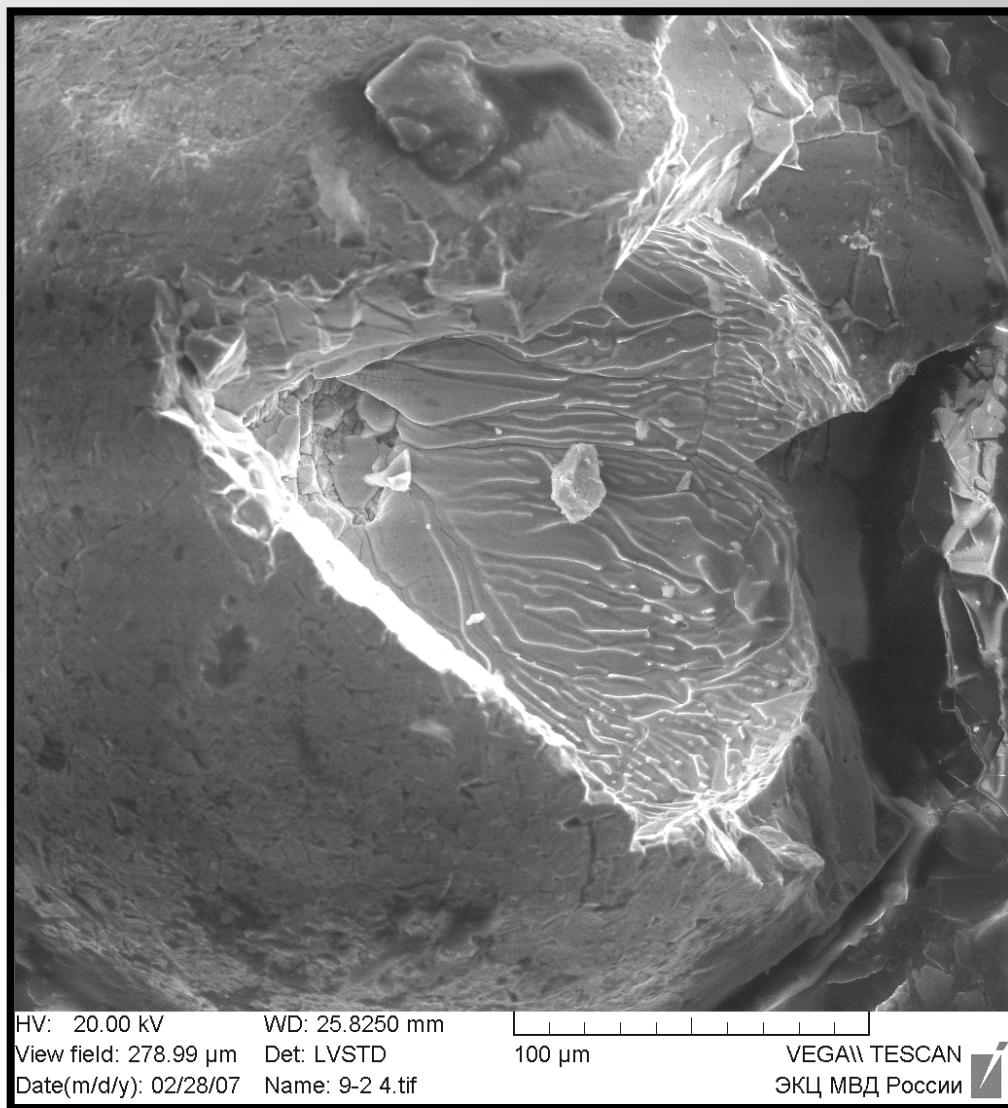
200 μm

VEGA\\ TESCAN
ЭКЦ МБД России

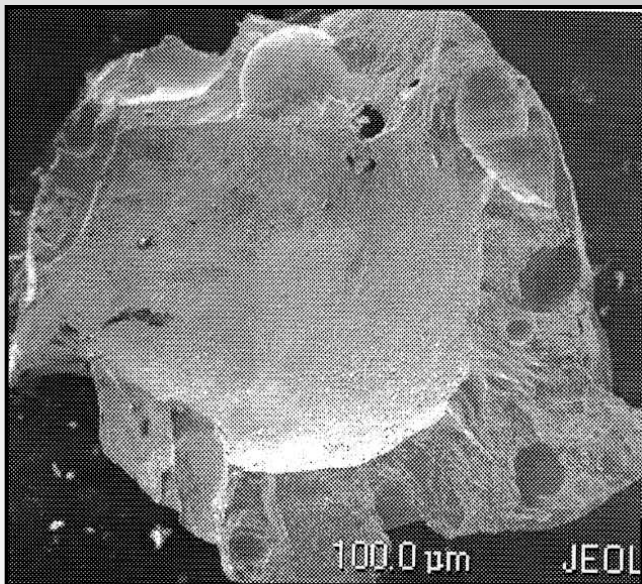
Участки поверхности со сглаженными и недеформированными зёрнами



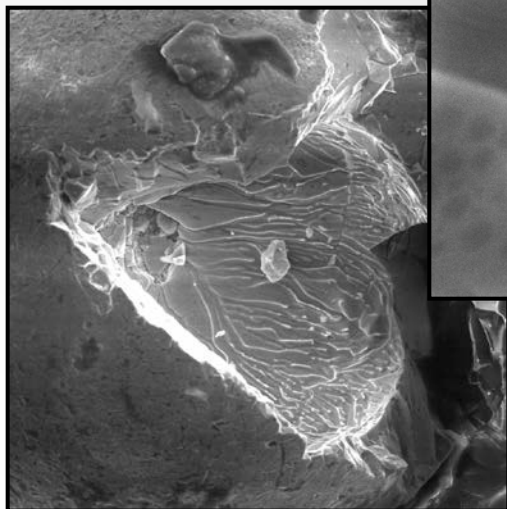
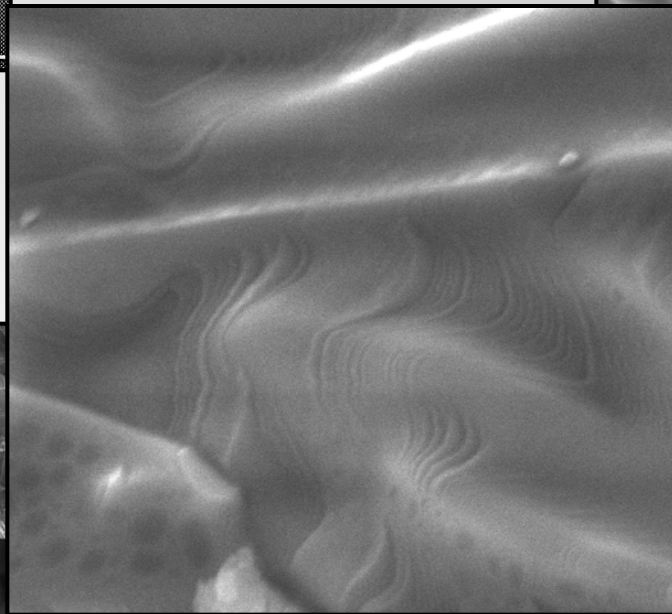
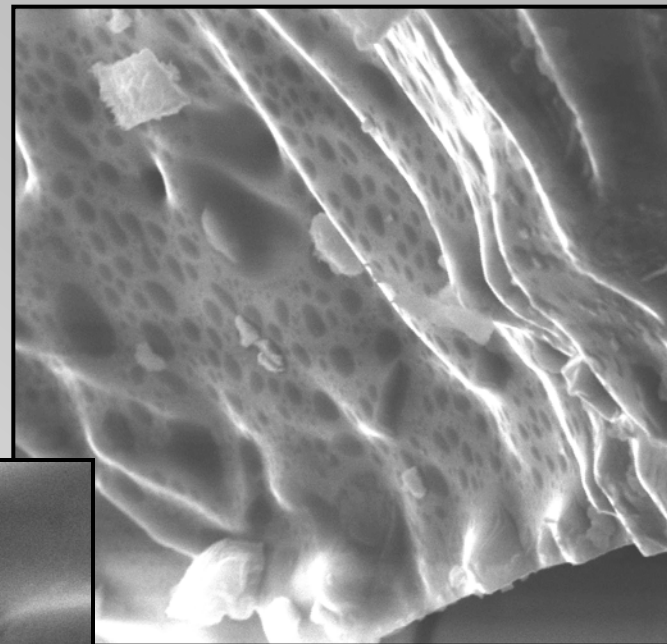
Строение окисного слоя



Фрагмент полый сферической частицы



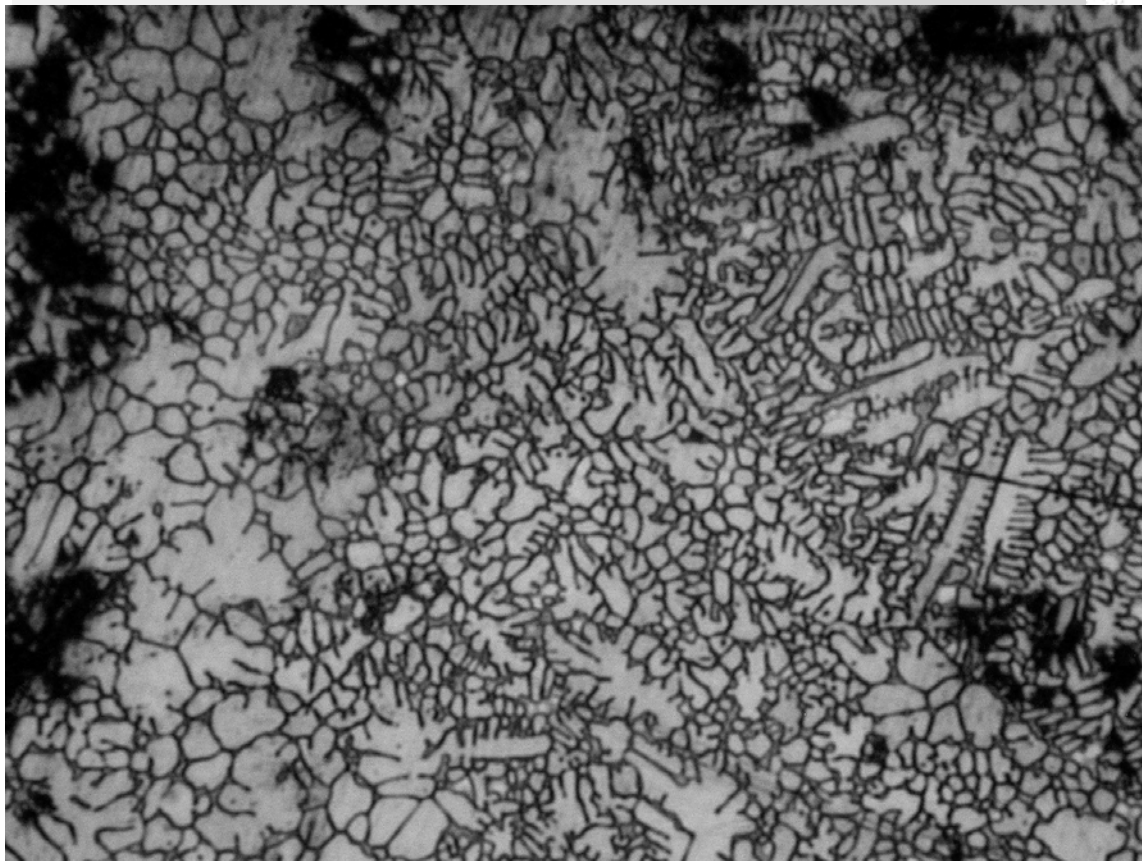
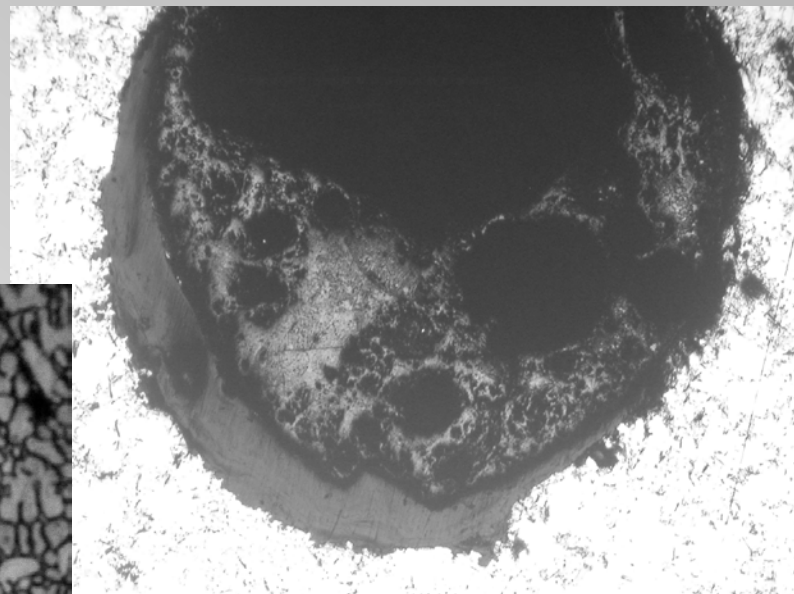
оболочка – сталь 10,
 $\Delta_0=1.0$ мм, ВВ – А-IX-1



Волнообразный
микрорельеф
внутренней поверхности
полых сферических частиц

Вид поперечного сечения и микроструктура ядра сферической частицы

оболочка – сталь 10,
 $\Delta_0 = 1.0$ мм,
ВВ – смесь гексогена с мипорой



Условие появления сферических частиц

Сталь 45 диаметр 20

Толщина стенки, мм	Порох "Сокол" детон.	Амм. селитра + ал. пудра	Гексоген + мипора	Гексоген	ПВВ-4	А-IX-1
0.2		20	0	15	17	11
0.5		27	5	20	28	15
1		11	2	18	14	30
1.5		26	1	5	24	23
2.5			0	11	7	
5			0	11	10	
7.5				20	6	
10				8	7	

сталь 10 диаметр 20

толщина стенки, мм	порох "Сокол" детон.	Амм. селитра + ал. пудра	Гексоген + мипора	Гексоген	ПВВ-4	А-IX-1
0.2	17	26	16	8	8	12
0.5	20	24	6	8	17	18
1	15	16	4	8	13	28
1.5	5	23	24	25	16	28

Спасибо за внимание!

