

# Учебная дисциплина «Импульсные технологии»

## Раздел III. Технологическое использование конденсированных ВВ.

Лекция 12. Взрывное компактирование порошков. Ударные волны в дисперсной среде и модели порошковой среды. Влияние экстремальных параметров (температуры, давления), малого времени воздействия и неравновесных условий на свойства получаемых взрывных компактов. Синтез новых соединений, зависимость свойств от концентрации компонентов, пористости, активации и газового состава. Области применения синтеза и компактирования порошков взрывом.

# Взрывное нагружение порошковых/пористых материалов (ВНПМ)

ВНПМ применяется в научных исследованиях и в практических приложениях в основном по двум причинам:

1) Довольно часто новые материалы получают порошка и возникает проблема получения объемного материала. Если получать материал плавлением, то можно растерять свойства, заложенные в частице (микроструктура, химический состав); плавлением невозможно получить некоторые композиционные материалы, состоящие из разнородных компонентов. Поэтому применяются методы порошковой металлургии, в т.ч. взрывное компактирование (ВК).

2) Ударно-волное сжатие позволяет создавать высокие давления и температуры в веществе в исследовательских целях для получения уравнений состояния, инициирования химических реакций, фазовых переходов и т.д.

# Ударно-волновое сжатие (компактирование)

Систематические исследования по взрывному компактированию порошков также начались в конце 40-х годов, хотя в D. Raybould упоминает, что еще в 1900г. этот способ использовали в карьерах для брикетирования руды перед транспортировкой. Наряду с терминами "взрывное компактирование" и «взрывное нагружение» иногда применяется "динамическое компактирование" и "динамическое нагружение". Последние два имеют более широкое толкование и означают, что импульсные высокие давления и ударные волны в порошковой среде могут создаваться не только с помощью конденсированных ВВ, но и с помощью, например, газовых и пороховых пушек, гидродинамических машин, магнито-импульсным способом и т.д. Характерной особенностью ВК является возбуждение ударных волн в веществе. Одним из пионеров взрывного компактирования является Ю.Н. Рябинин, проводивший опыты по сжатию различных веществ в цилиндрических ампулах

1) D.Raybould. The production of strong parts and non-equilibrium alloys by dynamic compaction // Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals. - Proceed. Int. Conf. held in Albuquerque, New Mexico, 1980. Edited by M.A.Meyers and L.E.Murr. New York: Plenum Press, 1981. P.895-911.

2) Рябинин Ю.Н. О некоторых опытах по динамическому сжатию вещества // ЖТФ. 1956. т.26, вып. 12. С.2661.

3) Рябинин Ю.Н. Сублимация кристаллической решетки под действием сильной ударной волны // ДАН. 1956. т. 109, № 2. С.289

# Ударно-волновой синтез и изменение структуры веществ

Благодаря тому, что из различных порошков путем смешивания можно изготавливать различные смеси ВНПМ спользуют для синтеза новых материалов. Новые соединения также можно получать и при нагружении монопорошков (порошок из одного материала со сложной химической формулой). Кроме того, ВНПМ может приводить к фазовым переходам или другим структурным изменениям (измельчение зерна, аморфизация и т.д.).

Примеры:

- Синтез  $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (высокотемпературный сверхпроводник) из смеси  $\text{BaO}_2 + \text{BaCuO}_2 + \text{Eu}_2\text{O}_3 + \text{CuO}$  (или  $\text{CuO}_2$ ). Другими способами получать соединение затруднительно.
- Синтез: получение из смесей соединений:  $5\text{Ti} + 3\text{Si} = \text{Ti}_5\text{Si}_3$ ;  $\text{Nb} + 2\text{Si} = \text{NbSi}_2$ ;  $\text{TiAl}_3$ ,  $\text{TiAl}$ ,  $\text{Ti}_3\text{Al}$ ,  $\text{Ni}_3\text{Al}$  и др.
- Фазовые переходы: получение кубического нитрида тантала из гексагонального ( $\text{TaN}$ ), получение кубического  $\text{BN}$  из гексагонального, получение алмаза из графита и т.д.

# Взрывное нагружение порошковых (пористых) материалов

Как правило, подвергаемый высокоэнергетическому импульсному воздействию порошок заключают в металлический контейнер (капсулу, ампулу, матрицу и т.д.) с тем, чтобы обеспечить сохранение получаемого компакта. Фактически импульс давления передается от источника энергии в порошок через стенки контейнера. Сам контейнер также может быть погружен в некую передающую среду (песок, вода и пр.).

Все используемые в практике динамического нагружения схемы можно разбить на три группы: а) схемы прямого нагружения; б) схемы с передающей средой; в) схемы с метанием. Мы рассматриваем случаи, когда источником энергии является конденсированное ВВ. В общем случае могут применяться и другие способы генерирования импульса давления. Например, метание пластины может осуществляться с помощью газовых или пороховых пушек, а нагружение контейнера через передающую среду (воду) может производиться в гидродинамических установках, где энергетическим веществом является порох.

## Схемы нагружения

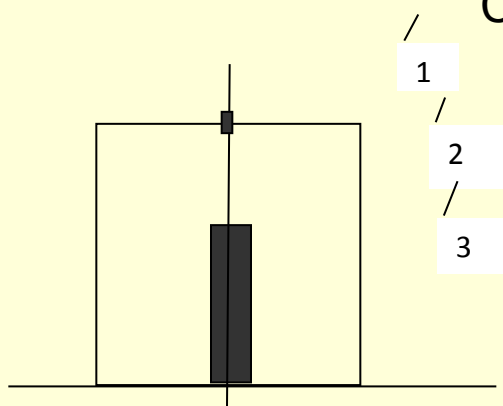


Схема прямого нагружения. 1-детонатор; 2-ВВ; 3-контейнер.

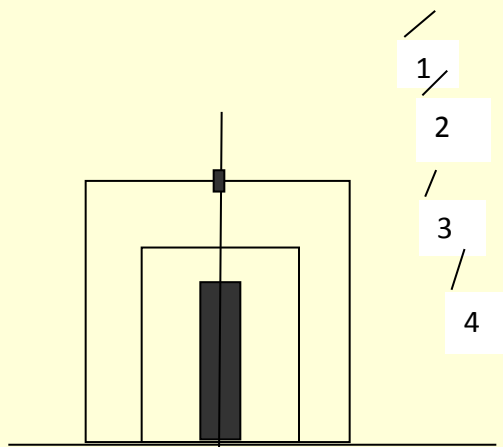


Схема с передающей средой. 1-детонатор; 2-ВВ; 3-передающая среда; 4-контейнер

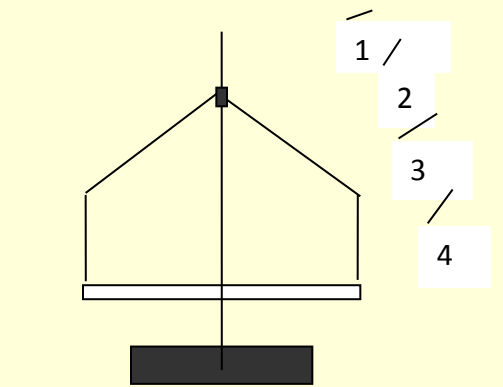
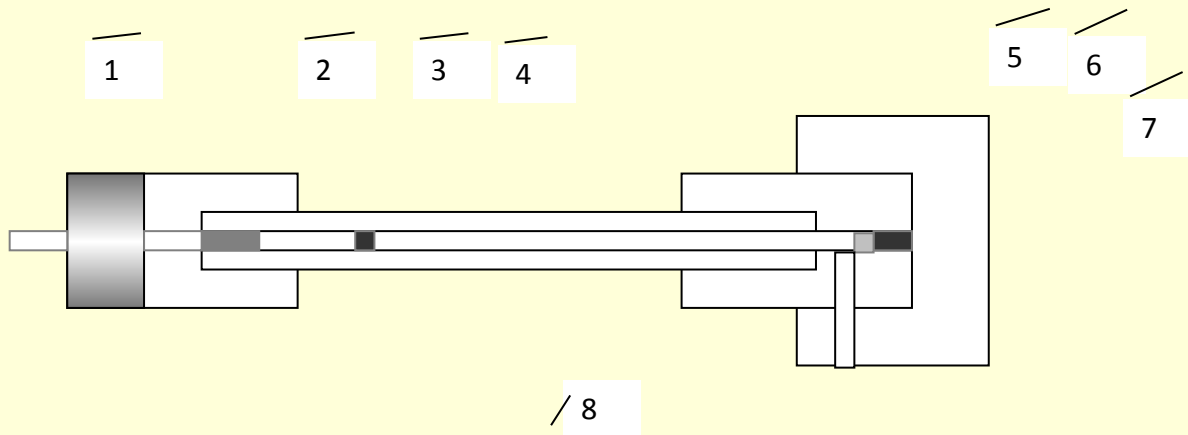


Схема с метанием.  
1-детонатор; 2-ВВ; 3-метаемая пластина;  
4-контейнер

## Баллистический пресс (не прямое нагружение)



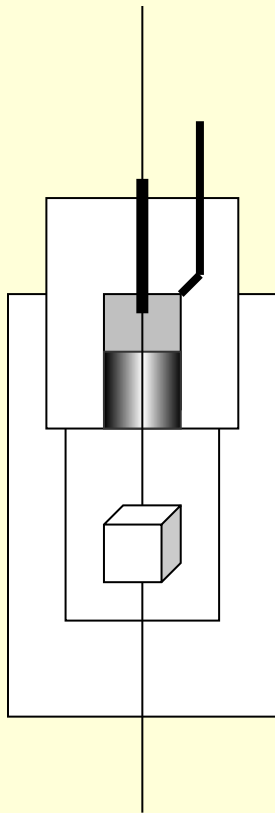
**Пример применения:** получение букв для полиграфической печати из порошка инструментальной стали (1.5% С, 12.5% W, 4.8% Cr, 5.1% Co).  
Источник:  
Кононенко В.Г. Кузнечно-штамповочное производство. 1961. № 7. Стр. 4-7.

1- устройство поджига; 2- пороховой заряд; 3- ударник; 4- ствол; 5- пуансон; 6- порошок; 7- матрица; 8- отверстие для отвода воздуха.

Давление в порошке достигает 5 GPa; длительность импульса до 0.01 s; масса ударника 1.96-2.45 kg; скорость ударника 5-300m/s; длина ствола около 1500 mm. В промышленных приложениях скорость ударника обычно не превышает 100 m/s, т.к. при более высок4их скоростях значительно снижается срок службы инструмента. Кроме того, возникает схватывание прессовки с матрицей. В основном технология используется в научных экспериментах и при изготовлнении небольших изделий.

# Гидродинамический пресс (не прямое нагружение)

Токоввод для инициирования; 2- клапан сброса давления; 3- пороховой заряд; 4- пуансон; 5- порошок (в чехле); 6- жидкость. Давление в жидкости достигает 0.35-0.42 ГПа в [1] и 0.7 ГПа в [2,3]. Порошок обычно помещается в резиновый чехол.



1

2

3

4

5

6

**Примеры применения:** производство фильтров (порошки титана и нержавеющей стали), металлургических тиглей и черпаков (керамические порошки). Компакты имеют пористость 35-40% и их прочность достаточна для транспортировки в печь для дальнейшего спекания.

Ссылки:

1) McKenna, Redmond, and Smith. Device for underwater powder compaction with the use of gunpowder. US Patent 2648125. August, 1953.

2) Афанасьев Л.Н., Витязь П.А., Роман О.В. Порошковая металлургия. Минск, 1966. Стр. 169-177.

3) Roman O.V., and Gorobtsov V.G. Fundamentals of explosive compaction of powders // Shock Waves and High-Strain-Rate phenomena in Metals (Proceed. of Int. Conf. held in 1980 in Albuquerque, NM, USA). Edited by M.A. Meyers and L.E. Murr. New York, Plenum Press, 1981. P. 829-841.



# Импульсный характер нагружения

Общим для всех схем нагружения является то, что на стенку контейнера (пуансон) воздействует некоторое переменное давление  $p(t)$ , причем импульс давления, т.е. интеграл от давления по времени, конечен. Наибольшие пиковые давления (сотни тысяч и миллионы атмосфер) получают по схеме с метанием. Её недостатком является резкая разгрузка с большими растягивающими напряжениями, что часто приводит к разрушению компакта. Схема с передающей средой, напротив, обеспечивает "мягкое" нагружение. Например, гидродинамические установки позволяют получать в образцах давление до 0,8 ГПа с медленным его ростом и спадом. В практике нагружения порошков взрывом наиболее часто применяется схема прямого нагружения. Она позволяет варьированием типа ВВ и соотношения масс ВВ, стенок контейнера и порошка в широких пределах изменять параметры нагружения.

# Генерация ударной волны в порошке

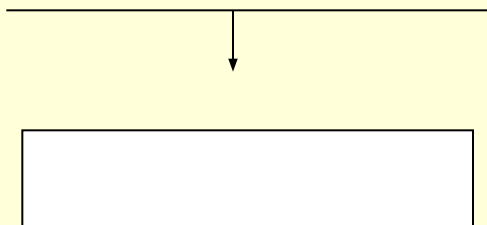
В отличие от статических и квазистатических методов прессования, когда давление в среде повышается постепенно, за счет пробегов акустических волн, нагружение пористого вещества с применением ВВ является ударно-волновым. Оболочка контейнера при этом играет роль несжимаемого поршня, разгоняемого продуктами детонации (ПД) и сжимающего порошок. Будем описывать свойства ВВ его плотностью  $\rho_e$ , скоростью детонации  $D_H$  и показателем политропы продуктов детонации  $\gamma$ . Давлением детонации будем называть давление в плоскости Чепмена-Жуге  $p_H = \rho_e D_H^2 / (\gamma + 1)$ . Профиль давления на стенке контейнера в общем случае зависит от угла падения ДВ на нее. Рассмотрим наиболее частые случаи взрывного нагружения.

Особенности ударно-волнового нагружения:

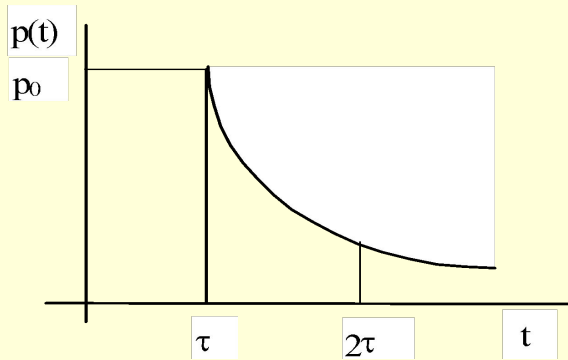
- локализация деформации в поверхностных слоях частиц в сильных УВ;
- сильный нагрев и быстрое охлаждение (поверхностных слоев частиц);
- высокие массовые скорости вещества;
- неоднородности, возникающие вследствие взаимодействия и отражения УВ;
- действие, обычно отрицательное, волн разгрузки

# Одномерный разлет продуктов детонации

ДВ падает на абсолютно жесткую стенку



ДВ падает нормально на несжимаемую стенку



Профиль давления.  
 $\tau = l/D_H$ ,  $p_0 = 64p_H/27$ ;  $p(t=2\tau) = 8p_H/27$ .  
Показатель адиабаты ПД  $\gamma = 3$

$$p(t) = \frac{64}{27} p_H \left( \frac{\tau}{t} \right)^3 \approx 2.37 p_H \left( \frac{\tau}{t} \right)^3 = p_0 \left( \frac{\tau}{t} \right)^3$$

# Одномерный разлет продуктов детонации

ДВ падает на абсолютно жесткую стенку

Проинтегрировав функцию давления от времени получим полный удельный импульс давления (для одномерного разлета ПД,  $\gamma = 3$ );  $m_e$  - масса ВВ на единицу площади

$$J = \frac{8}{27} m_e D_H \approx 0.3 m_e D_H$$

Пиковое давление на стенке слабо зависит от  $\gamma$ . Решение задачи об отражении падающей на абсолютно жесткую стенку сильной ДВ (Ландау, Лифшиц) дает

$$\frac{p_0}{p_H} = \frac{5\gamma + 1 + \sqrt{17\gamma^2 + 2\gamma + 1}}{4\gamma}$$

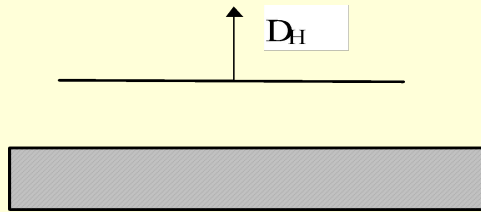
## Нормальное падение ДВ на жесткую стенку

Отношение  $p_0 / p_H$  почти не зависит от  $\gamma$ , меняясь от 2,6 до 2,3 при изменении  $\gamma$  от 1 до  $\infty$ . В частности,  $p_0 / p_H = 2.40, 2.41$  и  $2.43$  для  $\gamma = 2.8$  (гексоген),  $2.5$  (аммонит) и  $2.2$  (смесь АС-1/1) соответственно. Округляя до десятых долей получим, что **для всех ВВ пиковое давление можно оценивать как**

$$p_0 = 2,4 p_H$$

Таким образом, при нормальном падении ДВ на жесткую стенку для всех ВВ для оценки импульса давления можно пользоваться формулой, полученной для  $\gamma = 3$

# ДВ отходит нормально от жесткой стенки



В [Ландау, Лифшиц] решена задача о распространении ДВ по трубе от закрытого ее конца. Для сильной ДВ скорость звука у стенки (закрытого конца трубы) в покоящихся ПД есть  $c = D_H / 2$  для любого  $\gamma$ . Отсюда следует, что давление на стенке

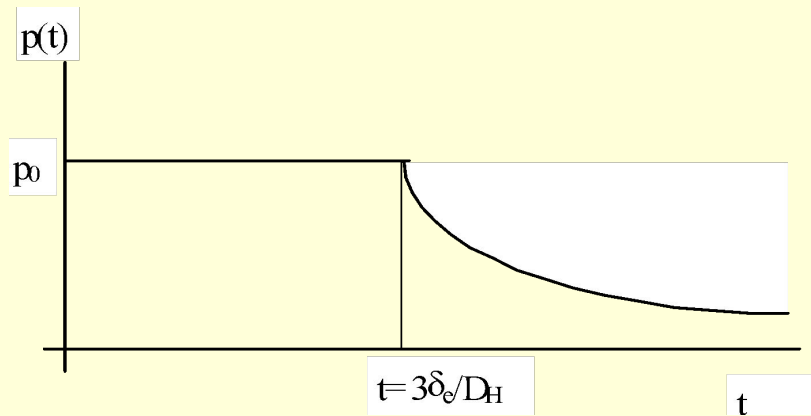
$$p_0 = p_H \left( \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}}$$

Расчеты по этой формуле дают  $p_0/p_H = 0.296, 0.299, 0.305, 0.311$  для  $\gamma=3; 2,8$  (гексоген); 2,5 (аммонит 6ЖВ); 2,2 (АС-1/1) соответственно. Округляя до десятых долей можно для всех типов ВВ оценивать начальное давление на стенке по формуле

$$p_0 = 0.3 p_H$$

# ДВ отходит нормально от жесткой стенки

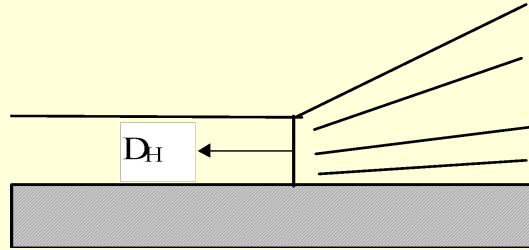
Численные расчеты показывают, что для отходящей от стенки ДВ профиль давления имеет вид, показанный на рисунке



Профиль давления для отходящей от стенки ДВ

Импульсы практически одинаковы для падающей и отходящей ДВ. Разница составляет  $\sim 5\%$ . Это позволяет сделать вывод, что для одномерного разлета ПД импульс не зависит от места инициирования. Профиль же давления и максимальное давление на стенке, напротив, существенно зависит от способа инициирования.

# Скользящая детонация



Пиковое давление равно давлению детонации  $p_0 = p_H$ , а профиль давления достаточно хорошо описывается экспонентой

$$p(t) = p_0 \exp(-t / t_1)$$

Удельный импульс

$$J = \frac{\pi}{5.42} \left( \sqrt{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}} - 1 \right) m_e D_H = k(\gamma) m_e D_H$$

$k(\gamma) = 0.24; 0.26; 0.31$  и  $0.37$  для  $\gamma = 3; 2,8; 2,5$  и  $2,2$  соответственно

Из экспоненциального профиля следует, что полный импульс равен  $J = p_H \cdot t_1$ . Отсюда получаем

$$t_1 = (\gamma + 1) k(\gamma) \frac{\delta_e}{D_H}$$

Для перечисленных  $\gamma$  можно оценивать  $t_1$  по формуле

$$t_1 \approx \frac{\delta_e}{D_H}$$

- 1) А.А. Штерцер. Определение параметров прессования пористых тел зарядом ВВ через металлическую пластину // ФГВ. 1982, т. 18, №1, с. 141-143
- 2) А.А. Штерцер. Взрывное компактирование порошковых материалов // Дисс. докт. физ-мат наук.- Новосибирск, 1999
- 3) В.В.Пай, Кузьмин Г.Е., Яковлев И.В. Приближенная оценка параметров нагружения в композиционных материалах для случая сильных ударных волн // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 3. С.134-138



# Ударно-волновая картина при нагружении порошка скользящей детонационной волной через металлическую пластину

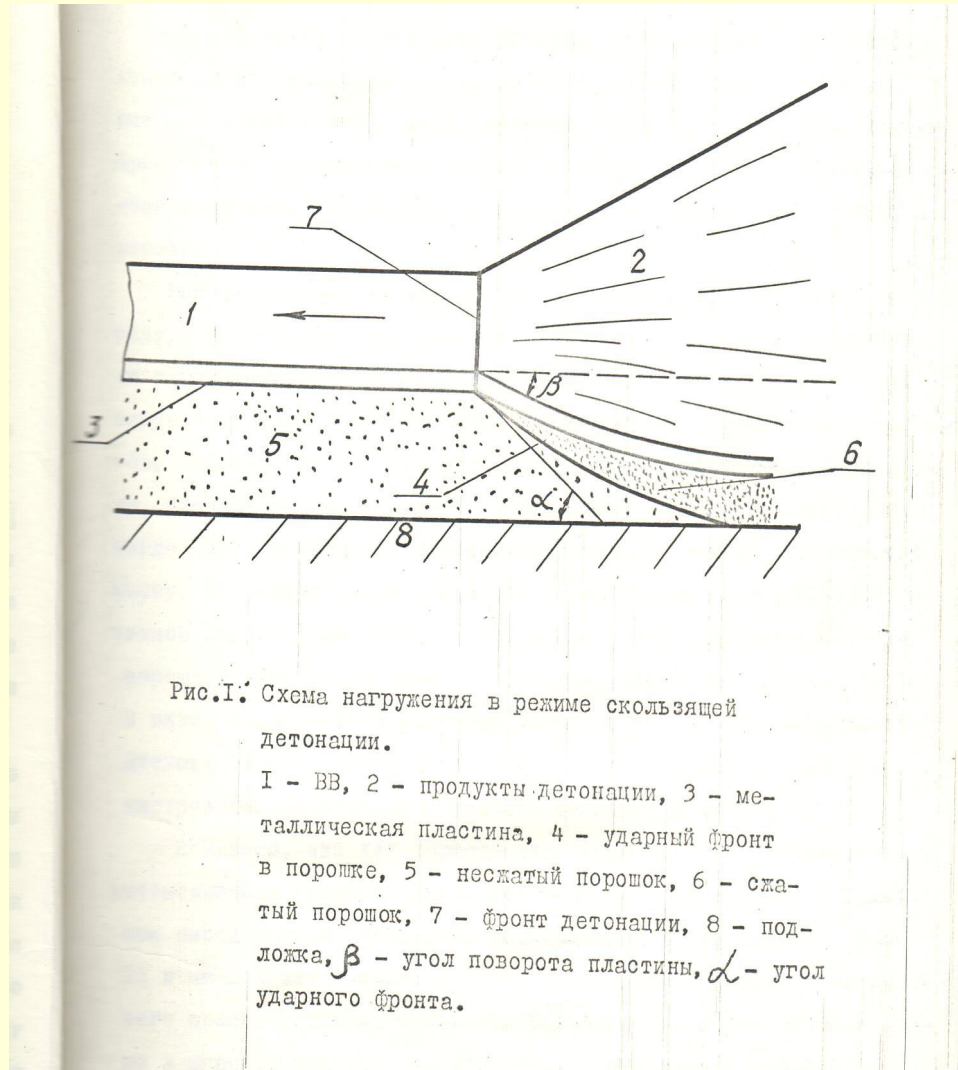


Рис.1. Схема нагружения в режиме скользящей детонации.

1 - ВВ, 2 - продукты детонации, 3 - металлическая пластина, 4 - ударный фронт в порошке, 5 - несжатый порошок, 6 - сжатый порошок, 7 - фронт детонации, 8 - подложка,  $\beta$  - угол поворота пластины,  $\alpha$  - угол ударного фронта.

## Фиксация УВ в порошке методом импульсной рентгенографии

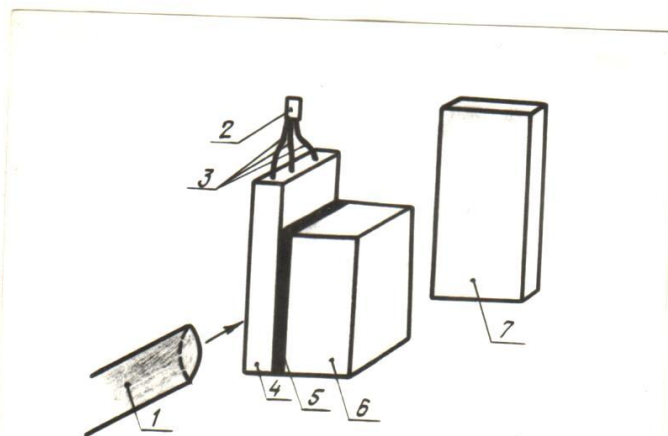
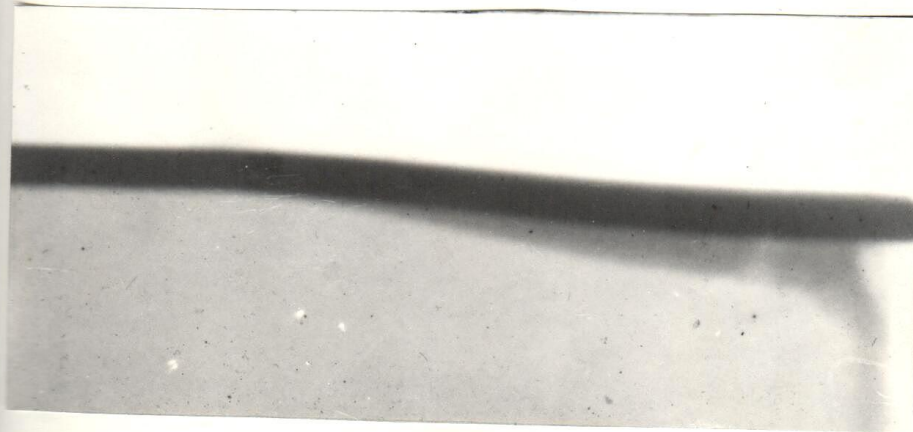


Рис.32. Схема экспериментов по импульсному рентгенографированию процесса нагружения порошка.

1 - рентгеновская трубка, 2 - электродетонатор,  
3 - детонирующий шнур, 4 - ВВ, 5 - пластина,  
6 - порошок, 7 - кассета с рентгеновской пленкой.



а)



б)

Рис.33. Рентгенограммы нагружения порошка алюминия  
слоем аммонита № 6ЛВ толщиной 20 мм через  
стальную пластину толщиной а - 2 мм,  
б - 5 мм.

Снимки, получаемые  
методом импульсной  
рентгенографии

# Ударная волна в порошке

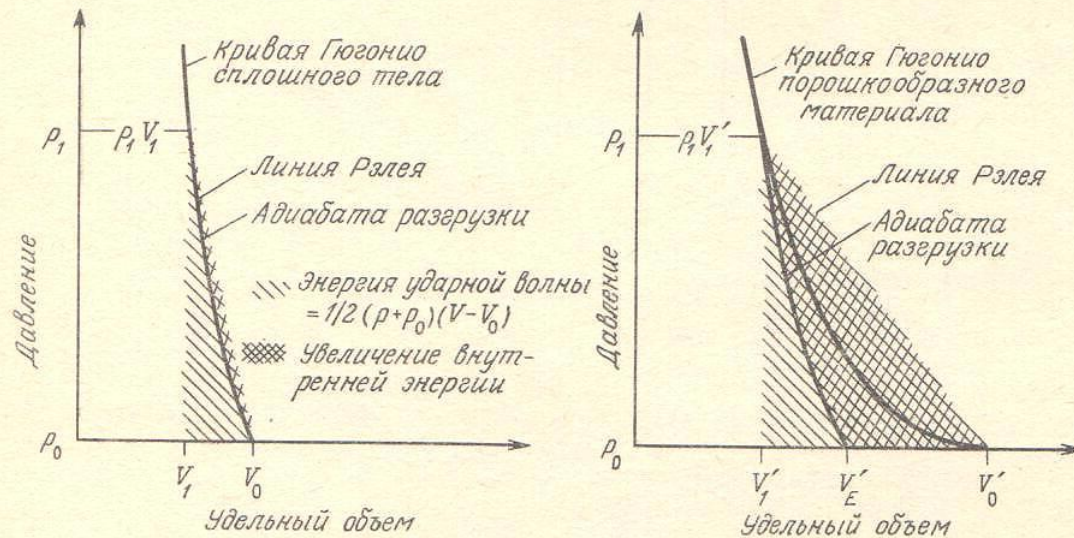


Рис. 4.4. Кривые Гюгонио для порошкообразных и пористых материалов в сравнении с данными для сплошных тел.

Адиабаты сжатия и разгрузки сплошного и пористого тела

# Соотношения на фронте УВ в порошке

Из закона сохранения массы  $\rho_0 U = \rho(U - u)$

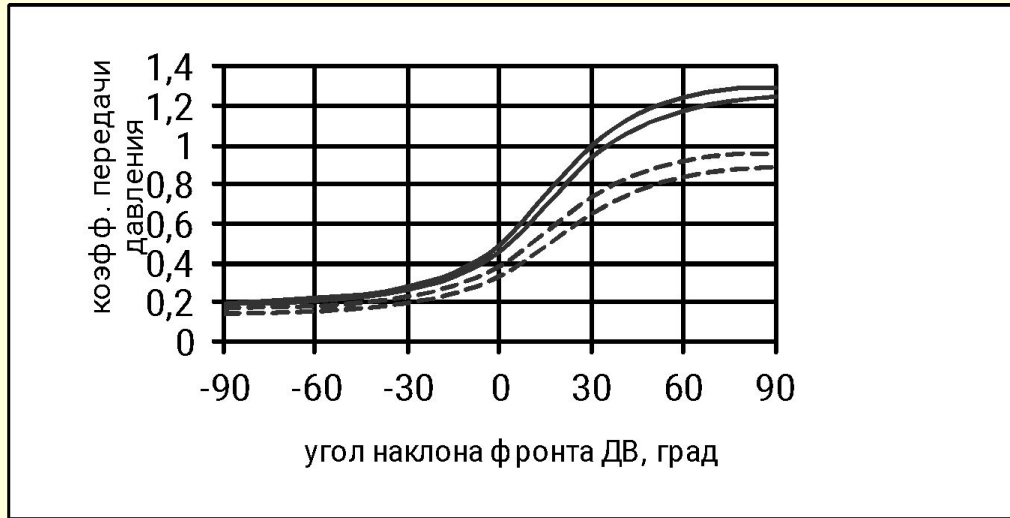
или  $u = U \left( 1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right)$

Из закона сохранения импульса  $p - p_0 = \rho_0 U u$

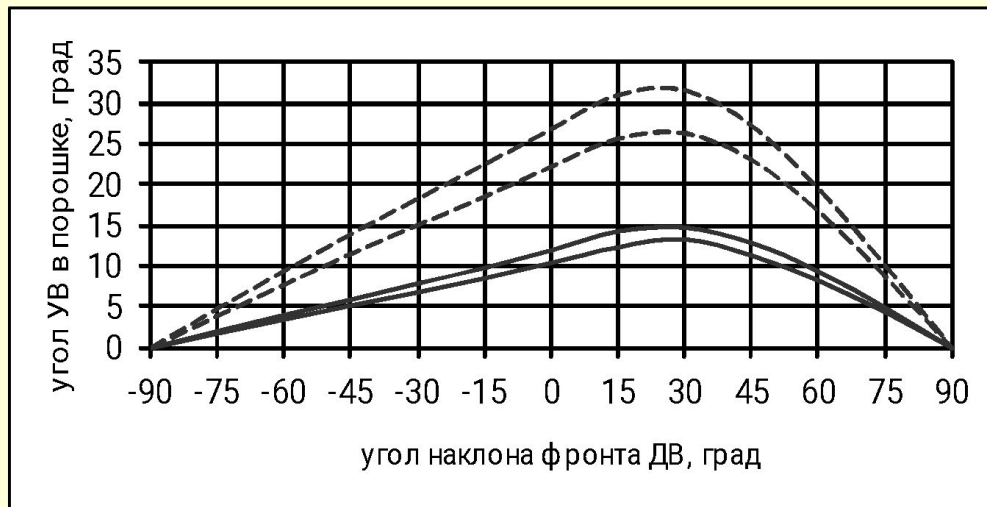
Из закона сохранения энергии  $E - E_0 = \frac{(p + p_0)(V_0 - V)}{2}$

Измерив два параметра, можно найти остальные три. Если известна ударная адиабата пористого тела, по одному заданному параметру можно найти все остальные.

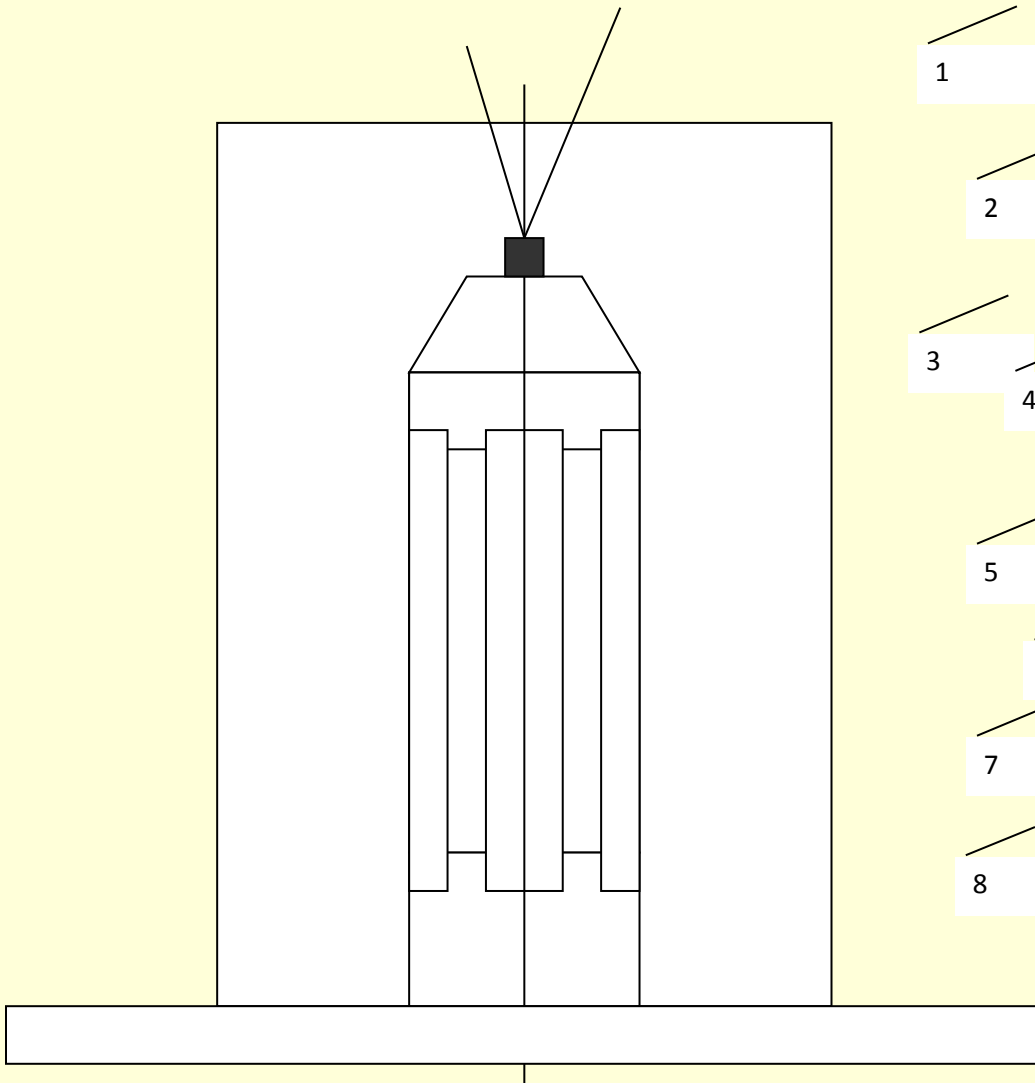
## Зависимость параметров УВ от угла падения ДВ на порошок



Кэффициент передачи давления  $q = p/p_n$  (а) и угла наклона УВ в порошке (б) в зависимости от угла падения ДВ на порошок. Сплошные линии-расчеты для порошка вольфрама ( $\rho_{00} = 5,4 \text{ г/см}^3$ ), пунктирные – для порошка алюминия ( $\rho_{00} = 1,35 \text{ г/см}^3$ ). Выше проходят линии, соответствующие нагружению смесью АС-1/1, ниже – гексогеном.



# Получение трубчатых компактов



1

2

3

4

5

6

7

8

1) детонатор; 2) верхняя пробка 3) центральный стержень; 4) труба; 5) порошок; 6) ВВ; 7) нижняя пробка; 8) основание

Обжатие цилиндрической ампулы. Сборка перед подрывом.

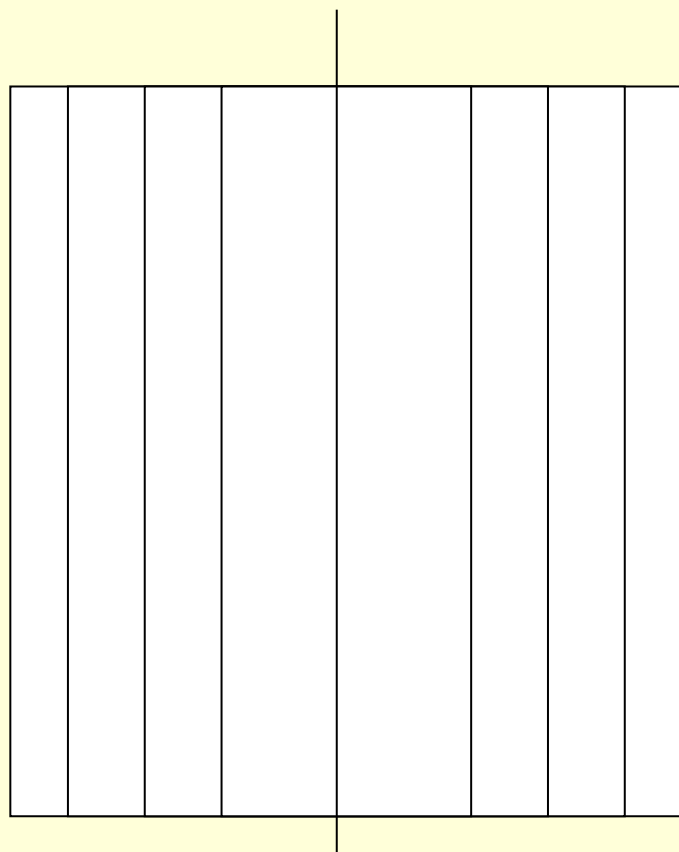




Ампула (контейнер) после взрывного обжатия



# Электроизолирующая втулка для электрометаллургического оборудования



1

1) metal; 2) ceramics.

Ceramics: **composition of  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $MgO$ ,  $AlN$  etc.**

Performance data (for the components made for Norilsk mining and smelting plant):  
**mechanical load up to 20 t; voltage 2 kV; electric resistance not less than 1 M $\Omega$  (at voltage 100 V); life time 10 times greater than that of mica insulator.**

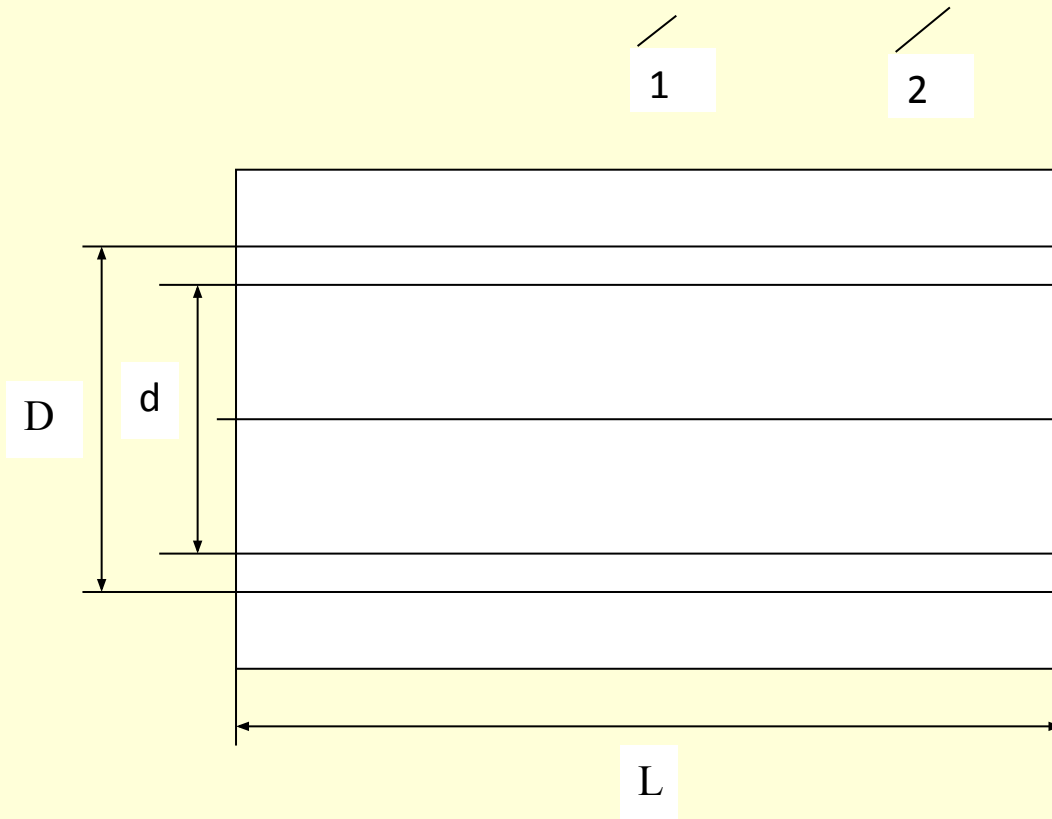
2

**Manufacturing operations:** explosive compacting – heat treatment – machining.

1

Re.: **Матыцин А.И., Мали В.И. Изготовление высокотемпературных металлокерамических изоляторов для цветной металлургии // Сб. "Обработка материалов импульсными нагрузками", г. Новосибирск: СКБ ГИТ СО РАН СССР, 1990. С. 103-109.**

# Уплотнительная втулка для газовой турбины



## SEALING BUSH FOR A GAS TURBINE

1) stainless steel; 2) cermet coating (nichrome + g-BN);

**Dimensions:**  $D$  – up to 80 mm;  $d$  – up to 75 mm;  $L$  – up to 250 mm;

cermet layer thickness 2-3 mm.

**Performance data (BN percentage 6% wt.):** operating temperature up to  $850^{\circ}\text{C}$ ; porosity 5%; hardness 52 HB; shear strength not less than 100 Mpa; rider slip velocity up to 80 m/sec.

**Manufacturing operations:** explosive compacting – sintering – machining.

**Re.:** Штерцер А.А. Взрывное компактирование порошковых материалов. Дисс. докт. физ.-мат. наук. Новосибирск, 1999г.

(Shtertser A.A. Explosive compaction of powder materials. Thesis for a Doctor's degree. Novosibirsk, 1999)

Покрyтия из кермета нихром + BN  
(применяются в изготовлении уплотнительных элементов  
газотурбинных двигателей)



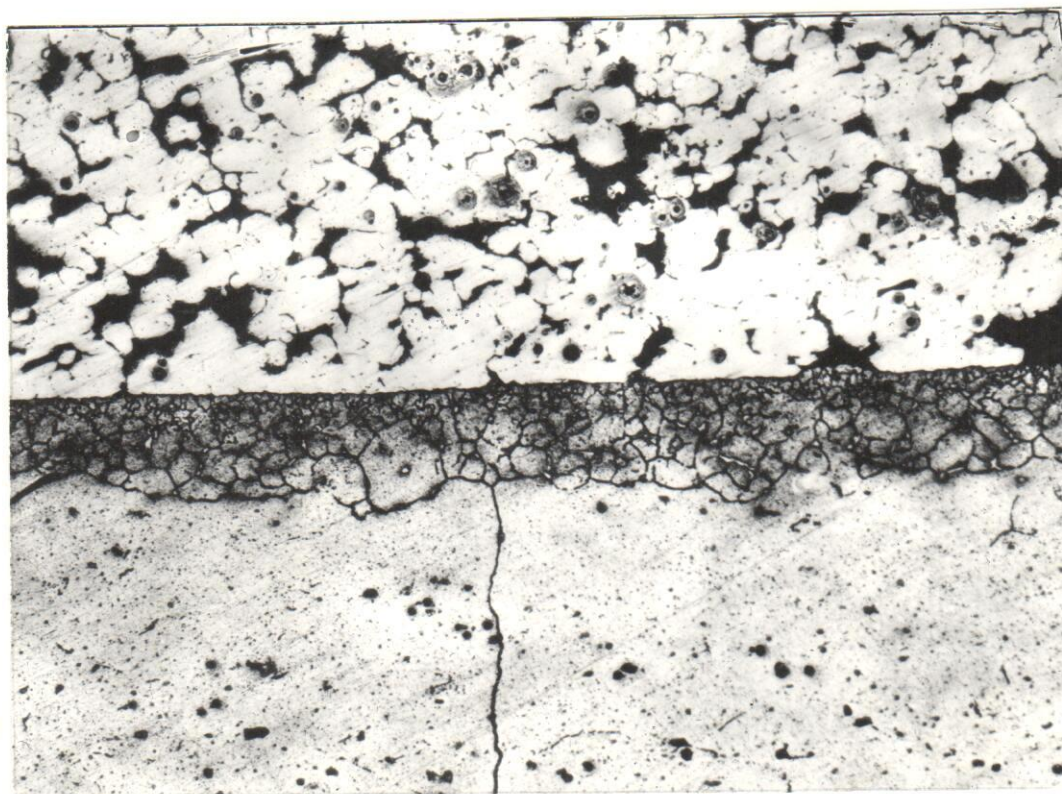
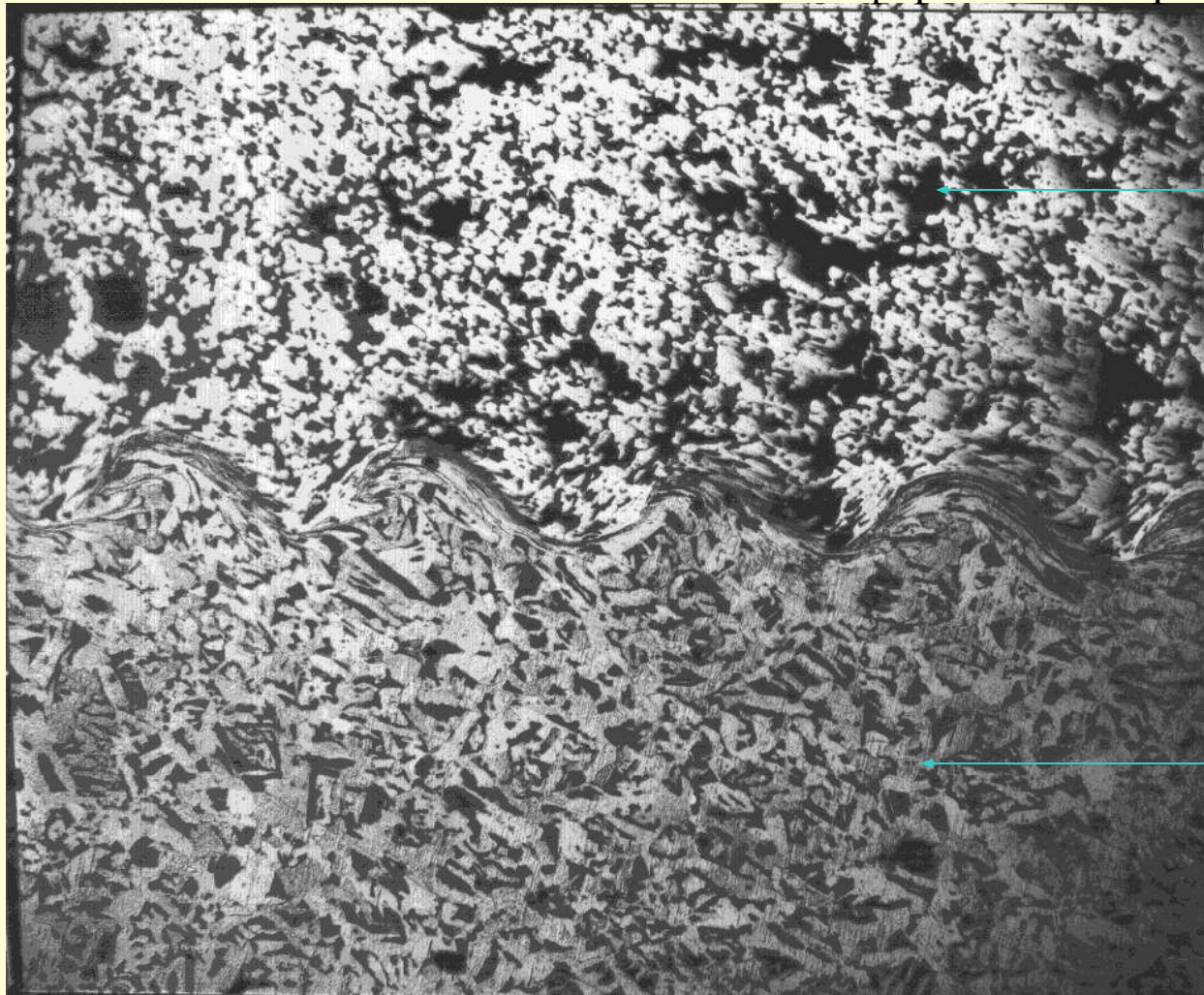


Рис. 51. Микроструктура зоны соединения покрытия  
нихром + *BN* с подложкой 12X18Ni0T7  
Увеличение 150.

Полученный взрывом плоский компакт нихром + VN  
сваркой взрывом нанесен на стальное основание



## Локализация деформации в окрестности зоны сварки



Cr20Ni80 + g-BN

Stainless Steel

0.3 mm

### Прямая сварка кермета со сталью

Re: А.А. Штерцер. Взрывное компактирование порошковых материалов // Докторская диссертация, 1999

Полученная горячей прокаткой лента нихром + ВН  
сваркой взрывом нанесена на стальное основание





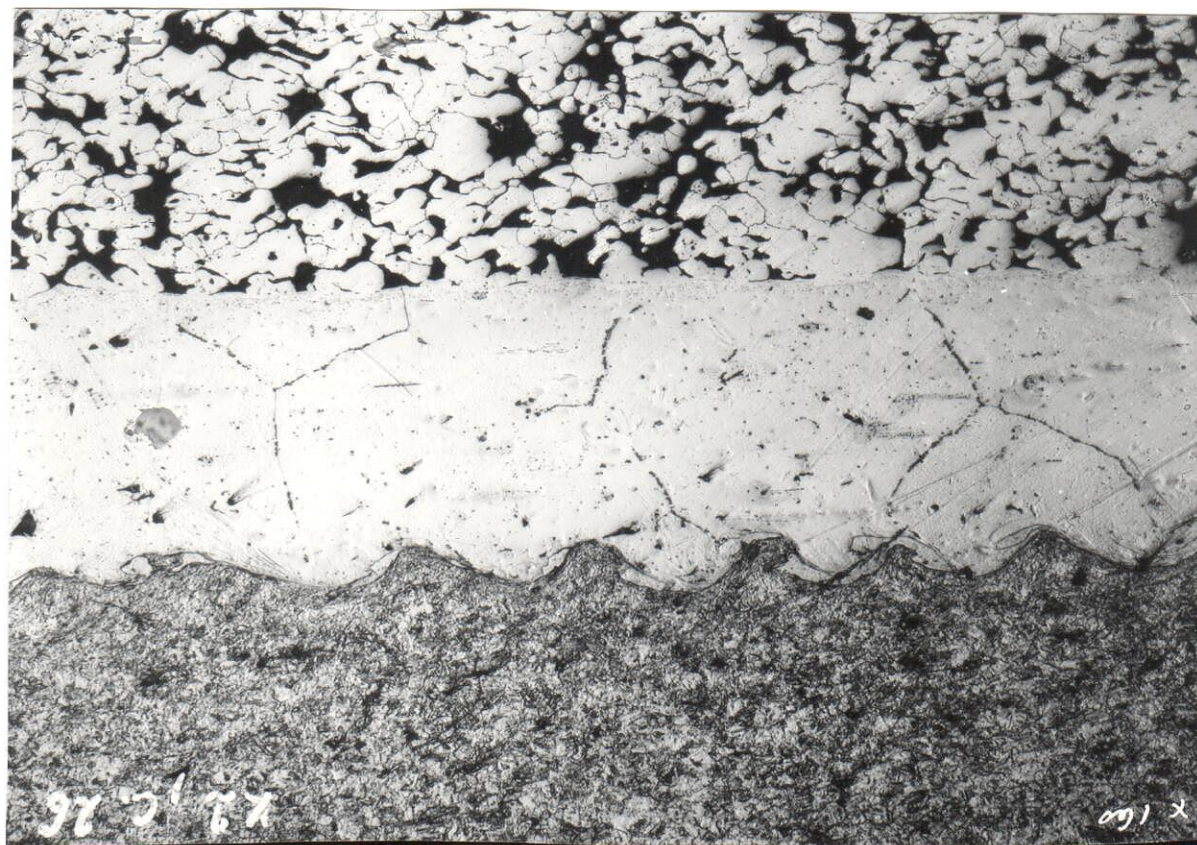
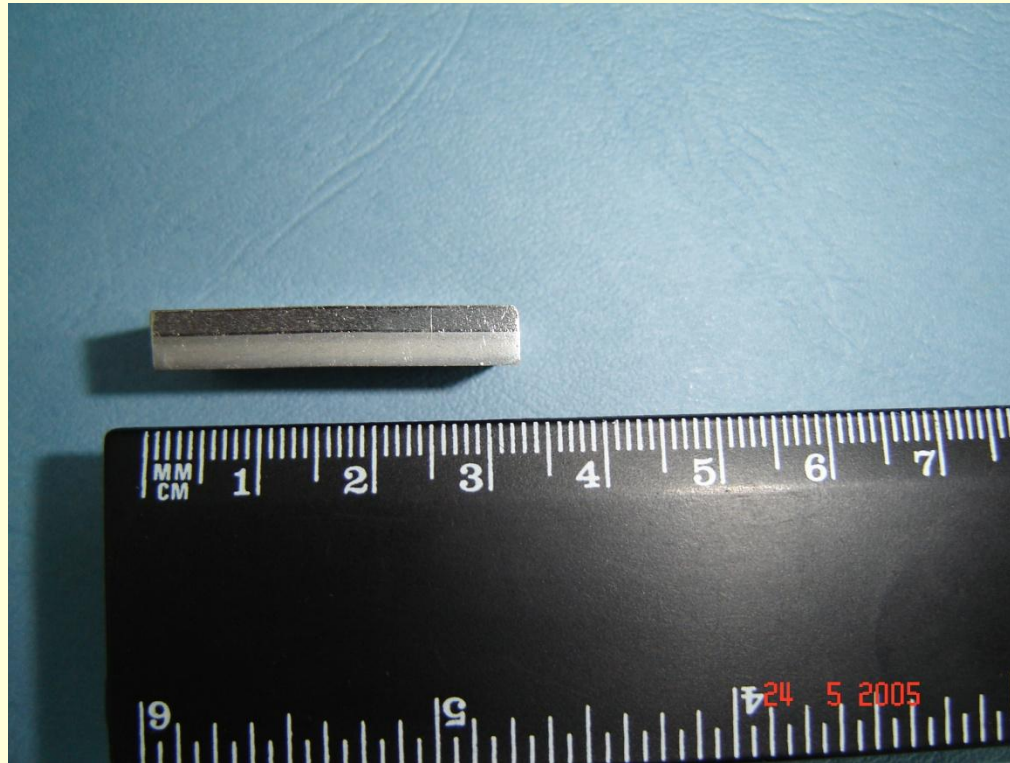
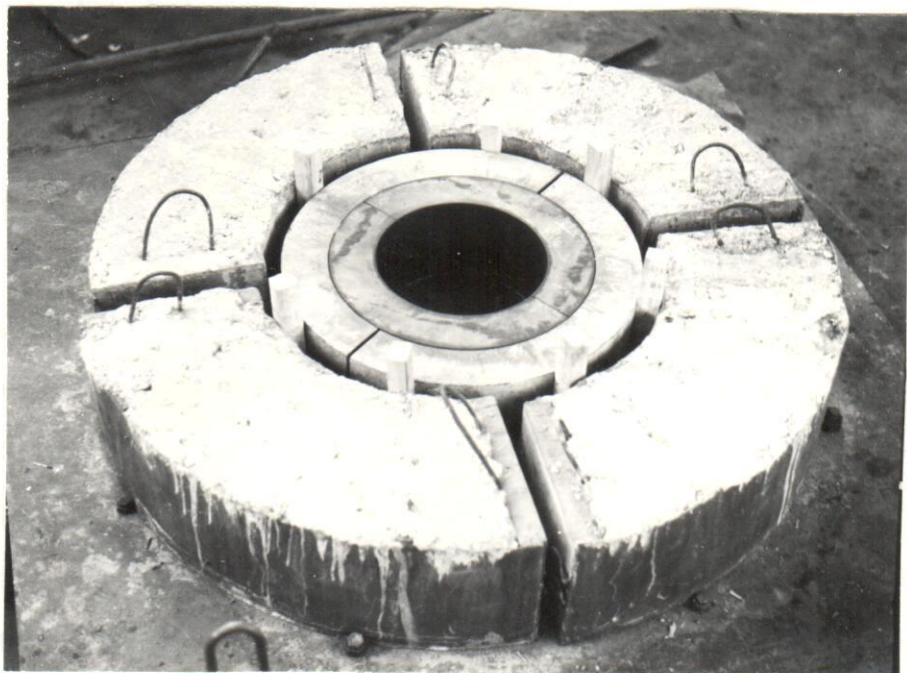


Рис.4.2.11. Зона соединения плакированной ленты со сталью ЭИ 703  
(x160).

Полученная горячей прокаткой лента нихром + ВН  
сваркой взрывом нанесена на стальное основание

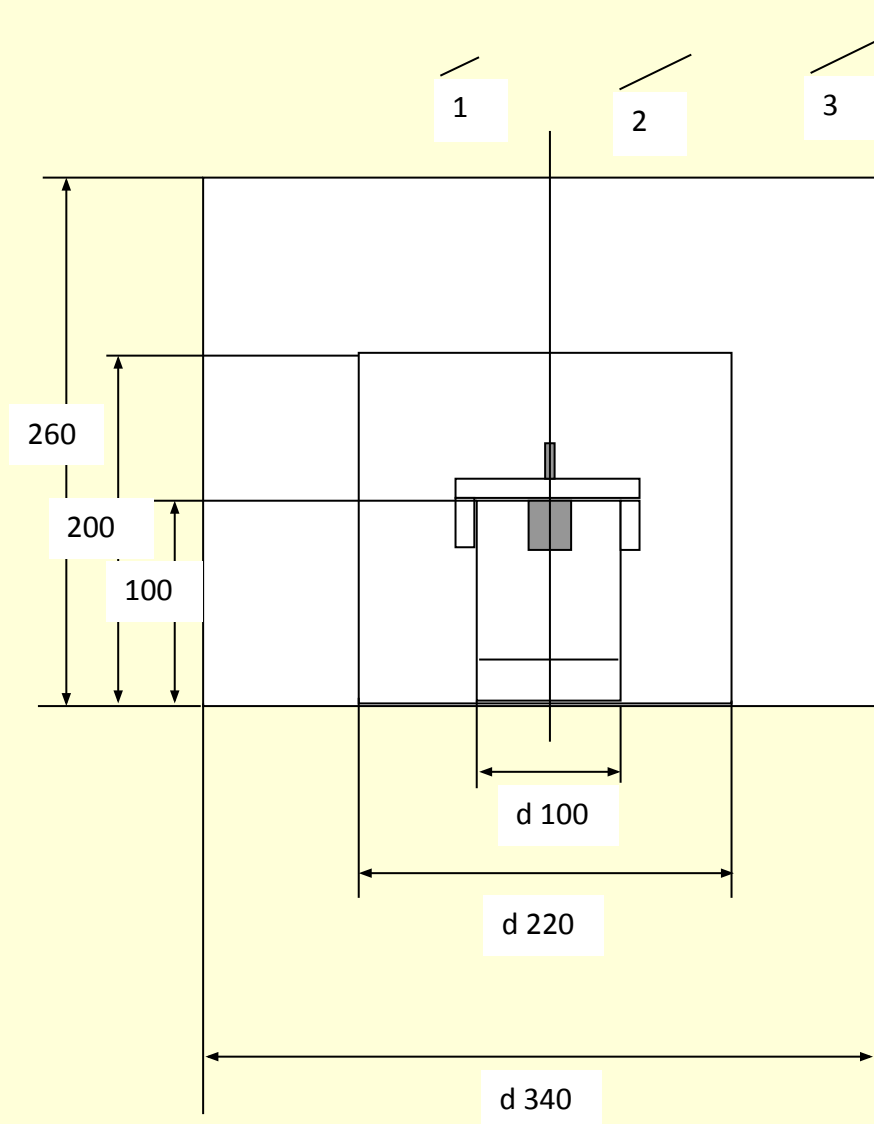
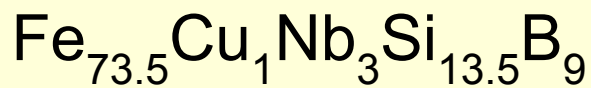




Оснастка для  
компактирования  
трубчатых изделий  
большого диаметра  
внутренним зарядом  
ВВ

Рис.49. Комбинированная матрица.

# Компактирование нанокристаллического порошка



## Экспериментальная сборка

- 1-игданит, 16 kg ( $\rho_e=1 \text{ g/cm}^3$ ,  $D_H=2,9 \text{ km/s}$ ,  $\gamma=2,2$ );
- 2-A/C-1/1, 7kg ( $\rho_e=1 \text{ g/cm}^3$ ,  $D_H=4,0 \text{ km/s}$ ,  $\gamma=2,2$ );
- 3-детонатор;
- 4-капсула с порошком;
- 5-пластичное ВВ, 120 g ( $\rho_e=1,6 \text{ g/cm}^3$ ,  $D_H=7,6 \text{ km/c}$ ,  $\gamma=2,8$ );
- 6-стальной контейнер;
- 7-откольный элемент

## Ссылка:

P. Ruuskanen, A. Deribas, A. Shtertser, T. Korkala. Magnetic properties of  $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  alloy compacted by a shock-wave technique // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. Vol. 182 (1998), pp. 185-192.

# Контейнер со слоем пластичного ВВ



# Снаряженный заряд



# Контейнер после взрывного нагружения



# Магнитные свойства компактов $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ в зависимости от частоты намагничивания (компакт отожжен при $550^{\circ}\text{C}$ )

Частота намагничивания, Гц	Потери в сердечнике $W$ , Вт/кг	Макс. Плотность магнитного потока $B_{\text{max}}$ , Т
10	1,42	0,71
50	3,4	0,68
100	8,56	0,67
500	79	0,65
1000	219	0,65

Примечание: для коммерческого пермаллоя Fe/50%Ni

$W = 10$  Вт/кг при  $B = 0.6$  Т и частоте  $f = 50$  Hz и  $W = 600$  Вт/кг при  $B = 0.6$  Т и  $f = 1$  кГц.

## Магнитные свойства, измеренные при частоте 50 Гц

### Сразу после компактирования:

Аморфная структура

Магнитная индукция  $B_{\text{max}} = 0.15$  Т

Магнитная проницаемость  $\mu_r = 110$

Коэрцитивная сила  $H_c = 900$  А/м

### Отожженный при $550^{\circ}\text{C}$ :

Нанокристаллическая структура

Магнитная индукция  $B_{\text{max}} = 0.68$  Т

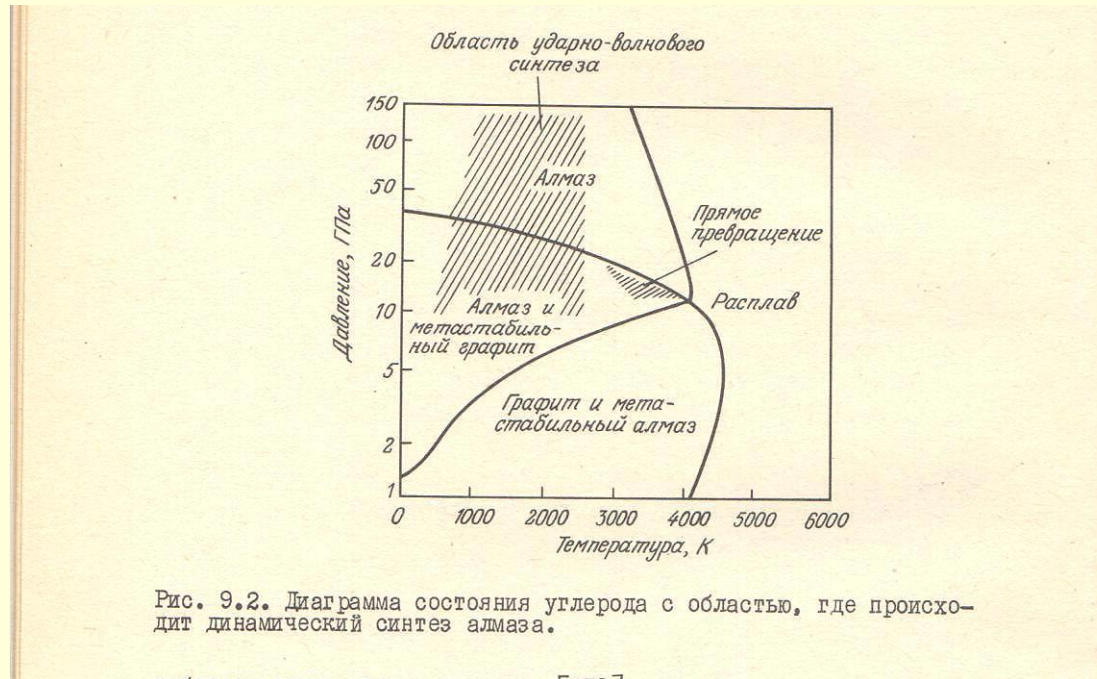
Магнитная проницаемость  $\mu_r = 1280$

Коэрцитивная сила  $H_c = 200$  А/м

Потери в сердечнике  $W = 3.4$  W/kg



# Получение алмаза



## Фазовая диаграмма углерода

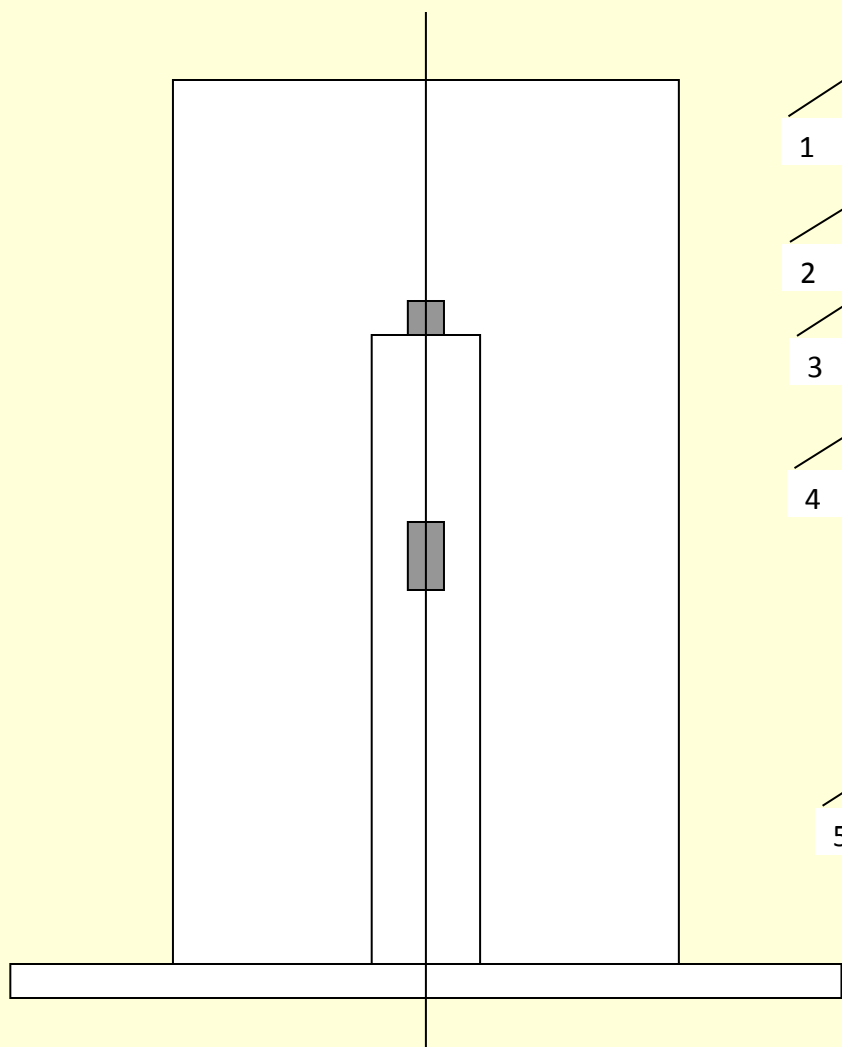
Р. Прюммер. Обработка порошкообразных материалов взрывом / пер. с немец. под ред. С.С. Бацанова. – М.: Мир, 1990

# Получение алмаза



Работы производятся по землей. В контейнер помещается смесь графита с медью (для быстрого отвода тепла). Заряд имеет диаметр 1,3 м и высоту несколько метров. Труба со смесью порошков имеет диаметр 150 мм. Выход алмаза достигает 80%, размер частиц от 1 до 100 мкм. Порошки используют для шлифования и полирования.

# Длинноимпульсное взрывное компактирование алмазного порошка



1 /  
2 /  
3 /  
4 /  
5 /

Layout of explosive compaction setup.  
detonator, 2- container, 3- ampoule with a  
diamond powder, 4- high explosive (multi-layer  
charge), 5- base plate.

2  
3  
4

**Re:** Deribas A.A., Simonov P.A., Filimonenko  
V.N., Shtertser A.A. Long-pulse explosive  
compaction of a diamond powder // Combustion,  
Explosion, and Shock Waves. Vol. 36, No. 6, pp.  
758-770 (2000).

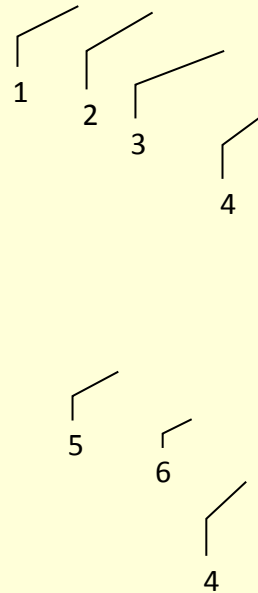
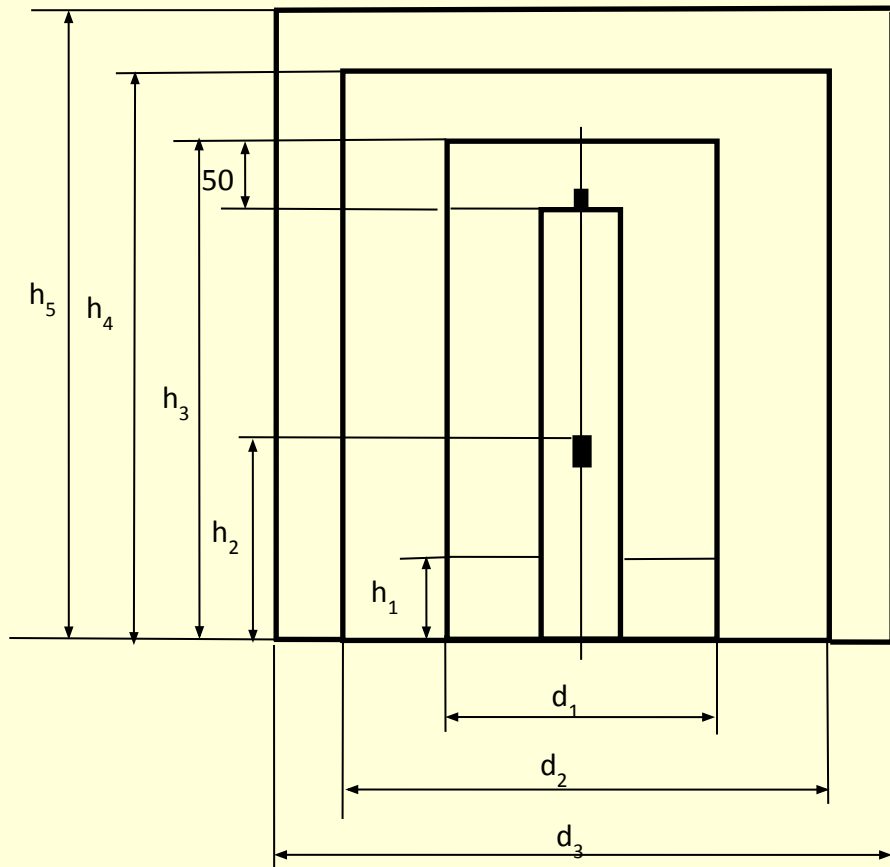
4  
5

**HE charge mass  $m_e$  varied from 60 to 760 kg**  
Effective impulse of pressure  $J$  varied from 176.0  
to 468.5  $\text{GPa}\mu\text{s}$   
Effective impulse duration  $\tau$  varied from 46.7 to  
119.1  $\mu\text{s}$   
Shock wave stress  $\sigma$  varied from 4.3 to 220.2  
GPa

**Temperature increase  $\Delta T$  varied from 162 to  
4000 K**

**Best compacts were made at  $\sigma = 7.8 \text{ GPa}$ ,  $J$   
 $= 270.8 \text{ GPa}\mu\text{s}$ ,  $\tau = 68.8 \mu\text{s}$ ,  $\Delta T = 776 \text{ K}$ .**

# Многослойный заряд



**Fig.2. Compaction of a diamond powder.**

1-Detonator; 2-Steel container; 3-RDX (80 kg); 4-Amatol/AN 1:1 (320 kg); 5-Ampoule with a diamond powder; 6-Uglenite (360 kg);  $d_1=350$  mm;  $d_2=620$  mm;  $d_3=780$  mm;  $h_1=200$  mm;  $h_2=750$  mm;  $h_3=1000$  mm;  $h_4=1200$  mm;  $h_5=1500$  mm; The height of the container is 950 mm and it's diameter is 86 mm

# Компакт алмаза, полученный методом ДВК

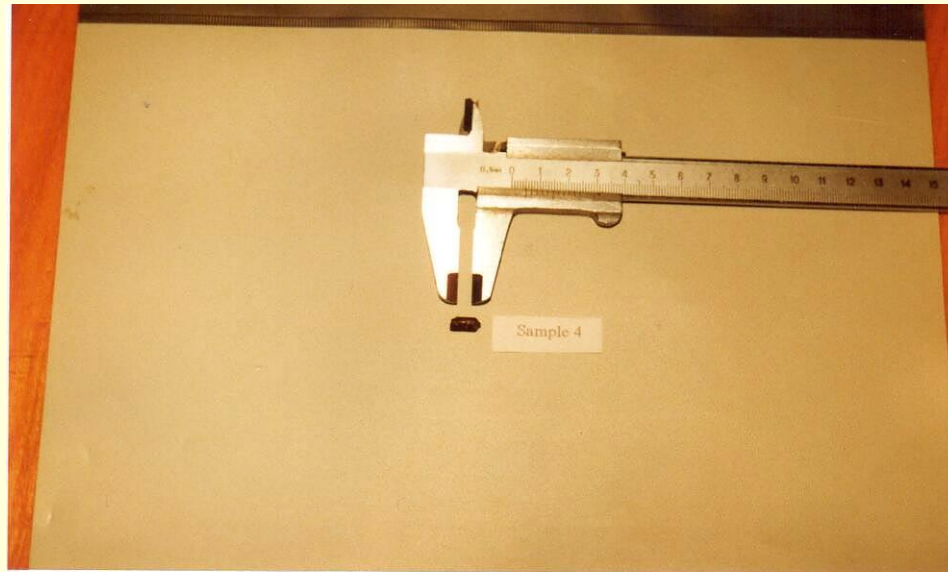
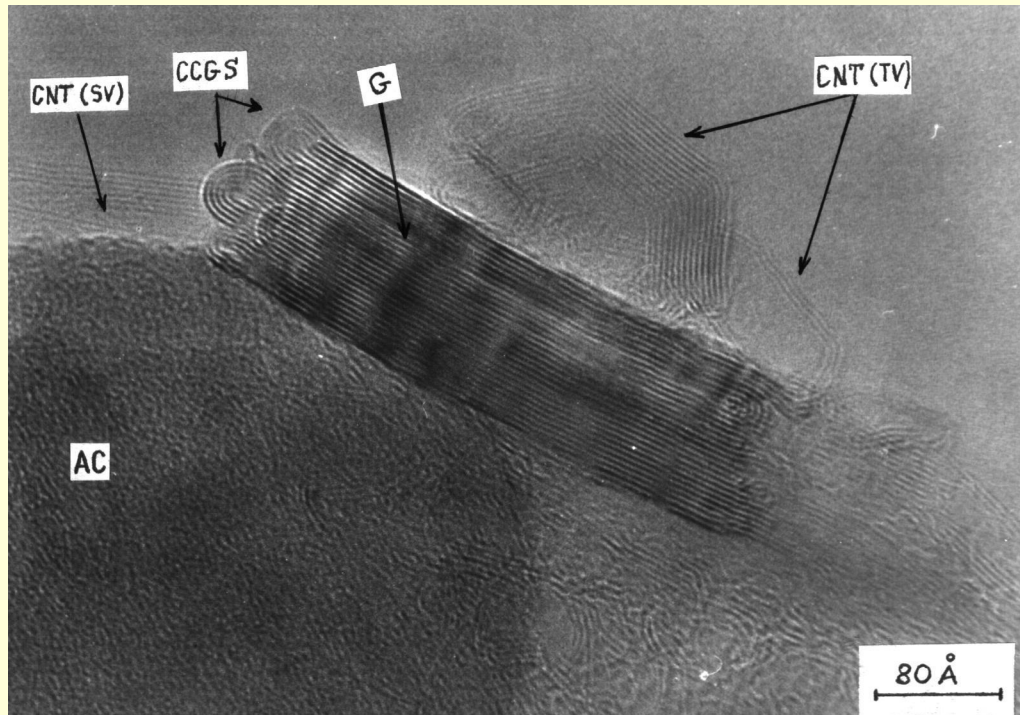


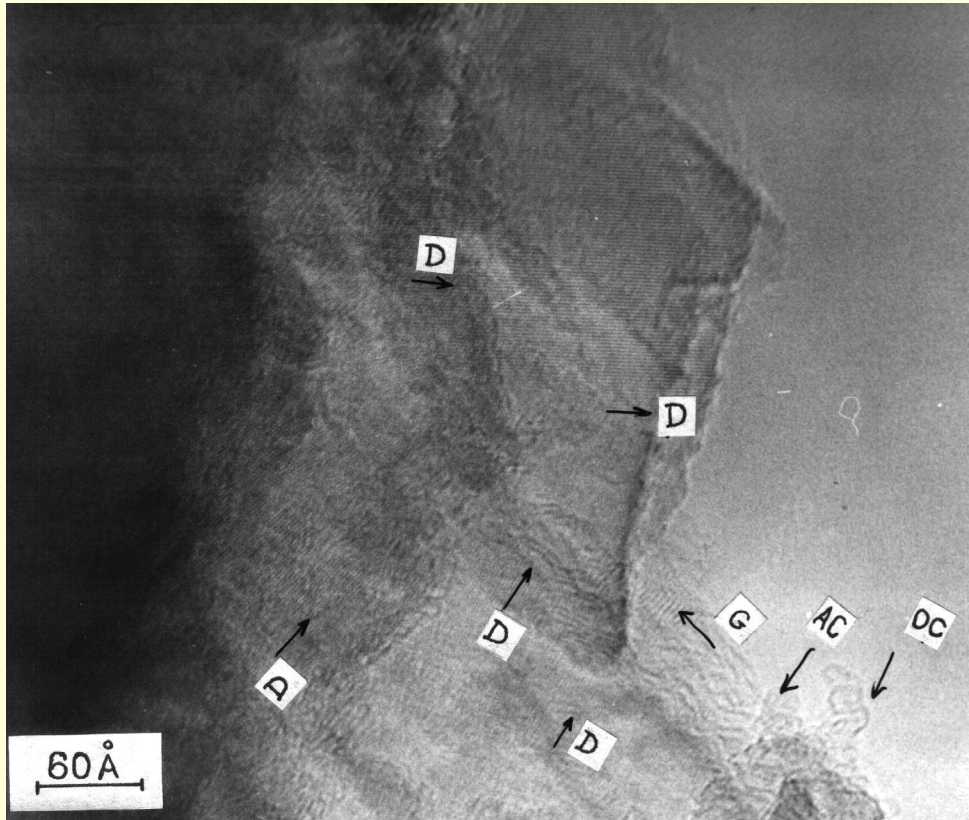
Рис.4.4.2. Образец №4.

## Углеродные формы в компакте



Наряду с алмазной формой в компактах обнаружены:  
CCGS- искривленные закрытые структуры графита, CNT- углеродные нанотрубки, AC – аморфный углерод G- графит

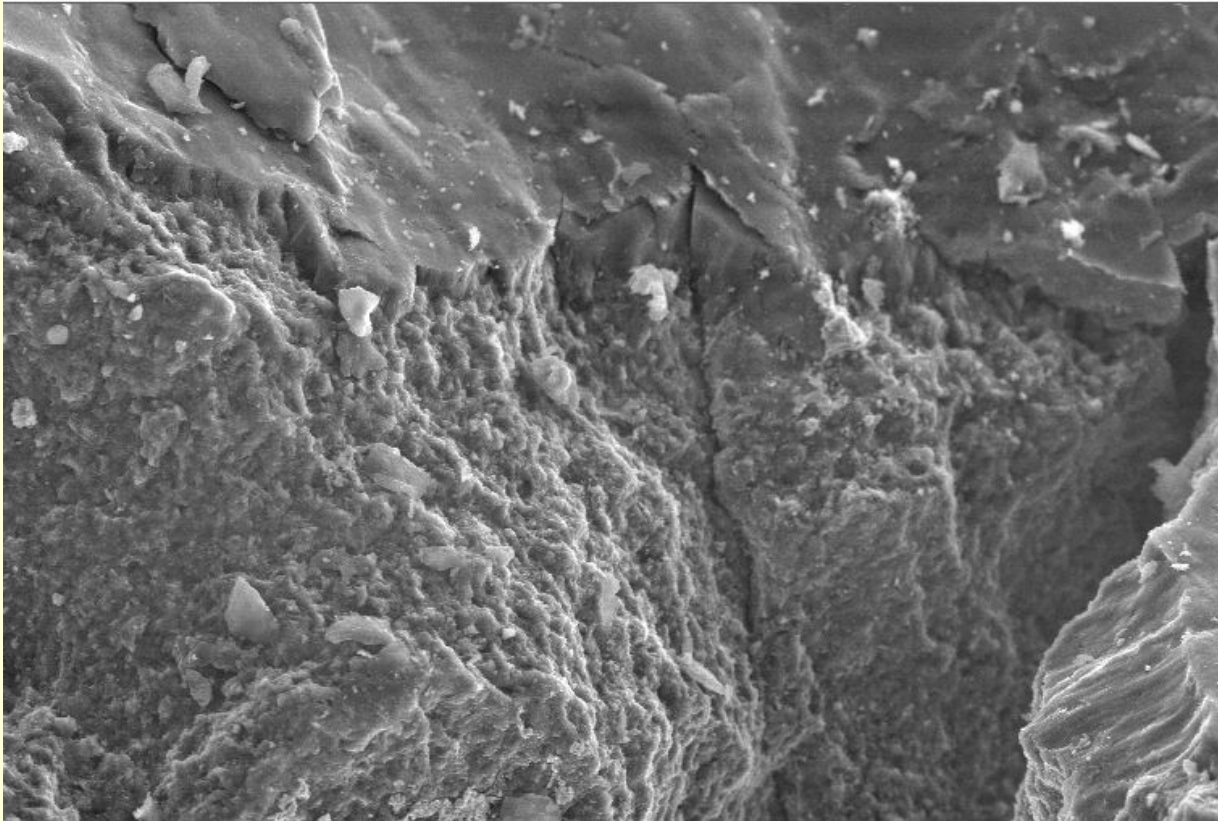
## Углеродные формы в компакте



D – алмаз, G – графит,  
AC – аморфный  
углерод, OC –  
луковичные структуры

# Компоненты А и В в структуре компактов

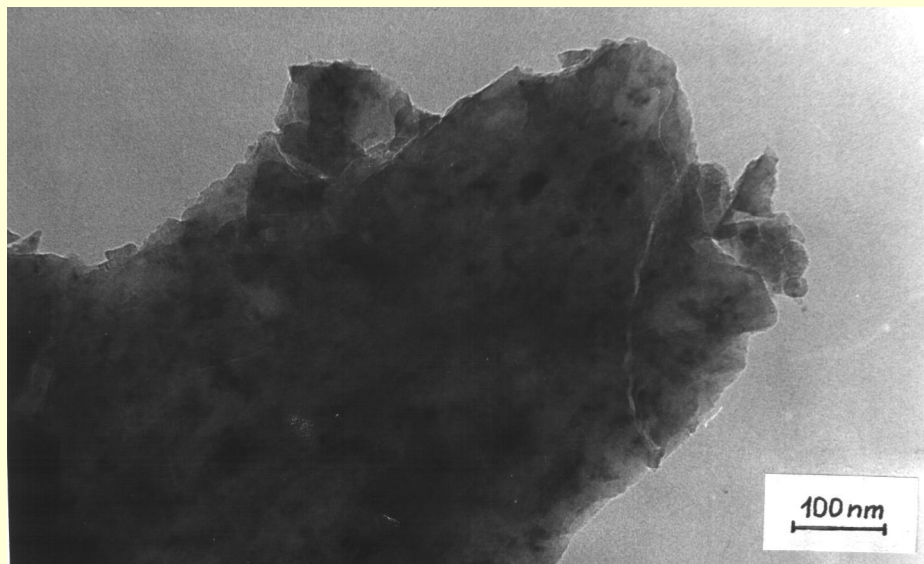
53x1 520 C6 x 460 20 мкм



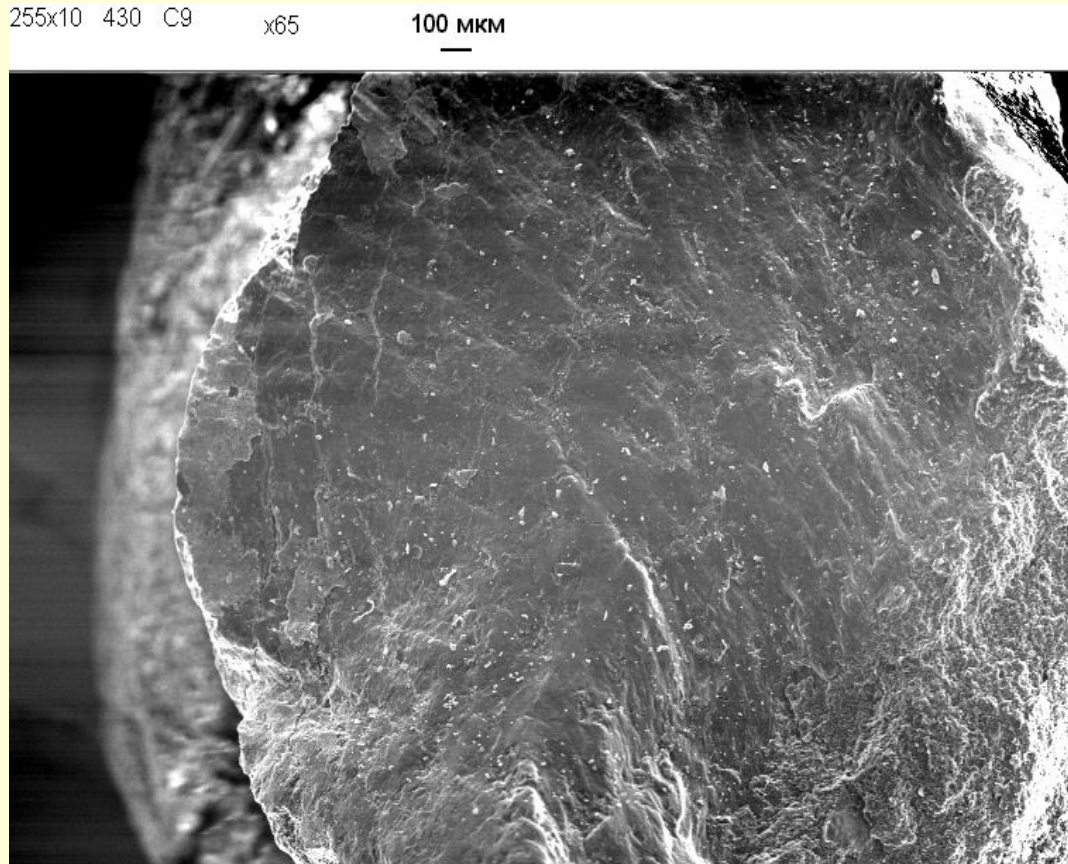
Компонента В («корочка», покрывающая блоки) имеет карбидоподобные углеродные связи



# Микроблочная структура алмаза

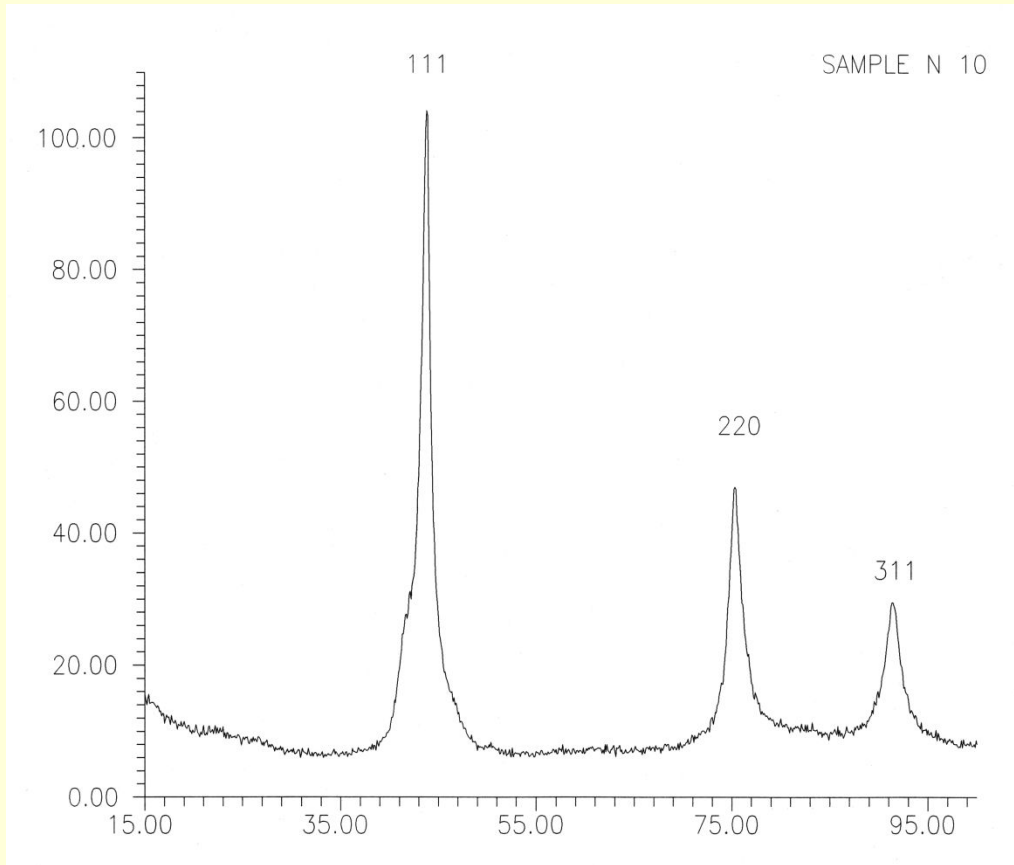


# Микроструктура



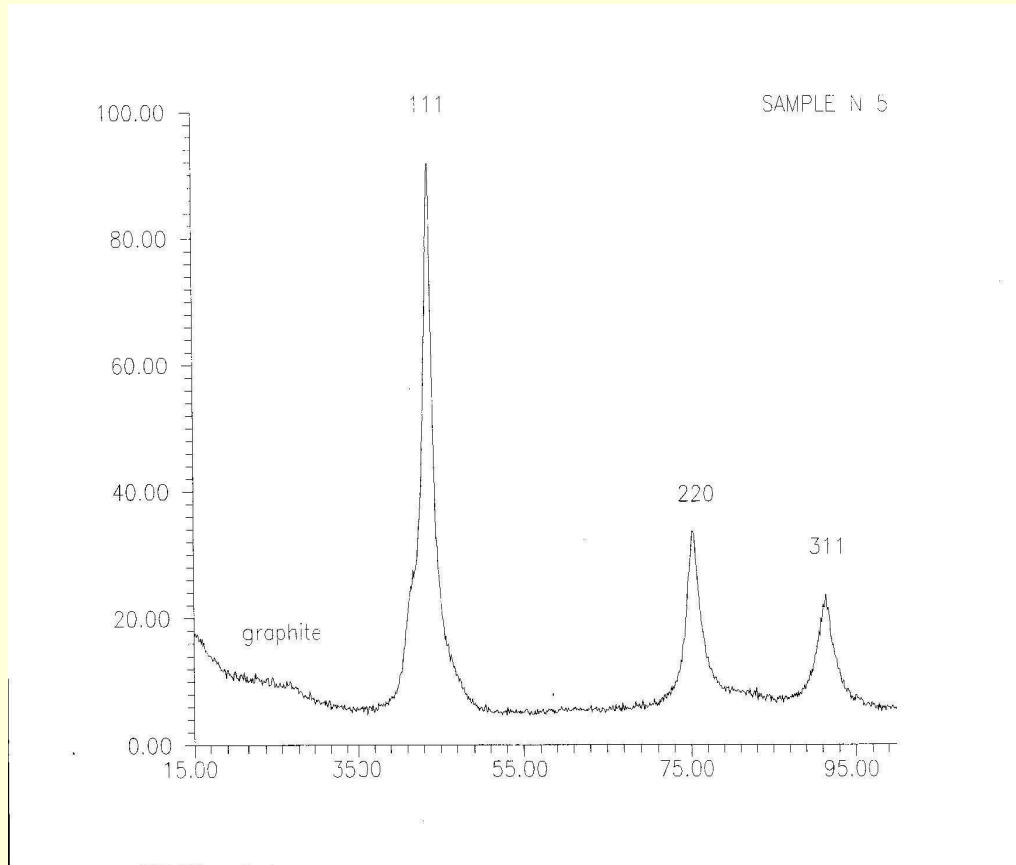
- Sample 9.  
End view
- (x 65)
- First shock-wave stress 2.51 GPa,
- maximal stress about 7.80 GPa,
- temperature about 1070 K
- Good bonding between blocks.  
Minimal cracking.

# X-ray diffraction picture



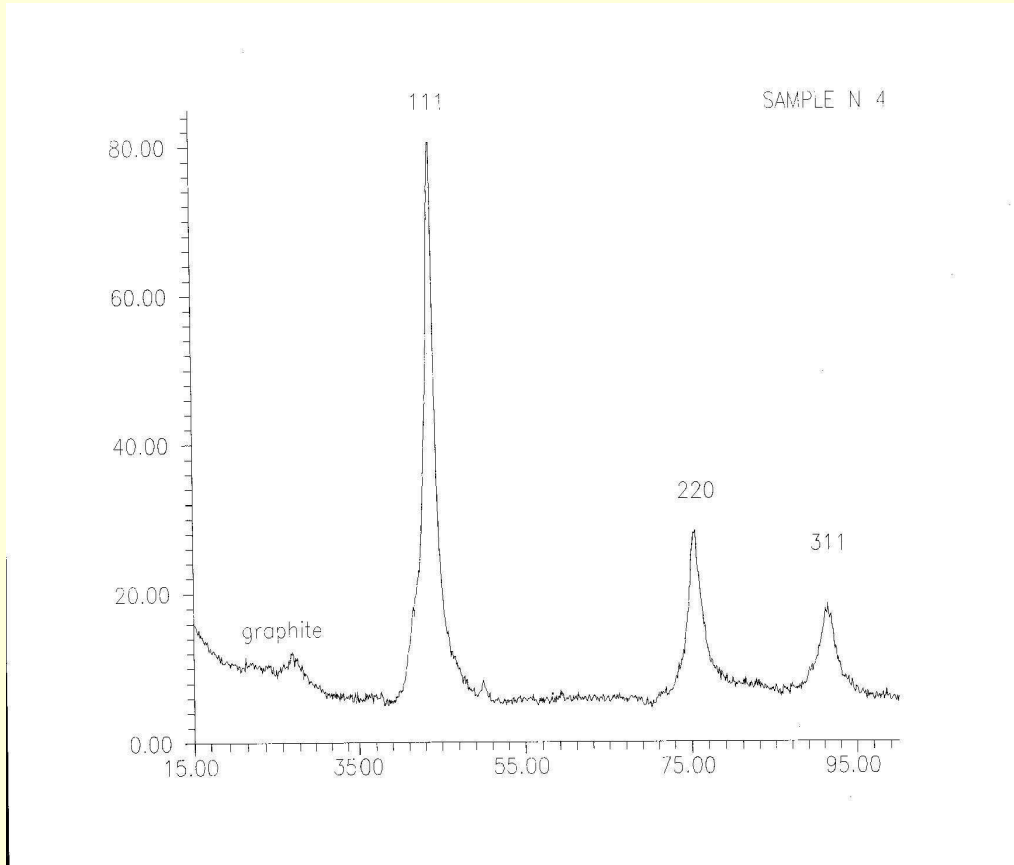
- Sample 10.
- First shock-wave stress 3.39 GPa,
- maximal stress about 7.8 GPa,
- temperature about 1070 K
- Absence of graphite

# X-ray diffraction picture



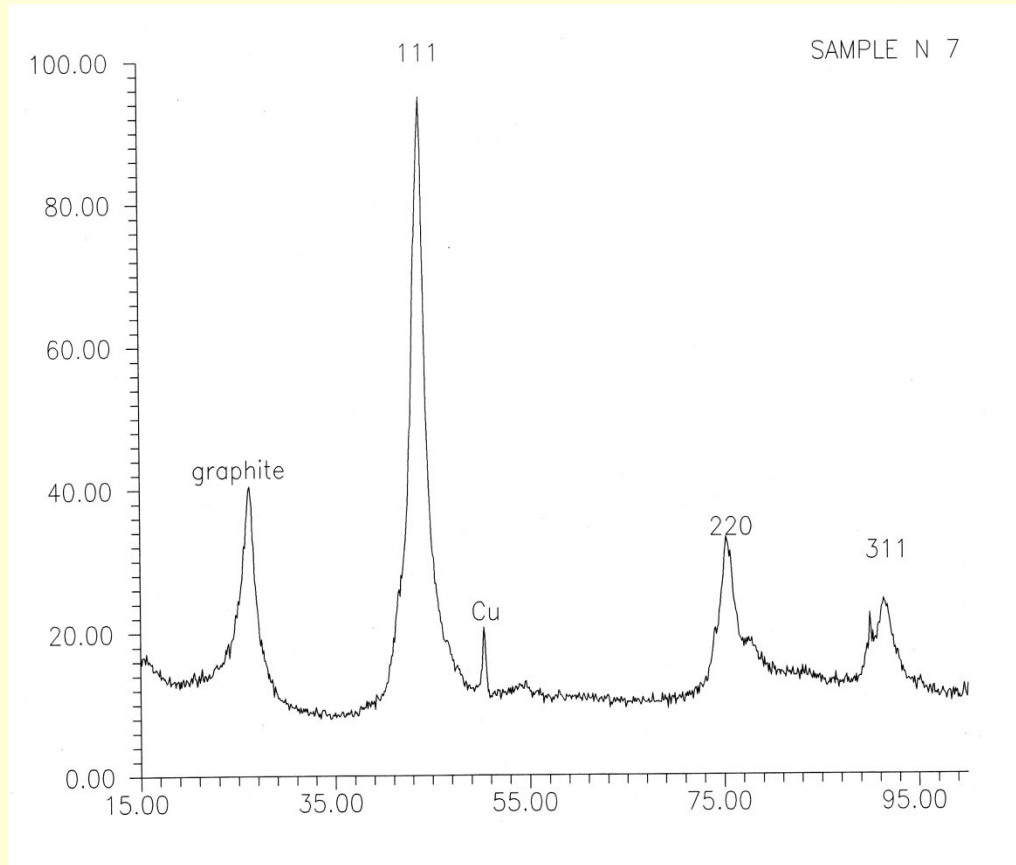
- Sample 5.
- First shock-wave stress 6.58 GPa,
- maximal stress about 63 GPa,
- temperature about 2660 K
- Scarcely observed occurrence of graphite

# X-ray diffraction picture



- Sample 4.
- First shock-wave stress 6.27 GPa,
- maximal stress about 63 GPa,
- temperature about 2720 K
- Well-defined occurrence of graphite.

# X-ray diffraction picture



- Sample 7.
- First shock-wave stress 49.25 GPa,
- maximal stress about 220 GPa,
- partial melting.
- Presence of graphite

# Особенности компактирования в цилиндрической геометрии

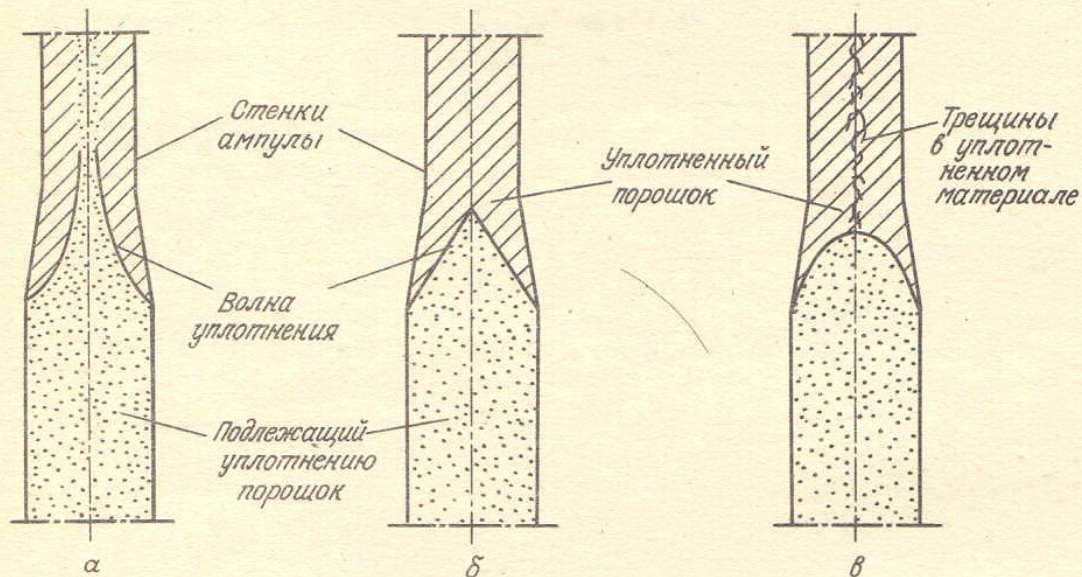


Рис. 5.3. Различные формы фронта ударной волны при взрывном уплотнении. При переходе от а к б количество ВВ и(или) скорость увеличиваются. а - давление вовнутрь уменьшается; б - давление в поперечном сечении остается постоянным; в - давление вовнутрь увеличивается.

Различные конфигурации фронта ударной волны могут быть об-

# Численные расчеты УВ нагружения в цилиндрической геометрии

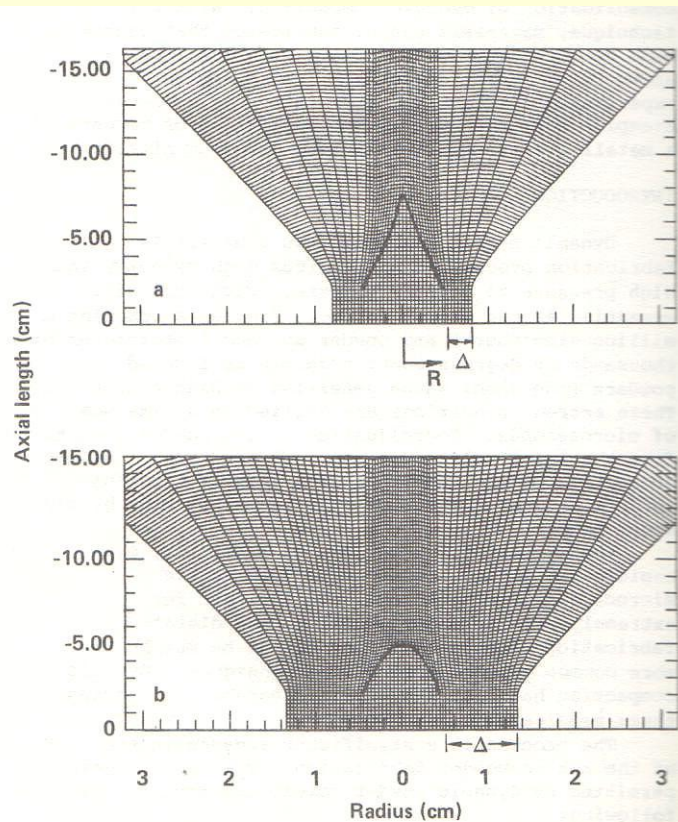


Fig 2. Computer simulation of a powder compacted in cylindrical geometry. Darkened lines trace the position of the shock front. R is the radius.  
(a) Explosive thickness  $\Delta = 1.46$  cm.  
(b) Explosive thickness  $\Delta = 4.11$  cm.

M.L. Wilkins. Dynamic Powder Compaction // High-Energy Rate Fabrication – 1984. The American Society of Mechanical Engineers, 1984. p. 63-69



## Особенности УВ-компактирования

870

A.

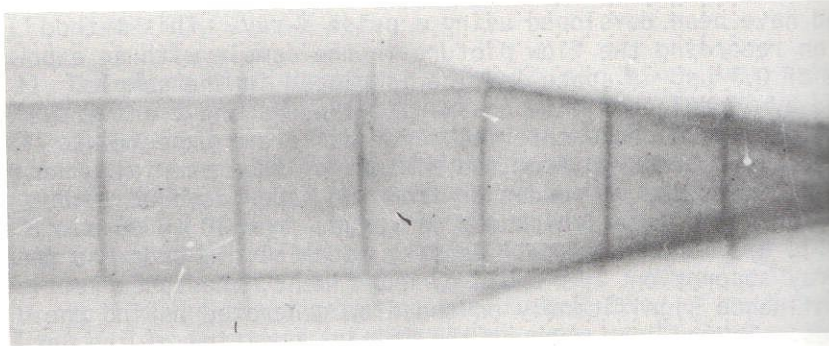


FIGURE 5a. Conical wave.

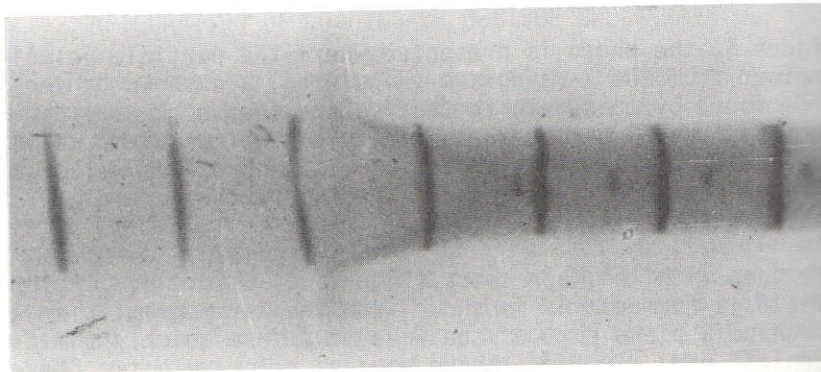


FIGURE 5b. Mach wave.

Коническая УВ и Маховская УВ  
конфигурация

A.M. Staver. Metallurgical Effects under Shock Compression // Shock Waves and High-Strain Rate Phenomena in Metals. Concepts and Applications.- edited by Marc A. Meyers and Lawrence E. Murr. New York, Plenum Press, 1981. p. 865-880

# Влияние режима нагружения на однородность компакта



Рис.4.1.2. Комплекты из неочищенных гранул АС15г.

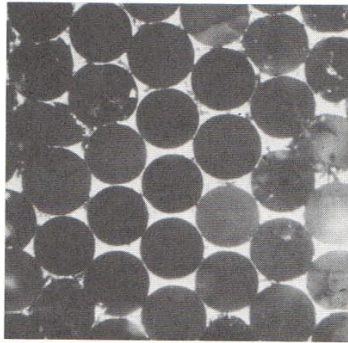


FIGURE 9. Photo of glass balls covered by aluminum.

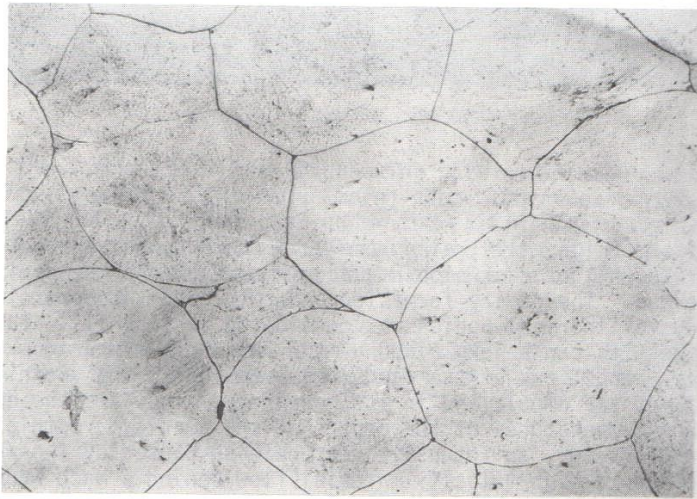


FIGURE 10. Photo of sample made of titanium particles.

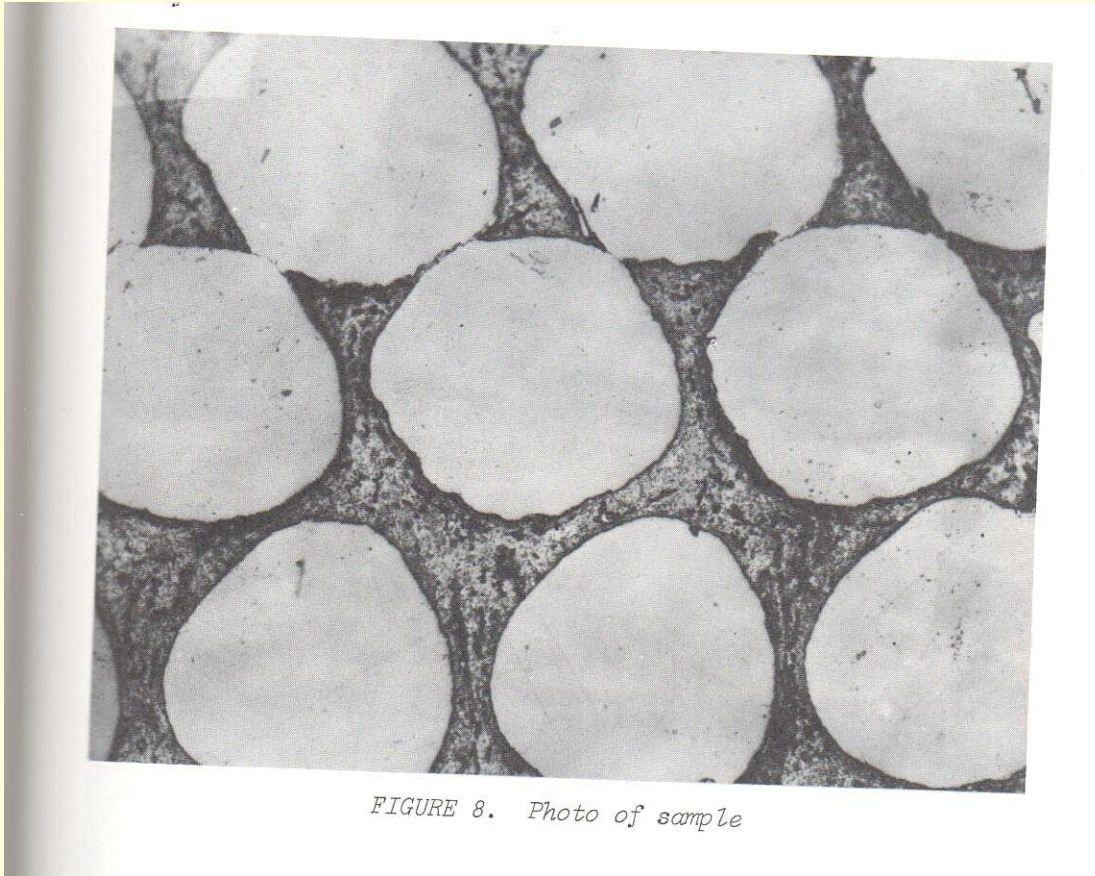
Особенности УВ-компактирования – локализация деформации во внешних слоях частиц

Скомпактированные взрывом стеклянные шарики, покрытие алюминием – деформация сосредоточена в алюминиевом слое

Если нагружаются однородные (по прочности) частицы, происходит однородная деформация (УВ средней интенсивности)

A.M. Staver. Metallurgical Effects under Shock Compression // Shock Waves and High-Strain Rate Phenomena in Metals. Concepts and Applications.- edited by Marc A. Meyers and Lawrence E. Murr. New York, Plenum Press, 1981. p. 865-880

## Особенности УВ-компактирования



Компактирование смеси шариков медных и из нержавеющей стали. Деформируется в основном медная компонента.

# Влияние воздуха

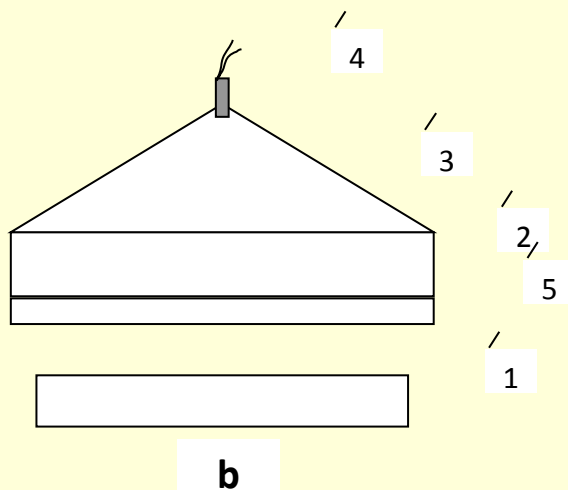
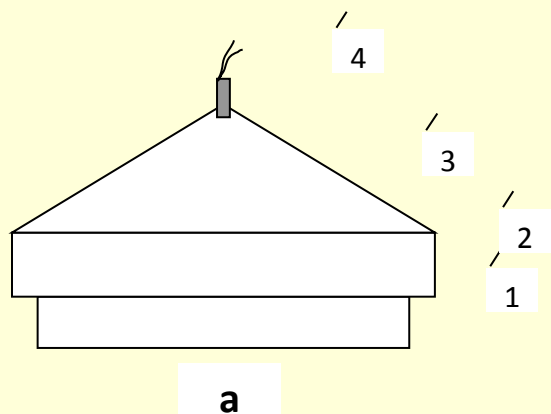
Поведение газа в порах изучалось, в частности, Н.А. Костюковым и К. Стодхаммером. Весьма важно знать насколько существенно влияние воздуха на свойства компакта, так как применяемое в целях исключения этого влияния вакуумирование сборок приводит к усложнению экспериментов и удорожанию получаемых образцов. Анализируя экспериментальные данные по компактированию и последующему спеканию порошков  $Al_2O_3$ ,  $AlN$ ,  $TiC$ ,  $TiNi$  и  $Cu$  [Костюковым] сделан вывод, что фильтрации газа через фронт ударной волны при схлапывании пор не происходит, по крайней мере в диапазоне давлений от 2 до 7 Гпа.

1. N.A.Kostyukov. Shock compression of gas-saturated powder materials // Proceed. 13th AIRAPT Intern. Conf. "Recent Trends in High Pressure Research" (Bangalore, India, 1991), edited by A.K.Singh. New Delhi: Oxford & IBH Publ. Co. Pvt. Ltd., 1992. P.709-711.
2. N.E.Elliott and K.P.Staudhammer. Effect of gas pressure on the shock consolidation of 304 stainless steel powders // Shock –Wave and High-Strain-Rate Phenomena in Materials , edited by M.Meyers, L. Murr, K.P.Staudhammer. New York: Marcel Dekker Inc., 1992. P.371-381.

# Влияние воздуха

Поскольку компакт имеет открытую и закрытую пористость, то в закрытых порах газ находится в сжатом состоянии и при спекании, особенно в вакууме, нагретый газ раскрывает поры. Это часто приводит к увеличению пористости после спекания. На примере порошковой смеси TiC/TiNi (1:1 по весу) было показано, что оптимальная пористость компакта после взрывного нагружения должна быть около 15%. В этом случае обеспечивалась максимальная плотность компакта после спекания (пористость 0,4%). Авторы объясняют это тем, что пористость в 15% является открытой и при термообработке в вакууме воздух удаляется из компакта. Показано также, что часть газа после взрыва находится не только в сжатом в закрытых порах состоянии, но и адсорбируется по структурным дефектам и границам зерен и блоков [Стодхаммер].

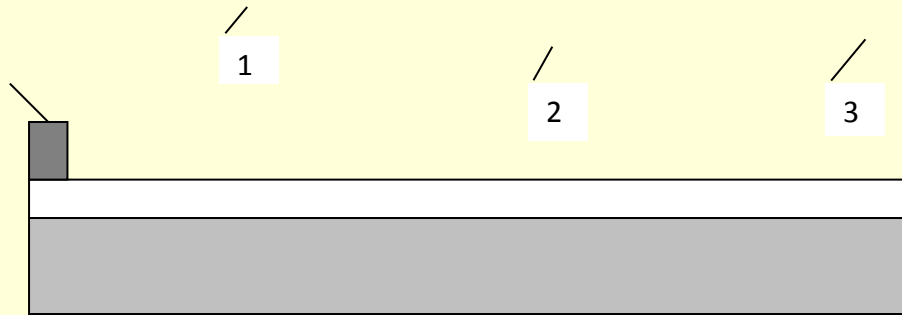
# Схема упрочнения взрывом (плоская детонационная волна)



Hardening by contact explosive charge  
(a) and hardening by flyer plate (b).

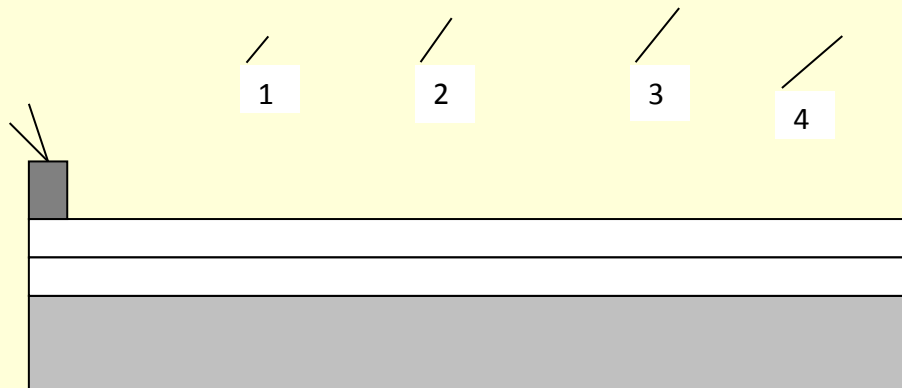
1- hardened sample, 2- explosive  
charge, 3- generator of plane  
detonation wave, 4- detonator, and 5-  
accelerated plate.

# Схема упрочнения взрывом (скользящая детонационная волна)



Hardening by a contact explosive charge.

1- detonator; 2- high explosive; 3- material under treatment

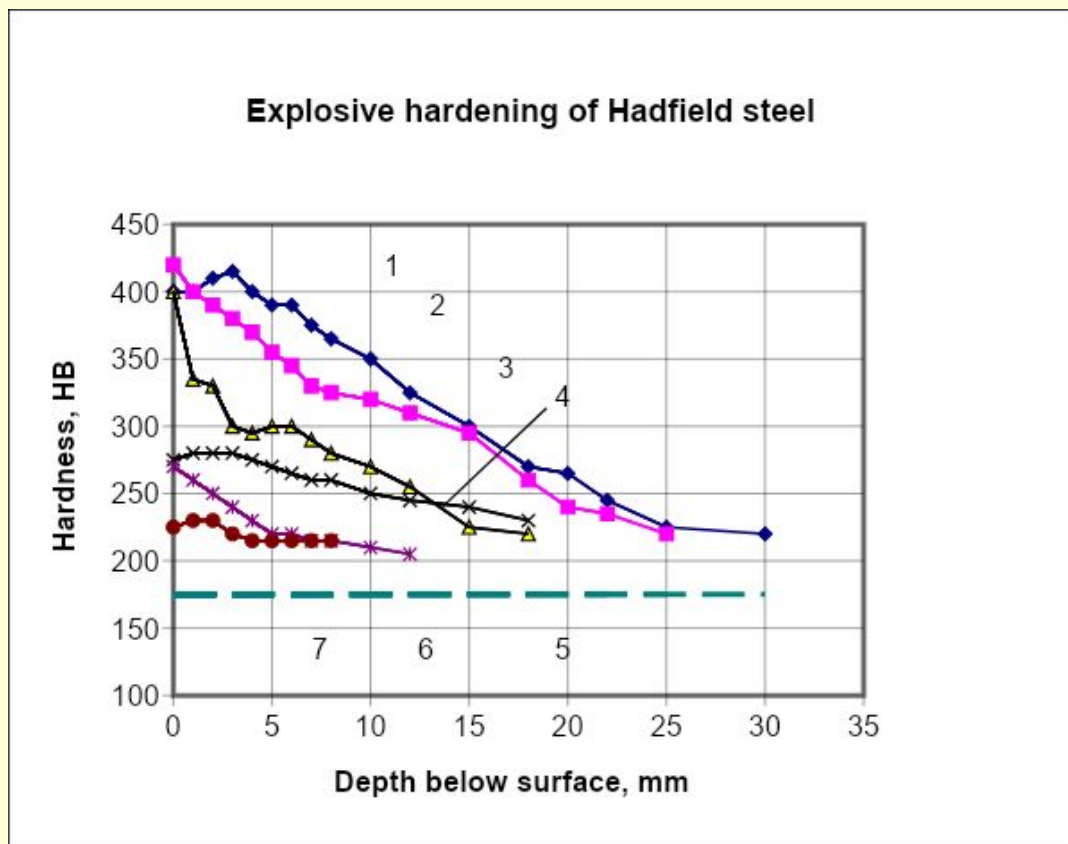


Hardening through an intermediate porous layer.

1- detonator; 2- high explosive;  
3- porous layer; 4- material under treatment

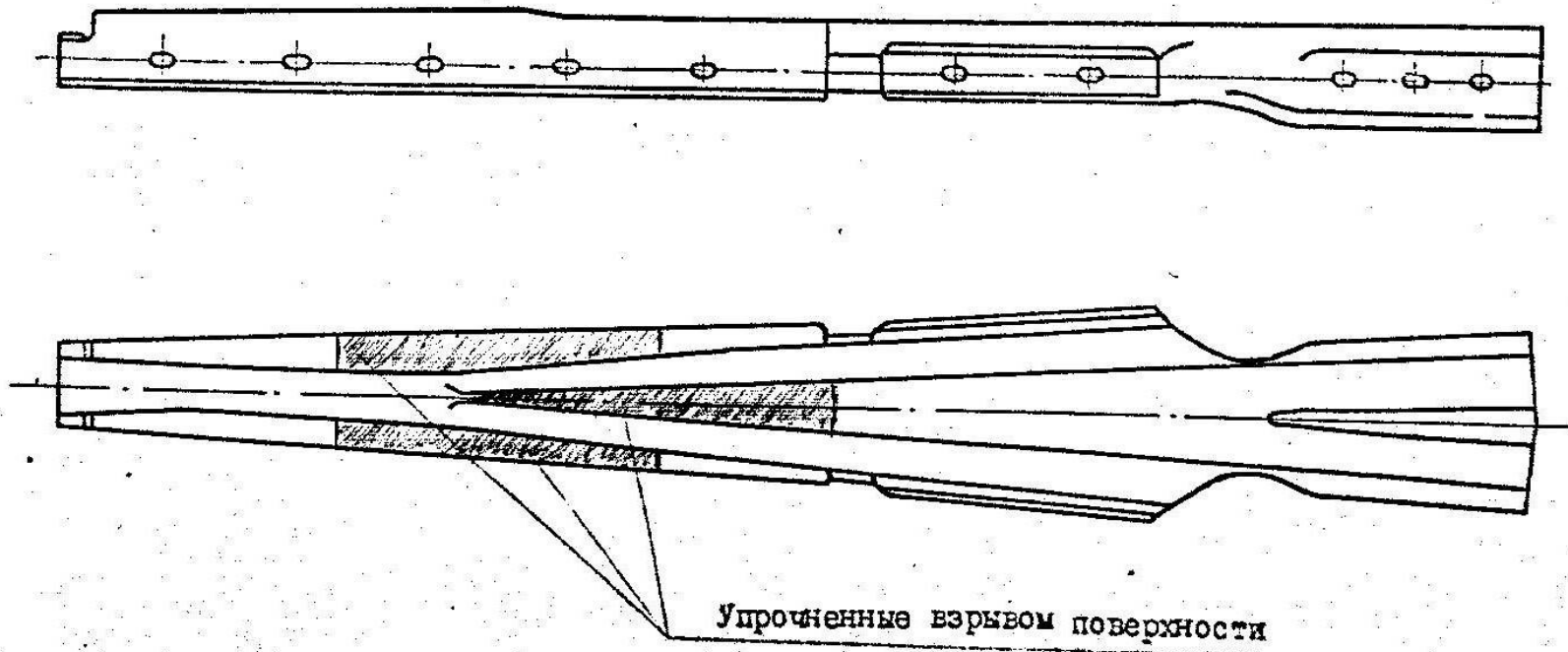


# Увеличение твердости стали Гадфильда



- 1- plasticized explosive 9 mm thick, in direct contact
- 2- RDX 20 mm thick, intermediate sand 5 mm
- 3- amatol 40 mm thick, intermediate sand 5 mm
- 4- plasticized explosive 4,6 mm thick, in direct contact
- 5- amatol 20 mm thick, intermediate sand 5 mm
- 6- amatol 20 mm thick in direct contact
- 7- initial hardness HB 175

Общий вид отливки сердечника с упрочнённой  
взрывом поверхностью катания



# Литература

1. Крупин А.В., Соловьев В.Я., Шефтель Н.И., Кобелев А.Г. Деформация металлов взрывом. Москва: Металлургия, 1975.
2. Даниленко В.В. Взрыв: физика, техника, технология. – М.: Энергоатомиздат, 2010
3. В.В. Селиванов, И.Ф. Кобылкин, С.А. Новиков. Взрывные технологии / под общ. ред. Селиванова В.В. – М.: Изд-во МГТУ им. Р.Э. Баумана, 2008
4. А.А. Штерцер. Взрывное компактирование порошковых материалов // Дисс. докт. физ-мат наук, Новосибирск, 1999
5. Р. Прюммер. Обработка порошкообразных материалов взрывом / пер. с немец. под ред. С.С. Бацанова. – М.: Мир, 1990
6. В.Ф. Нестеренко. Импульсное нагружение гетерогенных материалов. Новосибирск: Наука, 1992