

XII международная конференция «Забабахинские научные чтения» доклад,  
02-06 июня 2014 г.

# Двухстадийная деформация удлиненных ударников

Н.С. Жилыева, В.Ф. Куропатенко, Е.В. Недоспасова, В.Г. Полеев, В.Н. Смирнов, Л.В Хардина



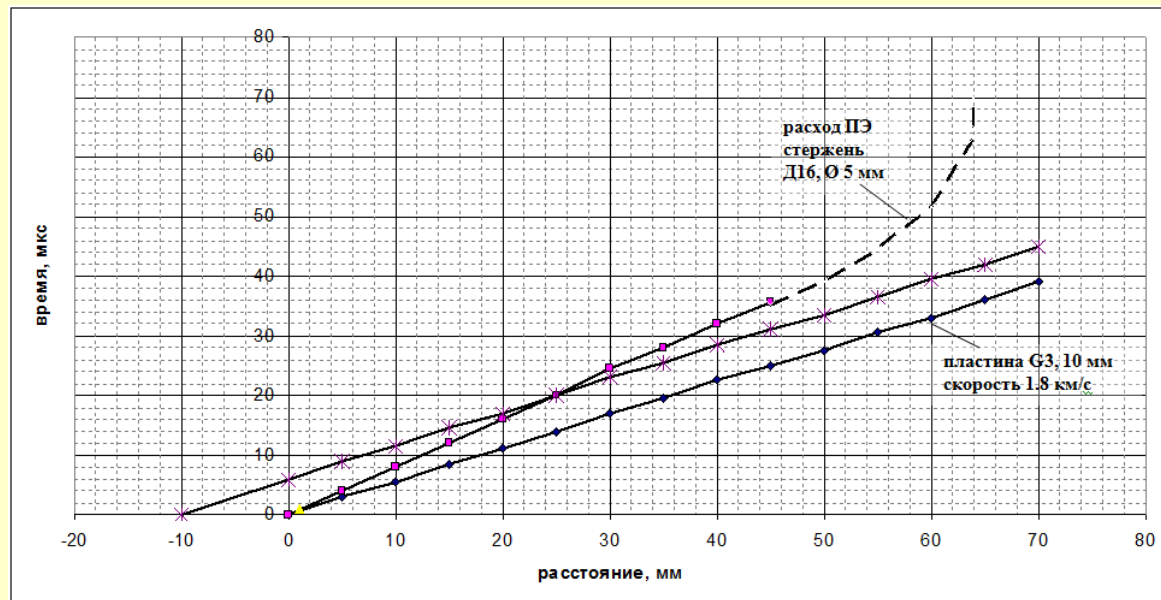
## Цель работы

- Исследование эффекта повышенного укорачивания проникающего элемента (ПЭ) при взаимодействии его с преградой конечной толщины (в направлении нормали к преграде)

# Введение

В работе исследовано проникание удлиненных неподвижных ударников в подвижную преграду конечной толщины. Скорость преграды 1-3 км/с.

Обсуждается эффект, который ранее был обнаружен, но не объяснен из-за отсутствия динамики процесса. Так, при метании стальной пластины толщиной 10 мм со скоростью 1,8 км/с навстречу неподвижному стержню из Д16 диаметром 5 мм получено: конечное укорачивание стержня  $\Delta b_3=64$  мм. Согласно оценке в гидродинамическом приближении  $\Delta b_p=h(\rho_i/\rho_j)^{1/2}=17$  мм, где  $h$ -толщина преграды,  $\rho_i$  и  $\rho_j$  – плотности преграды и стержня. Различие результатов эксперимента и расчета составило 3,8 раза. В этом заключена суть эффекта. Предполагаемая картина уменьшения высоты ПЭ со временем показана на рисунке.

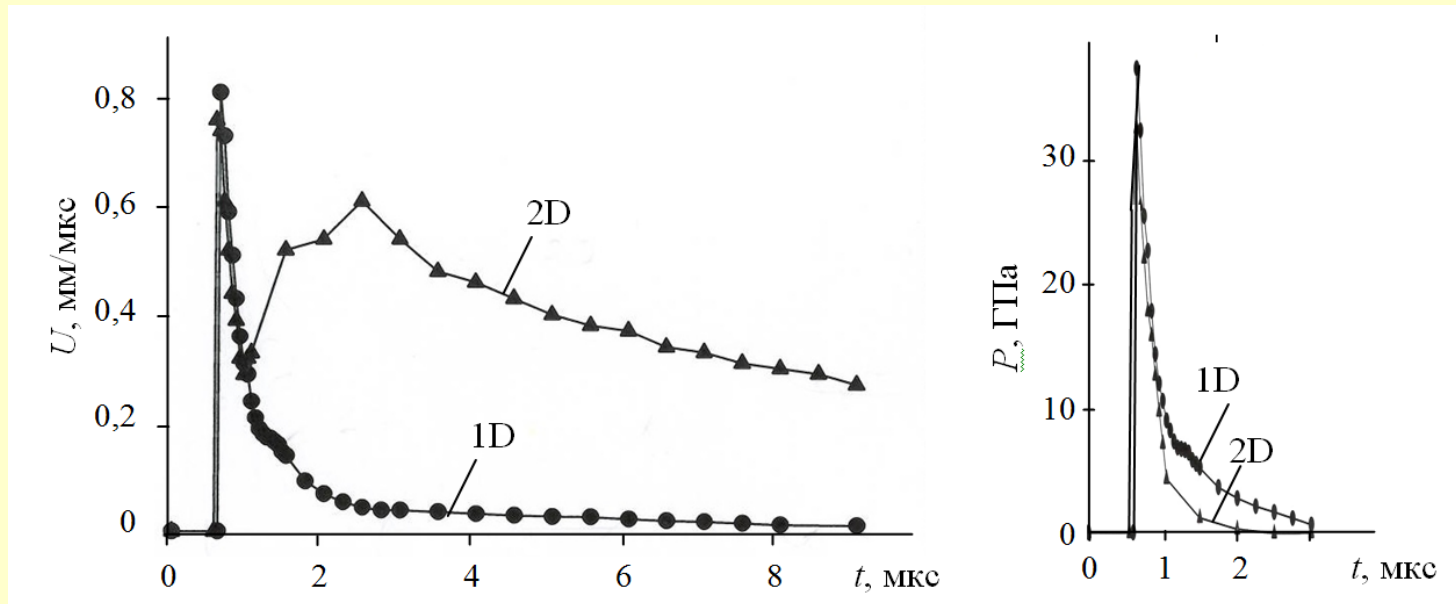


# Деформация стальных ПЭ при воздействии продуктов взрыва в 2D расчетах (динамическая картина)

Нагрузочный импульс  $t=1\text{ мкс}$  создавался детонирующим взрывчатым составом ( $\rho=1,7\text{ г/см}^3$ ,  $P=25,5\text{ ГПа}$ ,  $D=7,53\text{ мм/мкс}$ , толщина 5 мм, ширина 10 мм). В качестве ПЭ была пластина из Армко-железо,  $\rho=7,89\text{ г/см}^3$ , толщина 4 мм). Ударная нагрузка прикладывалась к торцу пластины.

Параметры Армко-железо, используемые в расчетах:  $D=4,57+1,49U$ ;  $\sigma^*=0,5\text{ ГПа}$  – откольная прочность. Модель прочности включала три параметра  $\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ .

Результаты расчетов давления и скорости укорачивания ПЭ в зависимости от времени приведены на рисунке.

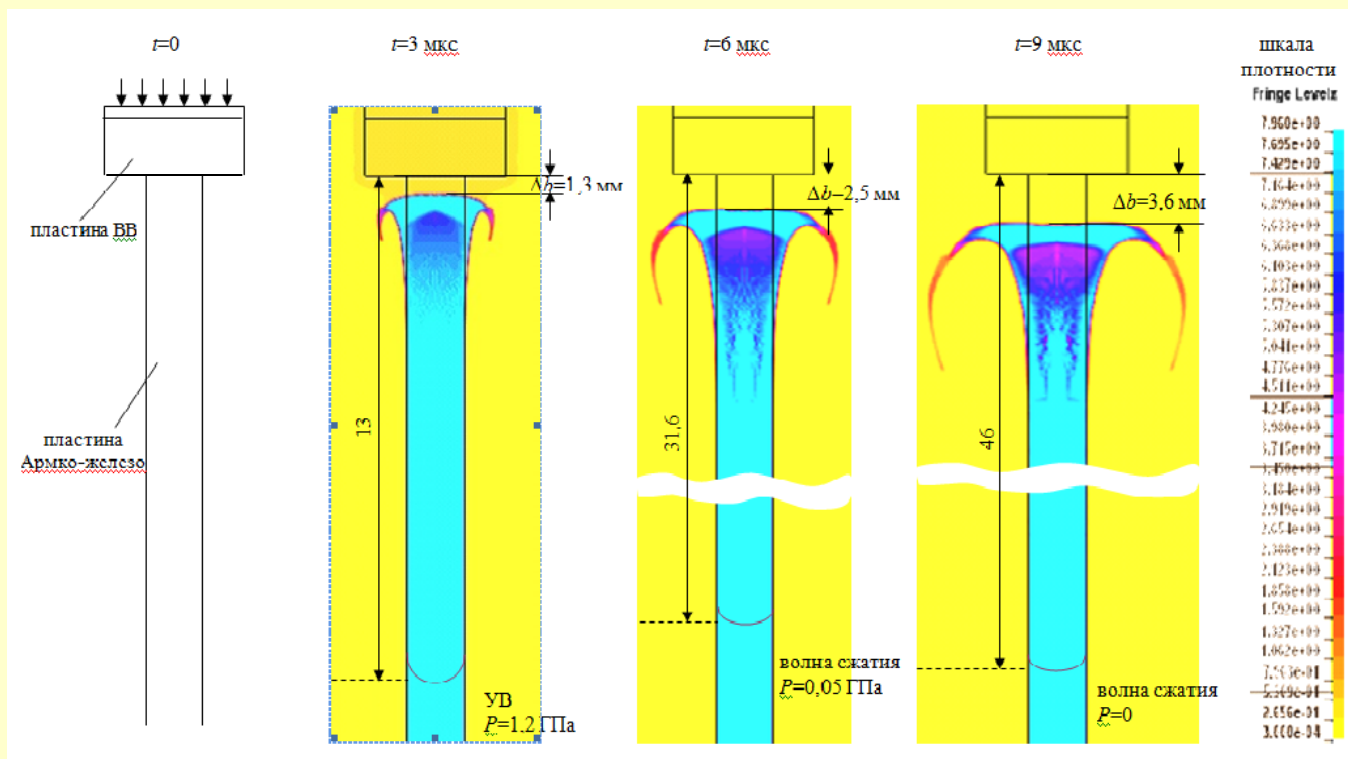


Зависимости  $P(t)$  и  $U(t)$  на границе ПВ – Fe

На рисунке показано состояние ПЭ. Имеется область с  $\rho=4,7-6,3 \text{ г/см}^3$ . Причина уменьшения плотности-разрушение вещества и его движение в боковом направлении. Давление УВ 27-11 ГПа, превышающее прочность материала ПЭ.

Укорачивание ПЭ происходило в две стадии: 1) активная  $t \leq 1 \text{ мкс}$ , и 2) инерционная  $t > 1 \text{ мкс}$ . Наибольший вклад в уменьшение высоты ПЭ внесла инерционная стадия.

Величина укорачивания ПЭ  $\Delta b = U \cdot t$  для  $t \leq 9 \text{ мкс}$ ,  $U = 0,4 \text{ мм/мкс}$  – скорость уменьшения длины ПЭ. Скорость  $U = \text{const}$  означает, что уменьшение высоты ПЭ продолжается дольше 9 мкс.



Состояние подвески на моменты  $t=3, 6$  и  $9 \text{ мкс}$

## Деформация ПЭ из АМц и В<sub>4</sub>С (эксперимент)

Стальная (Ст. 3) преграда толщиной 5 мм ускорялась продуктами взрыва до  $U=1,8-2,5$  км/с. Проникающие элементы - пластины, примыкающие торцами к преграде. Толщина пластинчатых ПЭ 5-6 мм, материал В<sub>4</sub>С ( $\rho=2,5$  г/см<sup>3</sup>) и АМц ( $\rho=2,7$  г/см<sup>3</sup>). Согласно гидродинамике созданы равные условия проникания. Свойства материалов ПЭ различны: хрупкость, пластичность, жесткость, прочность при сжатии и растяжении. Твердость (по Виккерсу) различалась в 62 раза ( $HV_{В_4С}=18,7$  ГПа,  $HV_{АМц}=0,3$  ГПа). Следовало уточнить картину проникания.

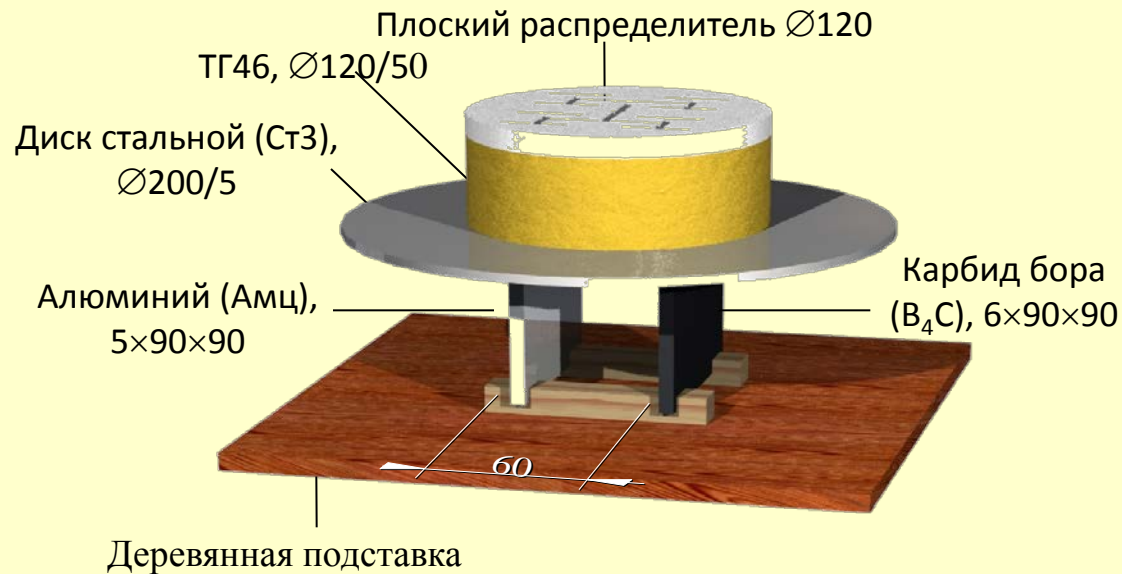


Схема опыта

Рентгенограмма на момент времени движения стальной преграды  $t=21,6\pm 0,1$  мкс приведена на рисунке. Преграда сместилась на расстояние  $s=9h$ , где  $h=5$  мм – толщина преграды. Другой момент съемки соответствовал  $t=49,3\pm 0,1$  мкс.



Рентгенограмма опыта  $t=21,6$  мкс

Форма и размеры кратеров в районе В4С и АМц одинаковы. Картина подобна гидродинамическому прониканию.

Особенности поведения ПЭ из В<sub>4</sub>С:

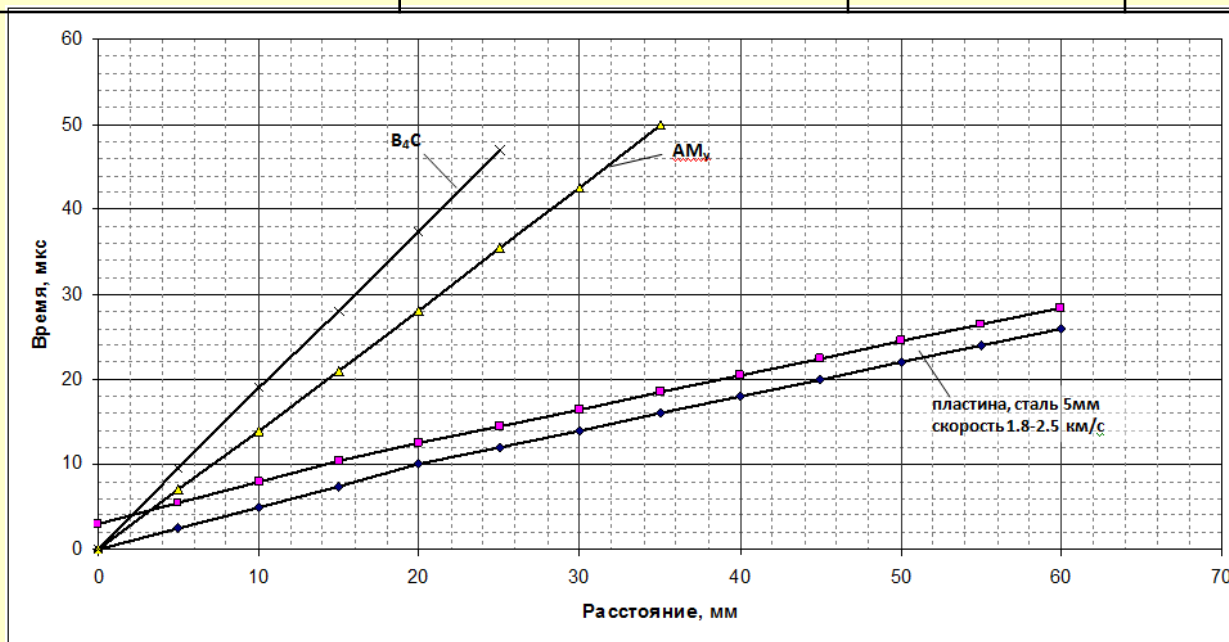
- 1) продольное расслоение пластины на две части и разлет их в боковом направлении с суммарной скоростью 0,06 км/с;
- 2) смещение пластины вниз со средней скоростью 0,12-0,18 км/с (углубление в преграду из древесины).

Причины: 1) более сильная УВ в В4С (на входе в пластину 36 ГПа и на выходе из нее 6-7 ГПа), чем в АМц; 2) небольшая откольная прочность В<sub>4</sub>С 0,4-0,55 ГПа (в ~2 раза меньше, чем для АМц).

Измеренные величины  $\Delta b$  приведены в таблице. Погрешность  $\Delta b \pm 2,5$  мм.

Укорачивание ПЭ в зависимости от времени происходило по линейному закону  $\Delta b = U \cdot t$ ,  $U = 0,74 \pm 0,06$  мм/мкс (АМц);  $U = 0,58 \pm 0,10$  мм/мкс (В4С),  $t \leq 49,3$  мкс. Графически процесс укорачивания ПЭ изображен на рисунке.

Время движения преграды, мкс	Расстояние, пройденное преградой, мм	Укорачивание $\Delta b$ , мм	
		АМц	В <sub>4</sub> С
21,6±0,1	45	17,4	10,1
49,3±0,1	~90	33,2	27,2



Уменьшение высоты ПЭ в зависимости от времени



# Деформация ударников из АМц и В4С (двумерный расчет)

Расчет- 2D по программе СПРУТ. Реализована лагранжевая конечно-разностная схема.

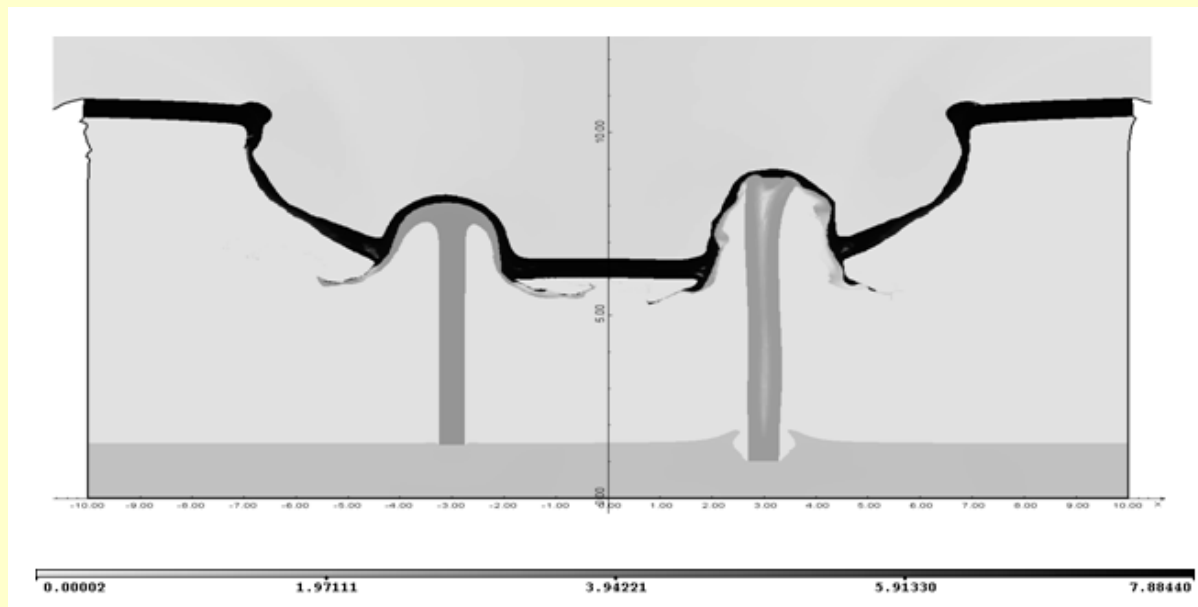
Продукты взрыва (ПВ) описывались уравнением состояния Куропатенко В.Ф.

При описании движения металлических элементов учитывалось влияние упругопластики (модель М. Уилкинса).

При описании разрушения использовалась модель мгновенного откола. Среда считается разрушенной при максимальном растягивающем значении  $s$  предела прочности  $\sigma_{кр}$ . Разрушение сопровождается сбросом напряжений и увеличением пористости при последующем расширении разрушенной среды.

Начальный сеточный интервал – 0.5x0.16мм в стальной пластине, 0.5x0.5 мм во всех остальных областях.

На момент времени 21.6 мкс получено следующее:



Распределение плотности

Напряженное состояние вещества описывается симметричным тензором напряжений

$$s_{ij} = -P\delta_{ij} + S_{ij},$$

где  $i, j = 1, 2, 3$  – индексы прямоугольной декартовой системы координат  $x_i$ ,  $S_{ij}$  – девиаторная часть тензора,  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера. Изменение девиатора тензора напряжений во времени подчиняется дифференциальным уравнениям в форме, аналогичной форме уравнений Прандтля-Рейса:

$$\dot{S}_{ij} + \lambda_s S_{ij} = 2\mu \dot{e}_{ij} + \omega_{ik} S_{kj} + \omega_{jk} S_{ki}$$

где

– субстанциональная производная  $S_{ij}$ ,  $m$  – модуль сдвига,  $l$  – скалярная диссипативная функция,  
– девиатор тензора скоростей деформаций,

$\dot{\omega}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  – тензор вращения,  $u_i$  – вектор массовой скорости

Модуль сдвига  $\mu$  изменяется с изменением температуры по закону:

$$\mu = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} K \left( 1 - \frac{T}{T_{пл}} \right)$$

где  $K$  – модуль всестороннего сжатия,  $\nu$  – коэффициент Пуассона при нормальных условиях,  $T_{пл}$  – температура плавления.

При моделировании предела текучести  $Y$  используется принцип сомножителей:

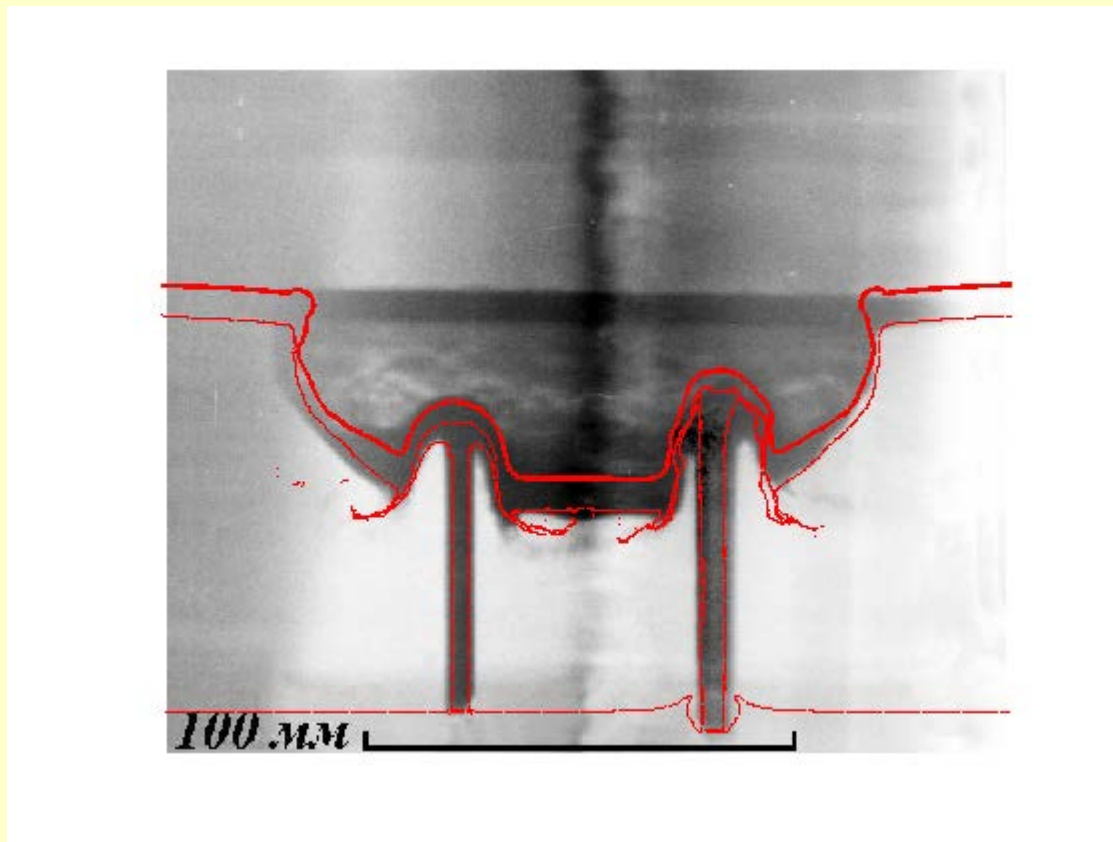
$$Y = Y_1(P)\eta(T)$$

Сомножитель  $Y_1(P)$  имеет вид: Сомножитель  $\eta(T)$  – убывающая до нуля функция температуры:

$$Y_1(P) = \begin{cases} Y_0 + \beta_0 P \left[ 1 - \frac{\beta_0 P}{4(A_0 - Y_0)} \right], & P\beta_0 < 4(A_0 - Y_0) \\ A_0, & P\beta_0 \geq 4(A_0 - Y_0) \end{cases}$$

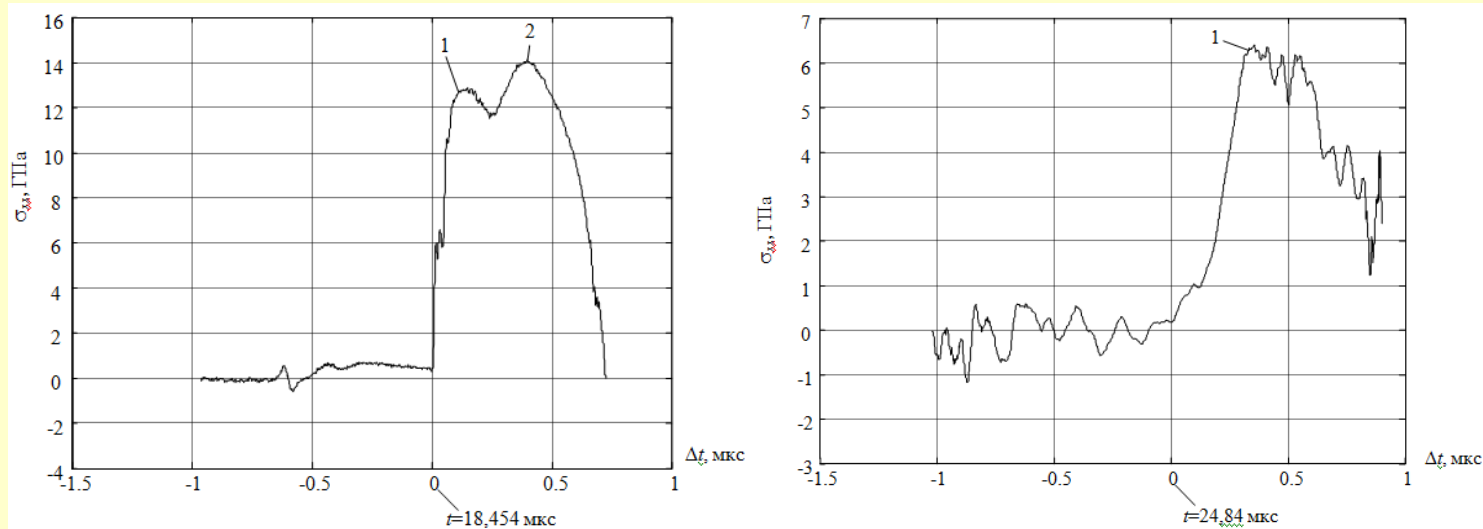
$$\eta(T) = \begin{cases} 0, & T \geq T_{пл} \\ 1 - \frac{T}{T_{пл}}, & T < T_{пл} \end{cases}$$

Сравнение результатов расчета и эксперимента на  $t=21,6$  мкс



## Затухание УВ в ПЭ из В<sub>4</sub>С (эксперимент)

Использовались манганиновая методика измерения давления УВ с погрешностью  $\pm 3\%$ .  
Графики  $\sigma_{xx}(t)$  приведены на рисунке (слева – вход УВ в пластину, справа – выход УВ из нее).



Профиль напряжения  $\sigma_{xx}(t)$ . Развёртка времени слева направо.

На нижнем рисунке представлен фрагмент алюминиевой опоры. Имеется след  $8,2 \times 91$  мм и глубиной 1-2 мм, оставленный торцевой поверхностью ПЭ. Наличие углубления свидетельствует о движении ПЭ (В<sub>4</sub>С) в продольном направлении.



# Пыление (эксперимент)

Обнаружен выброс частиц (пыление) со свободных поверхностей ПЭ из  $B_4C$ .

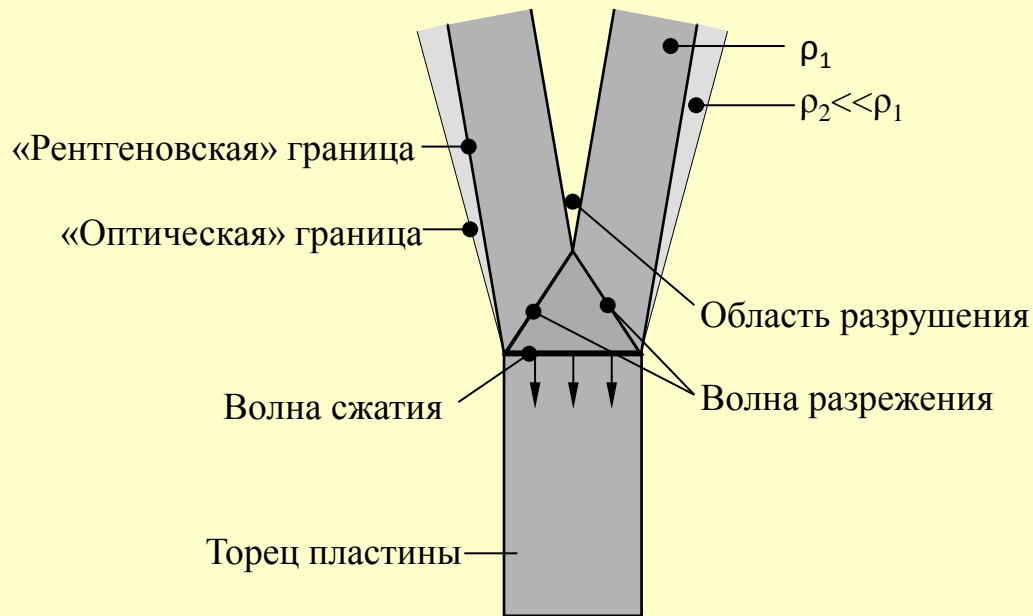


Схема продольного разрушения пластины

рентгенография

$$2\alpha=1,8^\circ, \quad U=0,22 \text{ мм/мкс},$$

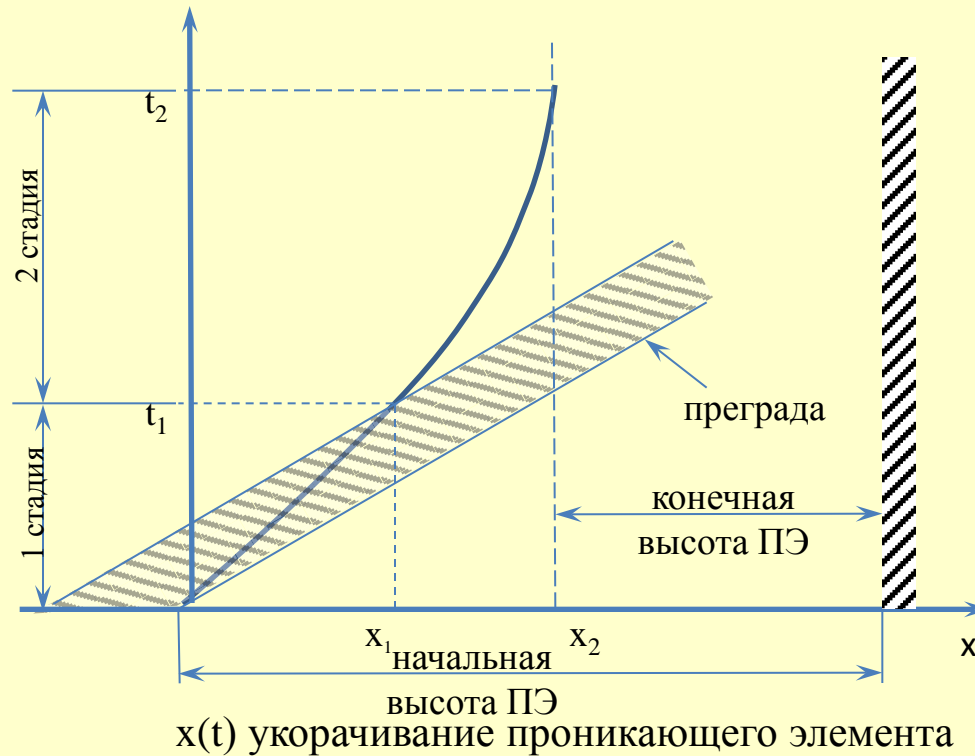
оптика

$$2\alpha=7,6^\circ, \quad U=0,92 \text{ мм/мкс}.$$

Область малой плотности, ограниченная «рентгеновской» и «оптической» границами прозрачная для рентгена и непрозрачная для оптики. Ее происхождение трактуется выбросом частиц с поверхности пластины при прохождении по ней УВ.

# Обсуждение

Двухстадийное укорачивание ПЭ изображено на диаграмме  $x(t)$  (рисунок).



Причина повышенного расхода ПЭ состоит в наличии инерционной стадии. По веществу ПЭ распространяется УВ убывающей амплитуды  $\sigma(x)$ , где  $\sigma$  – напряжение на фронте УВ,  $x$  – перемещение УВ в ПЭ. Вещество ПЭ переходит в новую фазу (с утратой прочности), в которой и остается продолжительное время. Расходным является вещество в новой фазе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подтвержден ранее установленный факт повышенного укорачивания ПЭ при проникании в преграду конечной толщины. Различие результатов эксперимента по сохранившимся образцам и оценки в гидродинамическом приближении составило  $\Delta b_э/\Delta b_p=2\dots4$  и более. Дано объяснение этому факту. Причиной является продолжение укорачивания ПЭ в инерционном режиме после сквозного пробоя, имеющего место в эксперименте/двумерном расчете и не учитываемое гидродинамической (одномерной) теорией.

Наличие инерционной стадии укорачивания ПЭ обусловлено переходом вещества проникателя в пластическое состояние в результате распространения по нему волны сжатия с напряжением на фронте порядка динамического предела текучести и пребывание в этом состоянии продолжительное время.

Результаты экспериментов по исследованию инерционной стадии полезны для опробования различных моделей прочности в расчетах.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**