

# Металлографические и фрактографические исследования отколов в стальных оболочках

*Бойко м.м., Грязнов Е.Ф., Никитина Е.В.,*

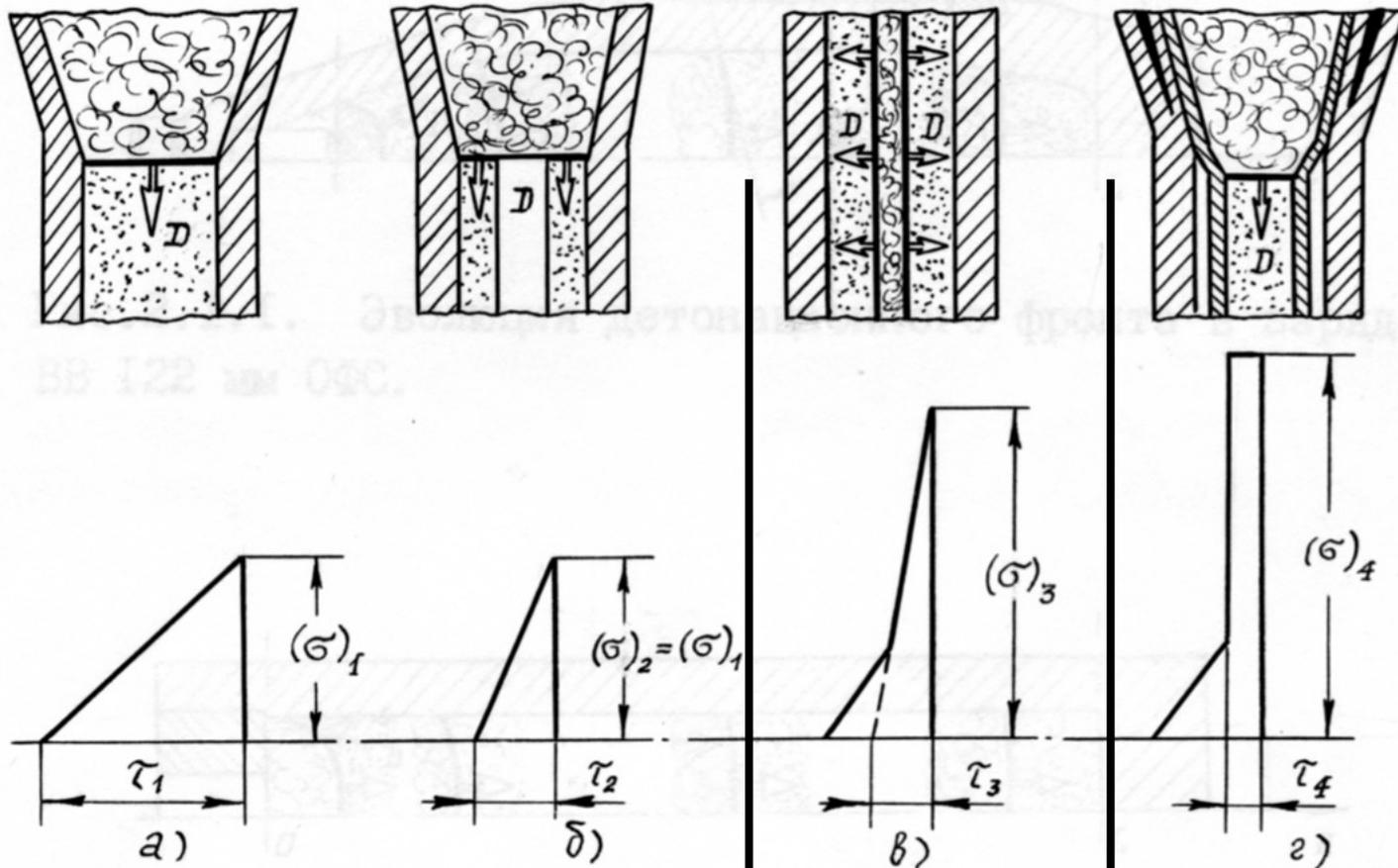
*Уткин А.В.\**

sm4@sm.bmstu.ru

Московский государственный технический университет  
им. Н.Э.Баумана  
г.Москва

\*Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка

# Схемы нагружения оболочек

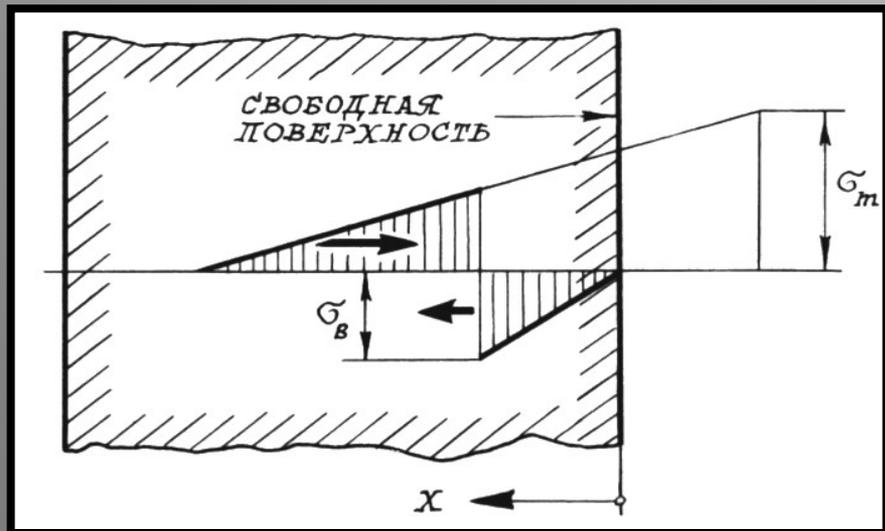


Скользящий детонационный фронт

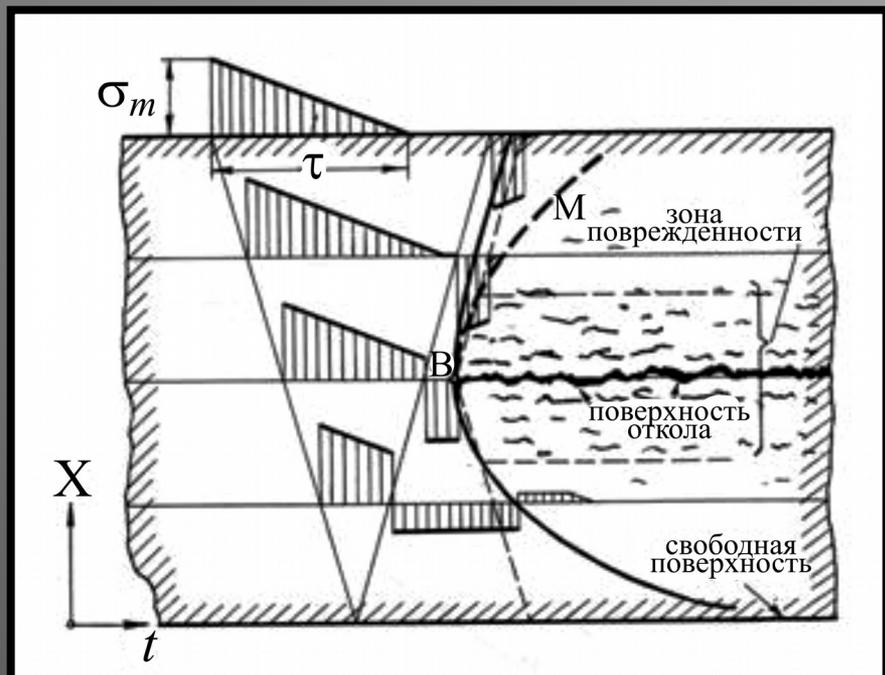
Падающий детонационный фронт

Кольцевые ударники

# Взаимодействие падающей и отраженной волн



Акустическое приближение



Изменение давления при отражении импульса сжатия от свободной поверхности. (Броберг)

# Откольная прочность материала оболочек

Цилиндрические оболочки, падающий детонационный фронт

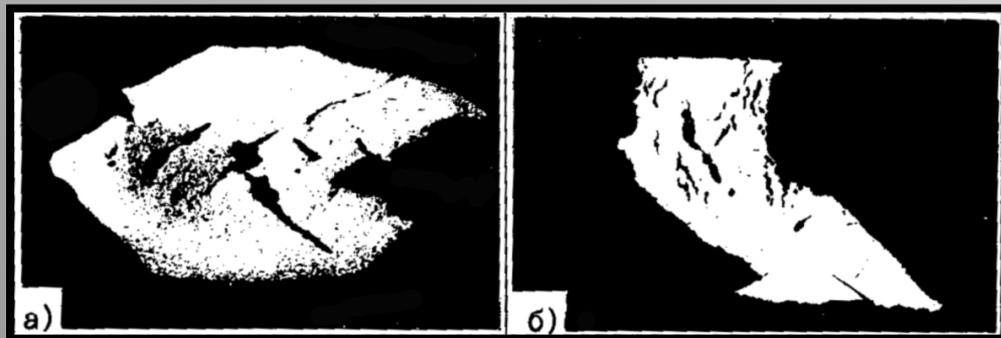
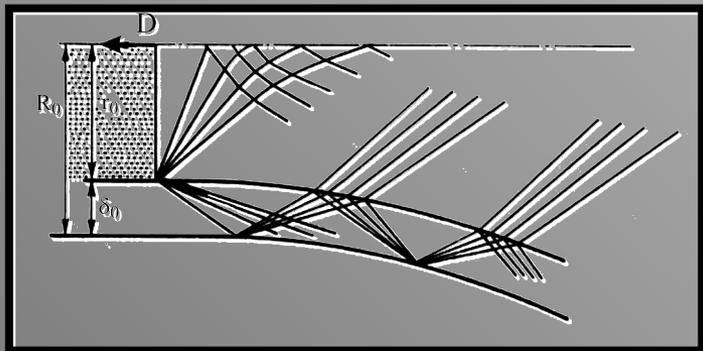
Вид образца	Оболочка			Пластина		
Толщина $\Delta_0$ , мм	10	2,5	1,0	10	2,5	1,0
Откольная прочность, $\sigma_s$ , ГПа	2,6	3,0	нет откола	3,0	3,0	нет откола

Конические оболочки, нагружение кольцевыми ударниками

Толщина оболочки, мм	5	8	12	18	25
Материал оболочки	сталь 45	сталь 20	сталь 20	сталь 45	сталь 20
Откольная прочность $\sigma_s$ , ГПа (эксперимент)	2,89	1,87	2,28	2,6	2,32
Откольная прочность $\sigma_s$ , ГПа (расчет)	2,78	2,22	2,20	2,82	2,37

Откольные прочности сталей при одноосной и плоской схемах деформированного состояния практически не отличаются.

# Скользящий детонационный фронт. Сплошной заряд ВВ. Толстые оболочки.



сталь 20

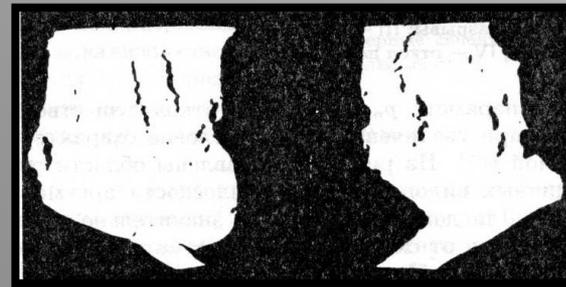
сталь 60

$$\frac{dp}{dt} = 1.5 \dots 4.5 \text{ ГПа / мкс}$$

**Зоны деструкции фрагментов стальных оболочек**



сталь 60C2

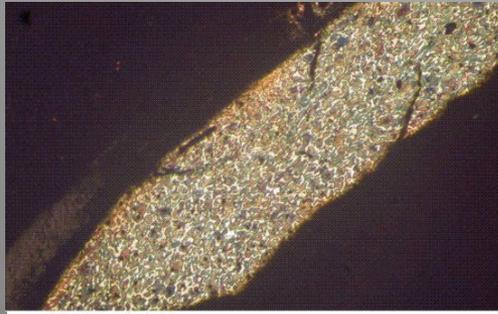


сталь 110Г2С

# Скользящий детонационный фронт.

Сплошной заряд ВВ. Тонкие оболочки.

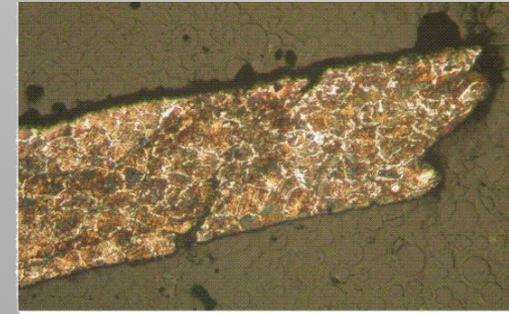
Отсутствуют зоны деструкции у фрагментов тонкостенных макетов



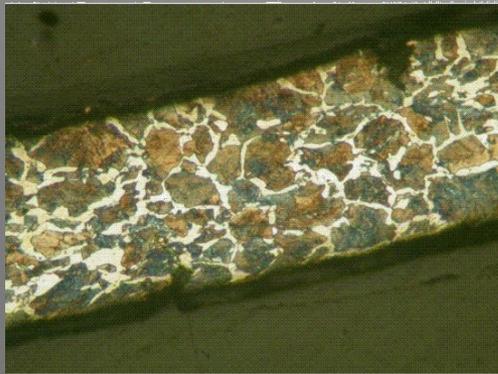
а



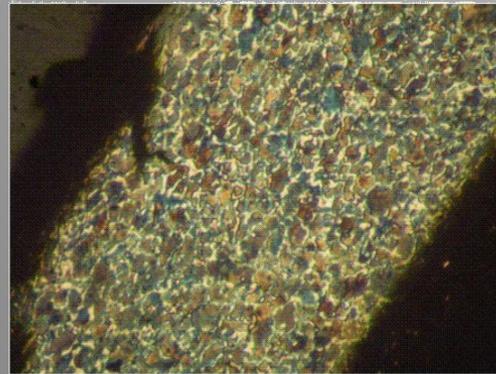
б



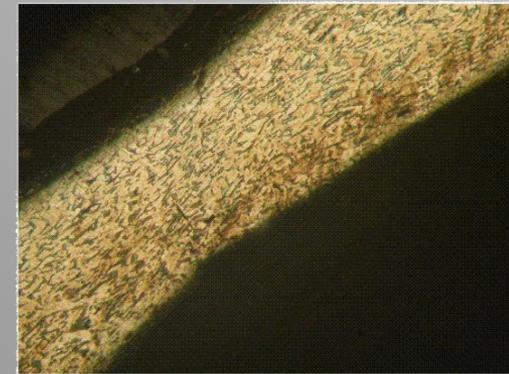
в



г



д



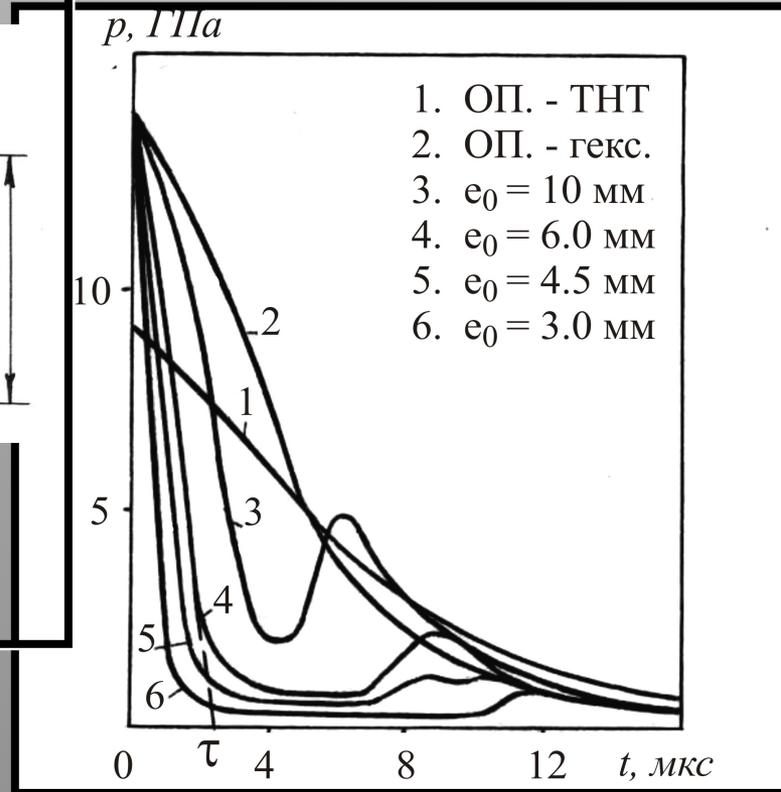
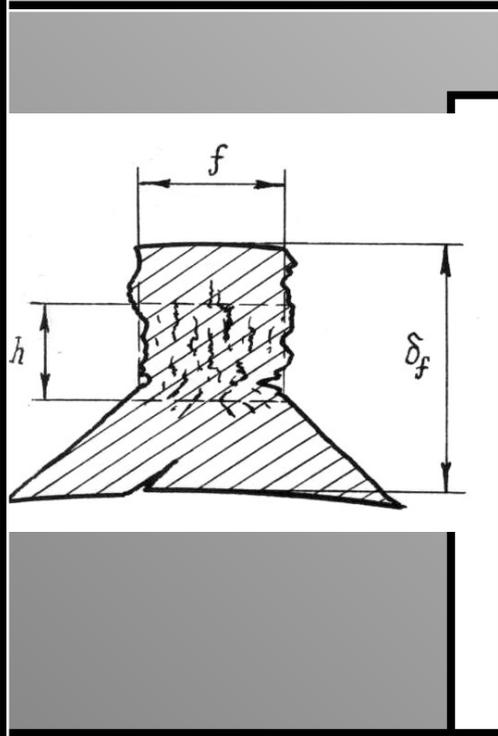
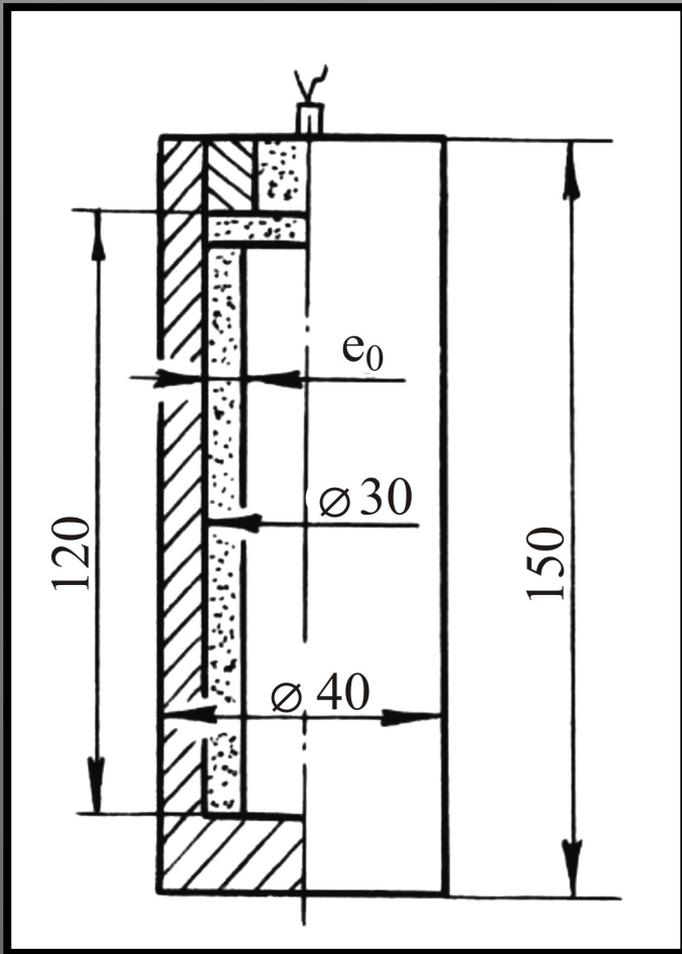
е

а-д – сталь 45, е – сталь 10;

толщина стенки: а,б,д,е – 1.0 мм, в – 0.5 мм, г – 0.2 мм;

заряд ВВ: а – гексоген ( $\rho_0=1.0$  г/см<sup>3</sup>,  $D=5600$  м/с), б – А-IX-1 ( $\rho_0=1.64$  г/см<sup>3</sup>,  $D=8300$  м/с), в,г – смесь гесогена с мипорой ( $\rho_0=0.5$  г/см<sup>3</sup>,  $D=4050$  м/с), д – смесь аммиачной селитры с алюминием ( $\rho_0=0.8$  г/см<sup>3</sup>,  $D=3030$  м/с), е – порох «Сокол» в режиме детонации ( $\rho_0=0.64$  г/см<sup>3</sup>,  $D=3450$  м/с)

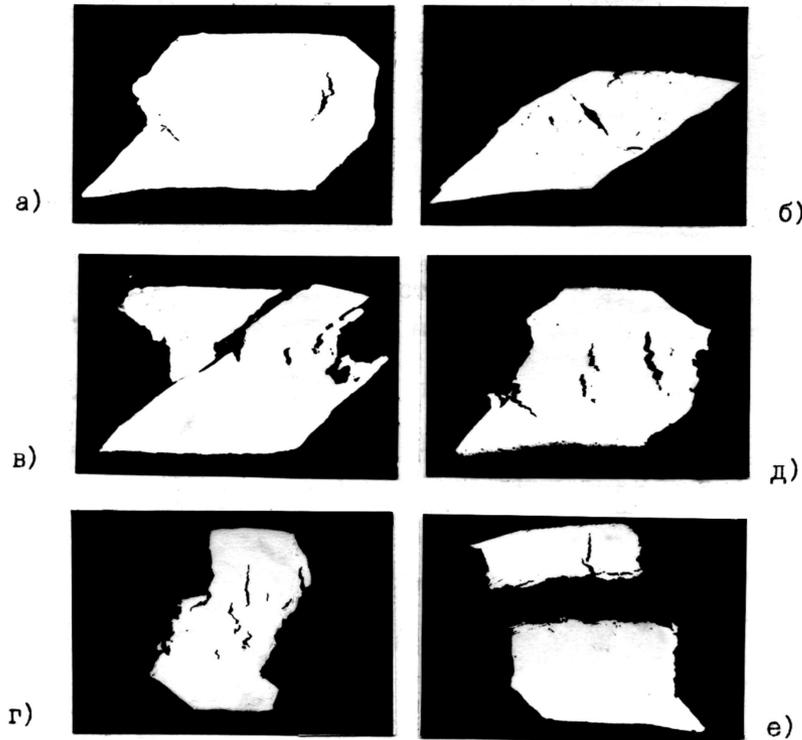
# Скользящий детонационный фронт. Полые заряды ВВ.



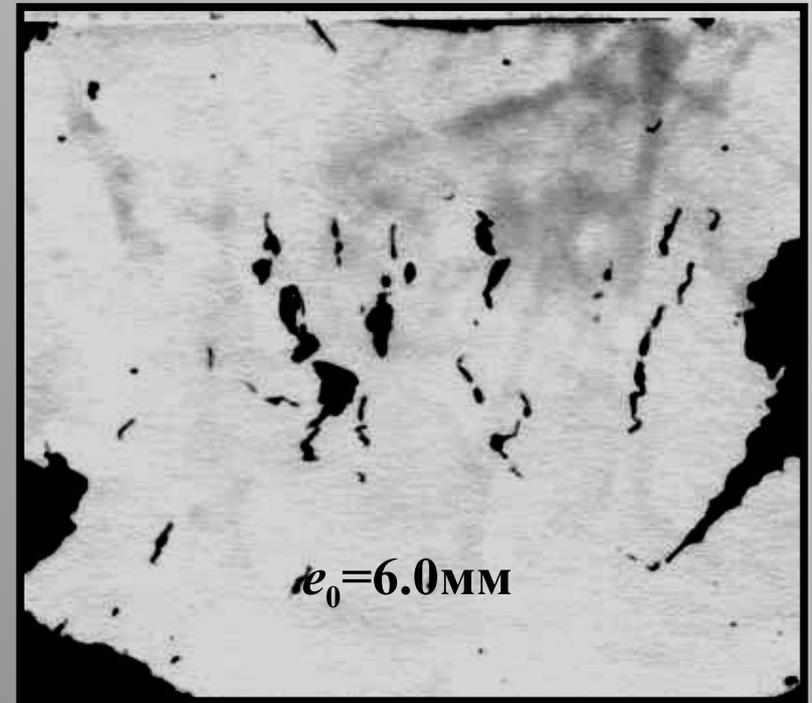
$$\frac{dp}{dt} = 1.5 \dots 8.5 \text{ ГПа} / \text{мкс}$$

# Скользящий детонационный фронт. Полые заряды ВВ.

Материал оболочки - сталь 60  
ВВ - флегм. гексоген



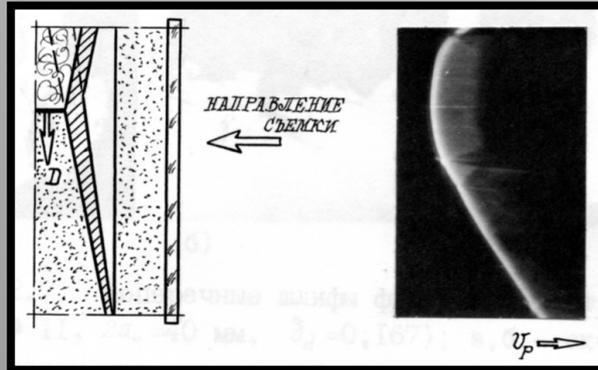
а – сплошной заряд, ТНТ;  
б – сплошной заряд А-IX-;  
в –  $e_0 = 10.0$  мм;  
г –  $e_0 = 6.0$  мм;  
д –  $e_0 = 4.5$  мм;  
е –  $e_0 = 3.0$  мм.



Откол возникает при толщине заряда  
 $e_0 = 3.0$  мм

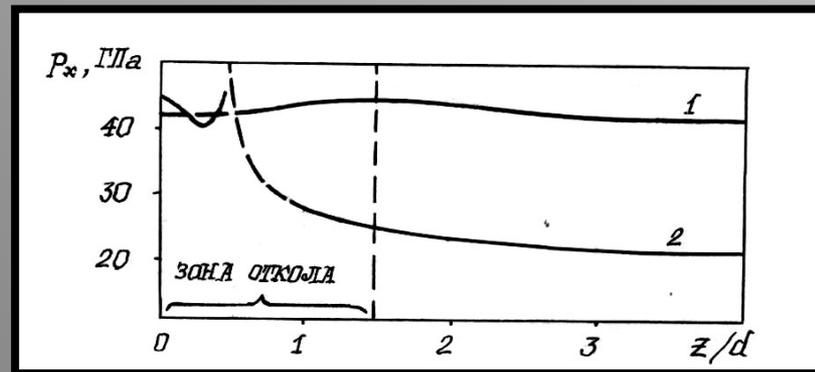
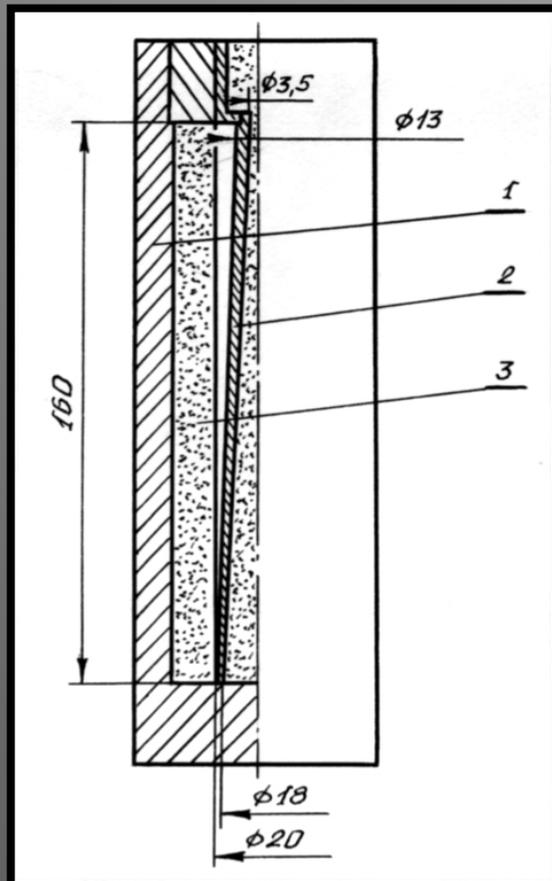
$$\frac{dp}{dt} = 8.5 \text{ ГПа} / \text{мкс}$$

# Падающий детонационный фронт.

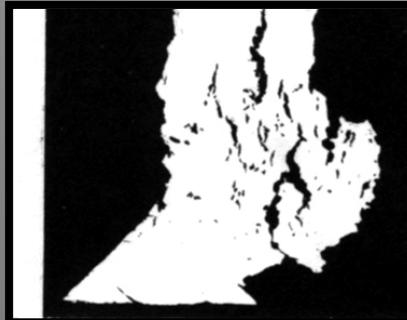


Щелевая съёмка  
детонационного  
фронта

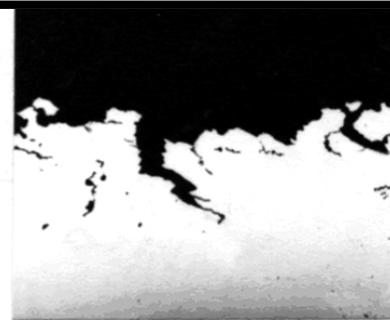
Макет с генератором  
цилиндрической волны



Распределение  
давления  
ударной волны  
по оси оболочки



Фрагмент  
головной зоны



Откольная  
поверхность



Фрагмент  
средней части

# Нагружение оболочки кольцевым ударником

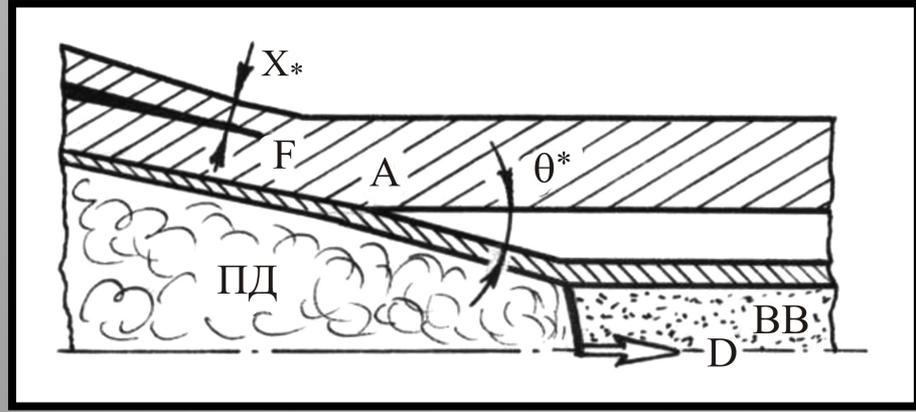
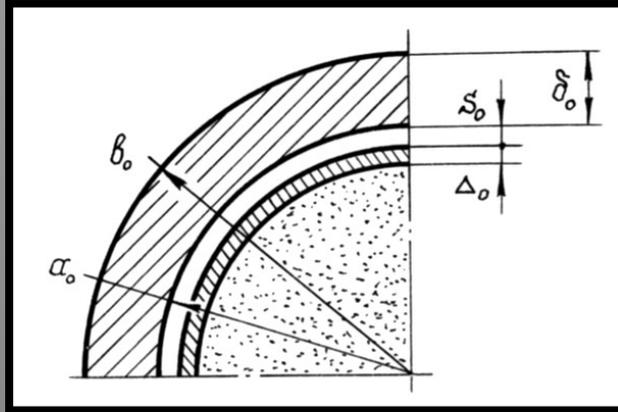
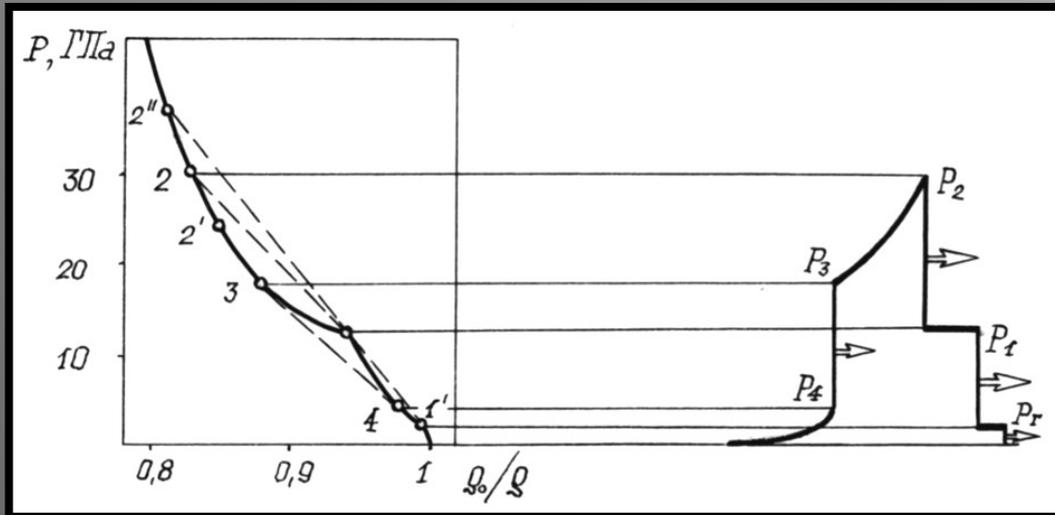


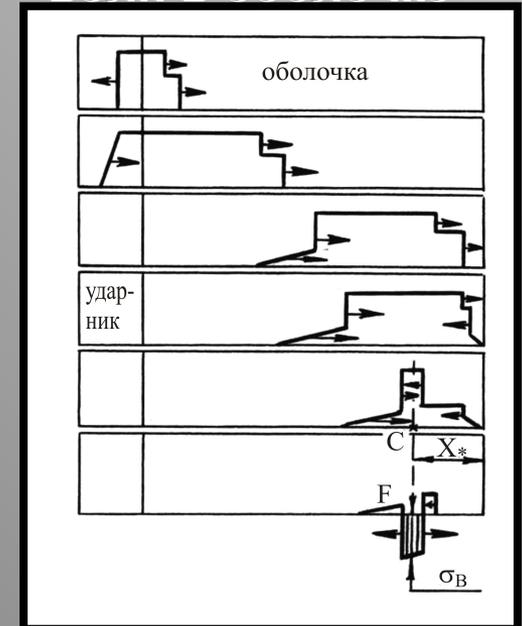
Схема оболочки с кольцевым ударником

## Структура ударной волны в оболочке



$$\frac{dp}{dt} = 25 \text{ ГПа} / \text{мкс}$$

## Взаимодействие падающей и отраженной волн в оболочке



# Нагружение оболочки кольцевым ударником

## Внешний вид откольных поверхностей

Стальные цилиндрические оболочки

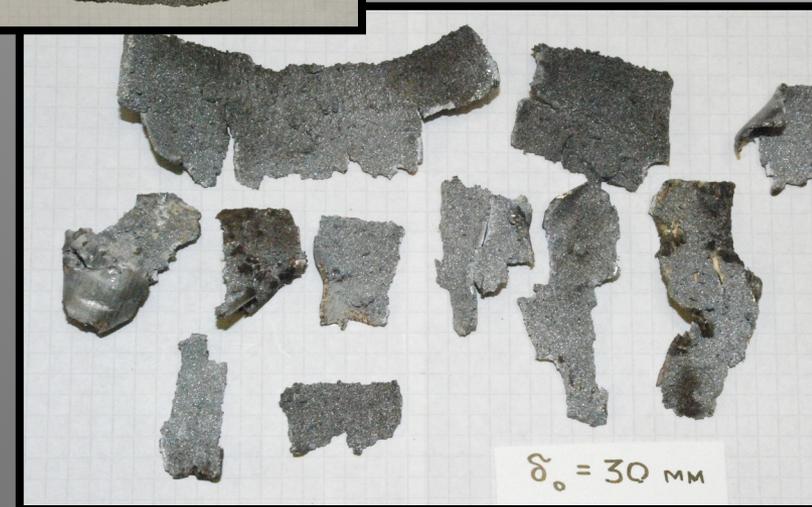
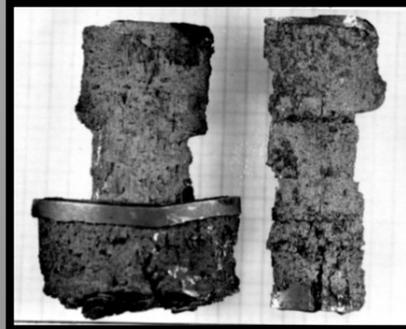
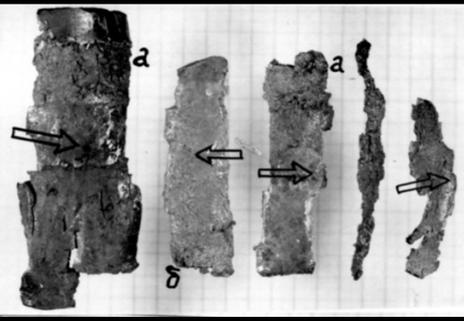
Профиль откольной поверхности



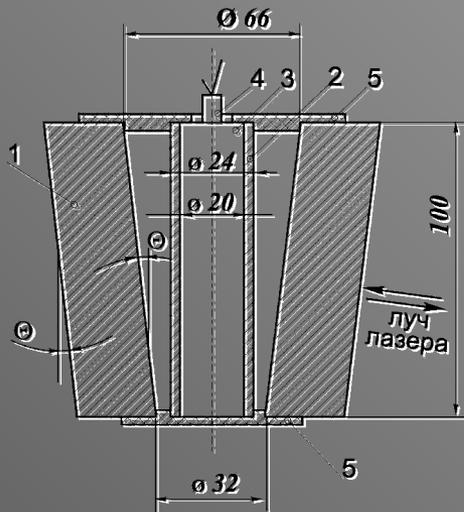
I - зона шероховатого откола  
II - зона откола переходного типа  
III - зона гладкого откола

Высота  
микронеровностей

зона I	> 50 мкм
зона II	15...20 мкм
зона III	<10 мкм

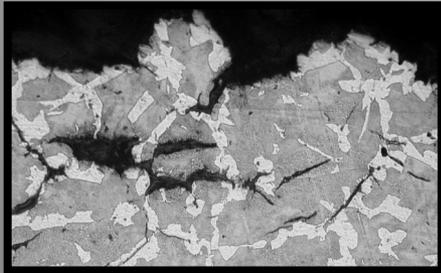


Стальные конические оболочки

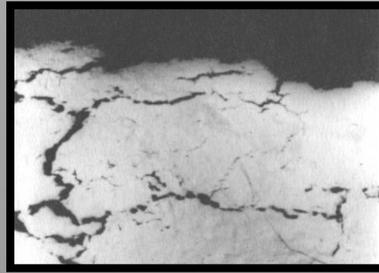


# Микрорельеф откольных поверхностей

## Шероховатый откол



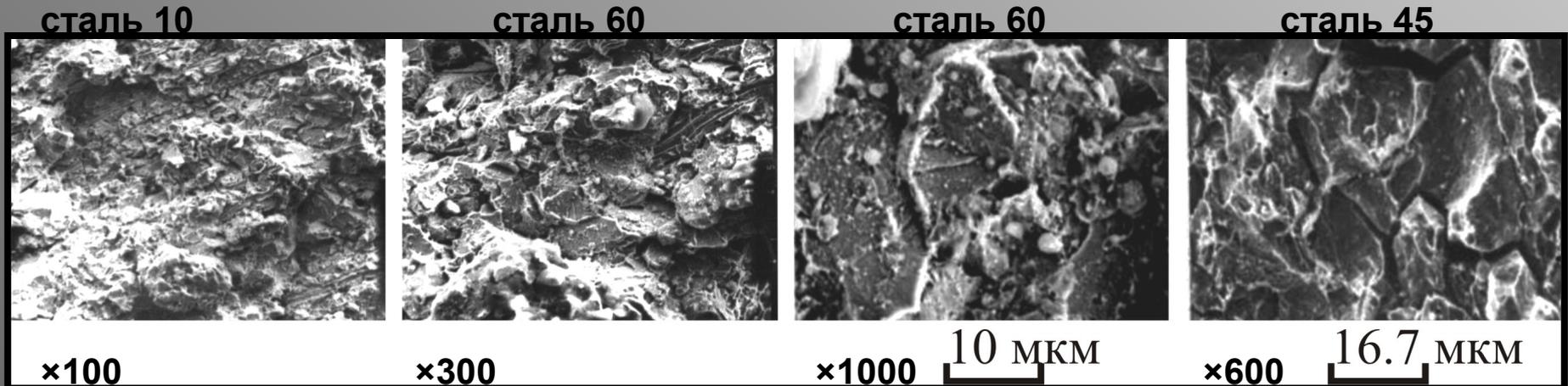
сталь 10



сталь 60



сталь 45



**Основной механизм разрушения  
внутри- и межзеренное растрескивание**

# Микрорельеф откольных поверхностей



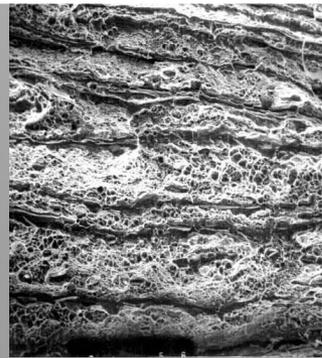
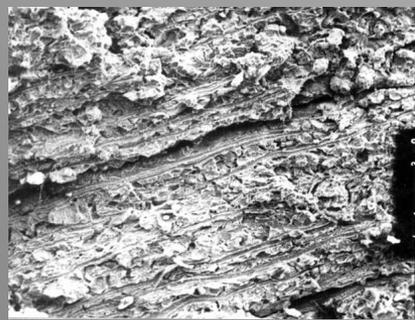
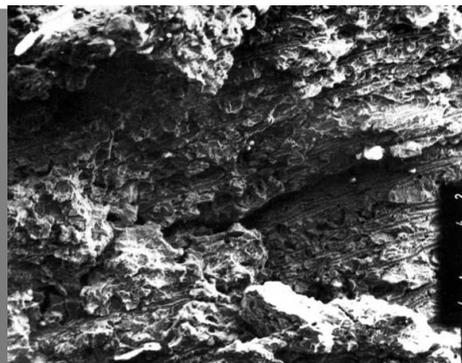
сталь 45



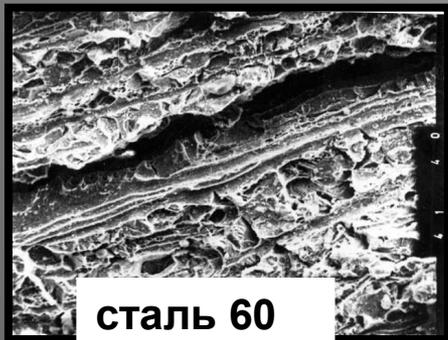
сталь 60

## Отколы переходного типа

Зона перехода шероховатого откола в откол переходного типа

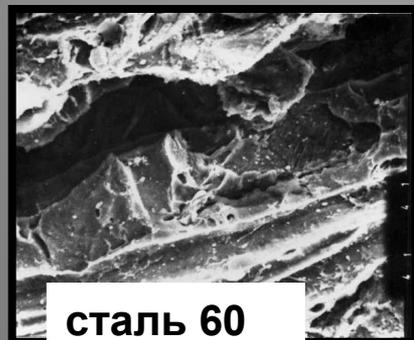


Зона перехода откола переходного типа в гладкий откол



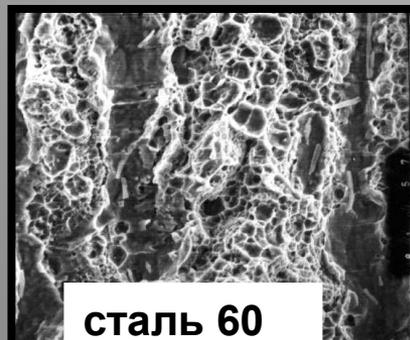
сталь 60

×300



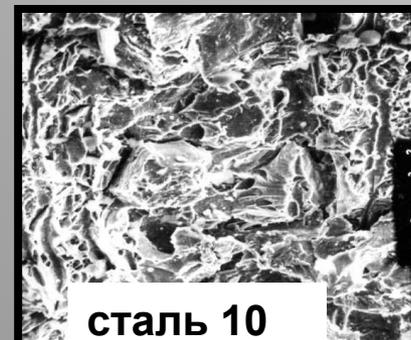
сталь 60

×1000



сталь 60

×1000

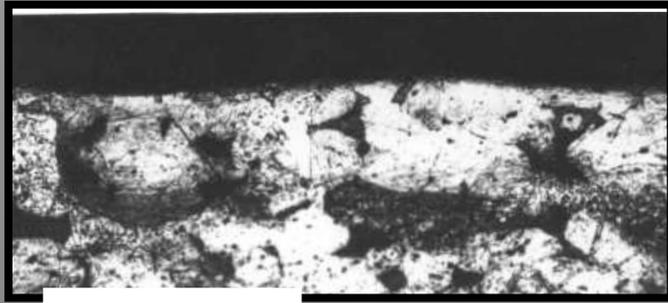


сталь 10

×500

Основной механизм разрушения  
вскрытие неметаллических включений с вязким разрушением  
промежуточных участков

# Микрорельеф откольных поверхностей



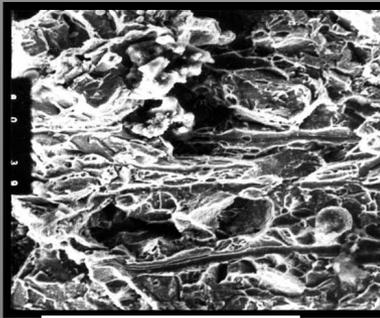
сталь 20

**Гладкие отколы.  
Малоуглеродистые стали.**



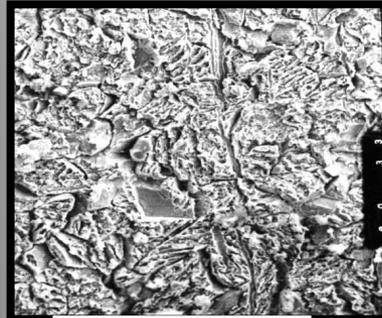
сталь 10

×500



сталь 10

×500



сталь 10

×300



сталь 10

×600

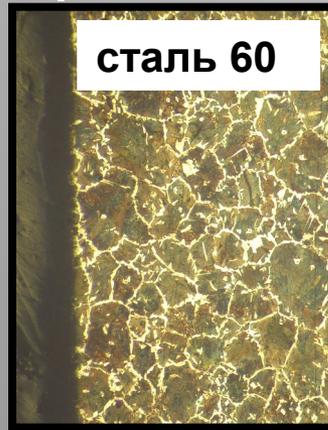
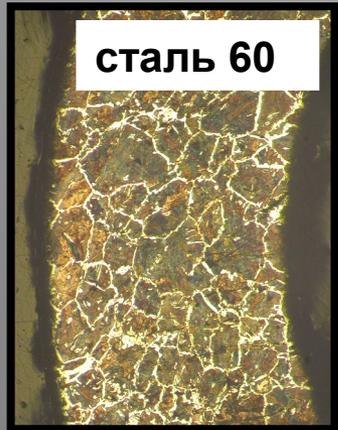


сталь 10

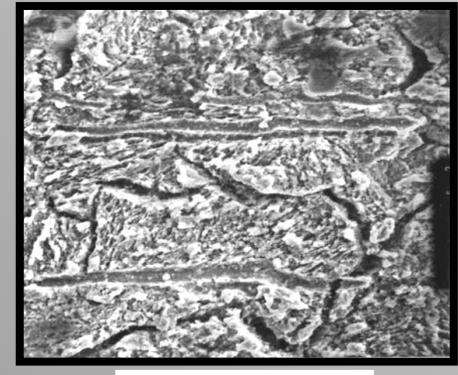
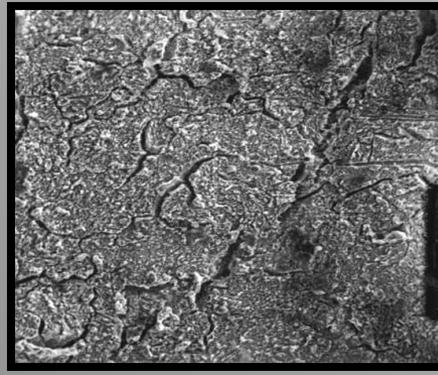
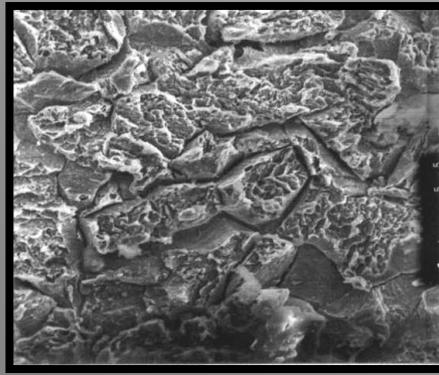
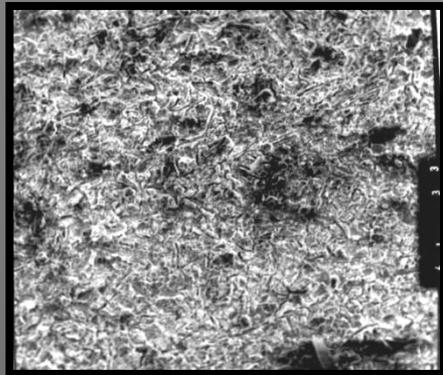
×1500

**Основной механизм разрушения  
сквозное разделение материала в узкой зоне (<10 мкм), как по  
границам, так и по телу зерен ("пакетного" типа)**

# Микрорельеф откольных поверхностей



Гладкие отколы.  
Среднеуглеродистые стали.

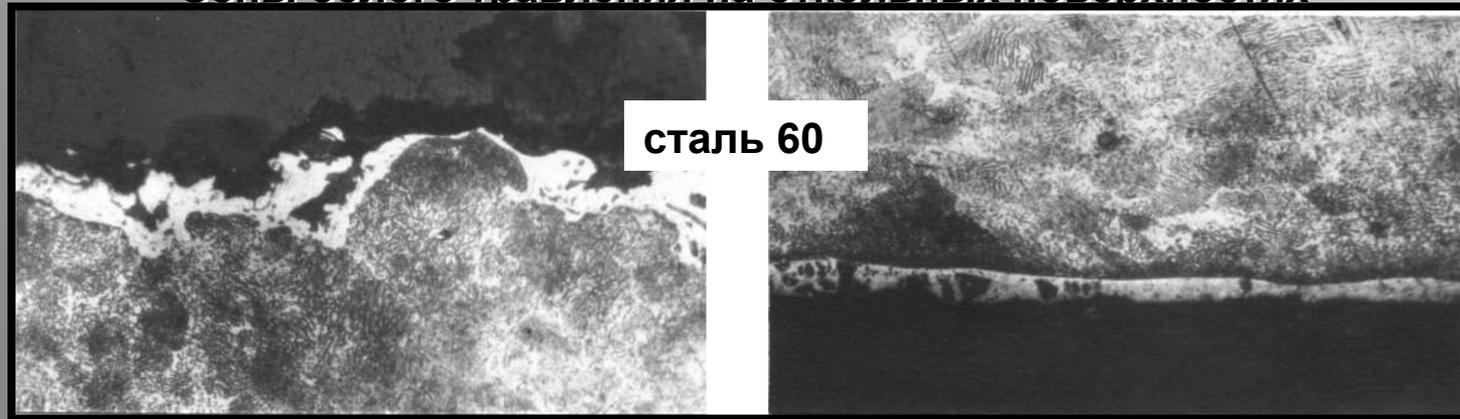


Основной механизм разрушения  
сквозное разделение материала в узкой зоне (<10 мкм), как по  
границам, так и по телу зерен ("пакетного" типа)

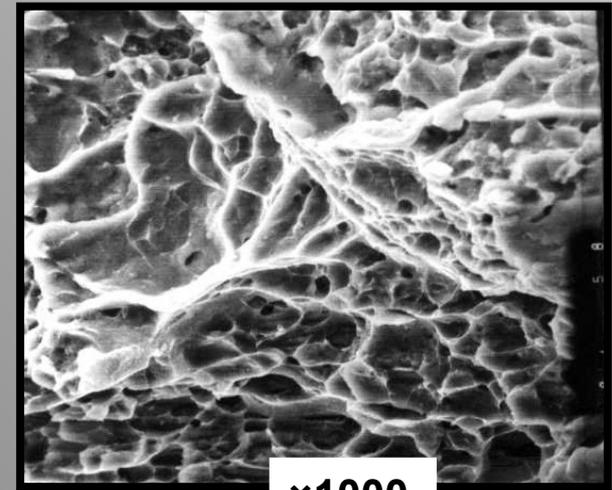
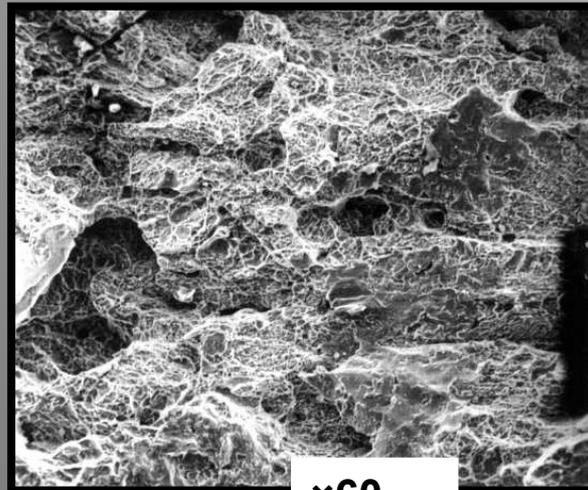
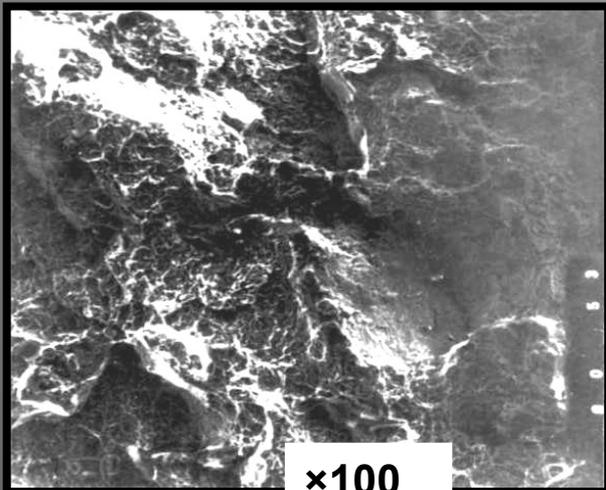
# Микрорельеф откольных поверхностей

## Особенности микрорельефа

Зоны белого травления на откольных поверхностях

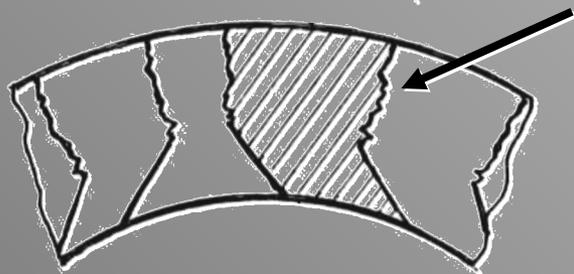


Шероховатые отколы в оболочках из титана (BT-6)

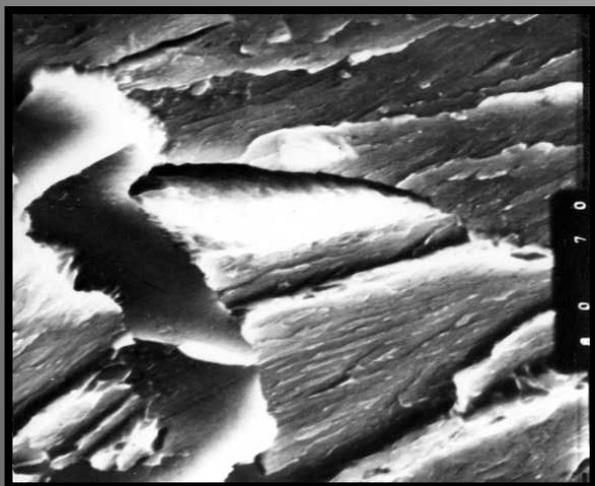


Основной механизм разрушения  
вязко-ямочный. Высота микронеровностей до 50 мкм.

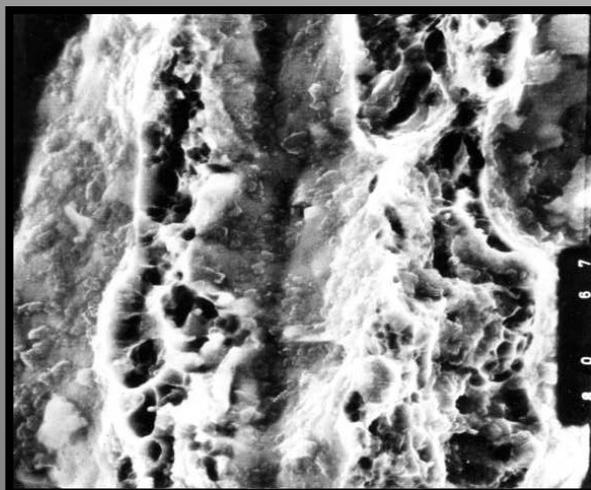
# Микрорельеф радиальной трещины на фрагментах оболочек



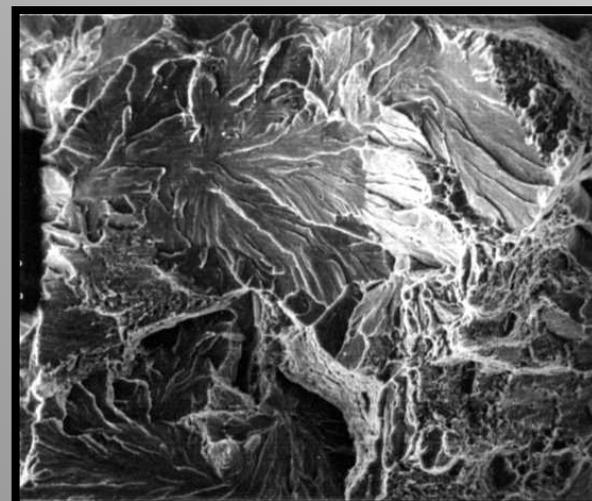
сталь 60



×5000



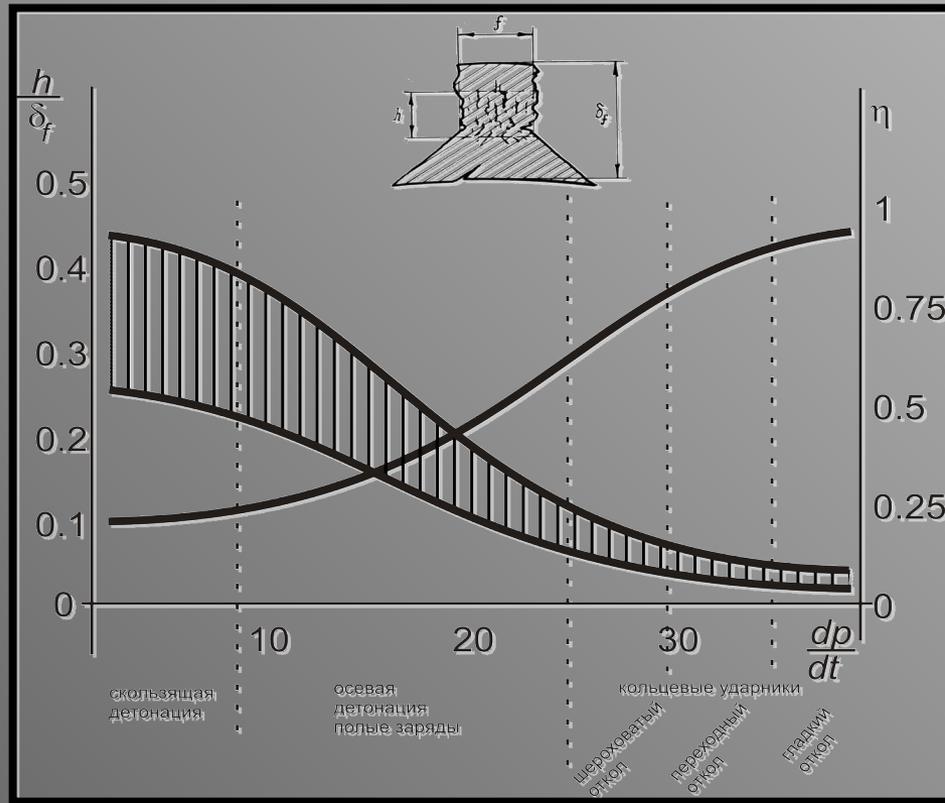
×1500



×500

Основной механизм разрушения в среднеуглеродистых сталях - хрупкое растрескивание зерен перлита с последующим вязким разрушением ферритных прослоек.

# Влияние параметров нагружения на характеристики микрорельефа откольных поверхностей



Микростроение изломов при разрушении откольного типа связано со скоростью деформации

- шероховатые отколы  $\dot{\epsilon} \approx 10^6 \text{ c}^{-1}$

- гладкие отколы  $\dot{\epsilon} \approx 10^8 \text{ c}^{-1}$

- радиально-отрывные трещины при разрушении оболочек  $\dot{\epsilon} \approx 10^4 \dots 10^5 \text{ c}^{-1}$

Размер зоны деструкции откольной природы с ростом  $dp/dt$  уменьшается, доля вязкой составляющей в изломах с ростом  $dp/dt$  - увеличивается.



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**