

РФЯЦ-ВНИИТФ

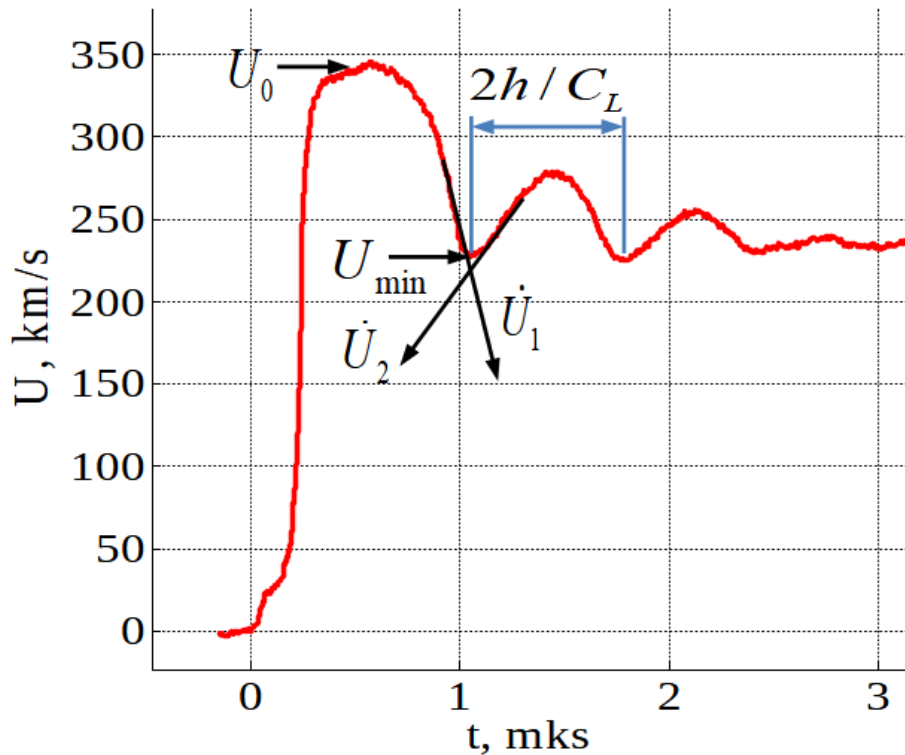
***О ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ
ОТКОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ПО ДАННЫМ
ИЗМЕРЕНИЙ НА КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ***

А.В. Красильников, В.Н. Ногин, Д.Т. Юсупов, А.А. Дегтярев, Д.Ю. Кадочников,
Н.С. Жилыева

Доклад на международной конференции «XVI ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ
ЧТЕНИЯ»

31 мая 2023

Оценка откольной прочности [1]



$$\sigma_{отк} = \frac{1}{2} \rho_0 C_0 (U_0 - U_{min} + \delta U), \quad (1)$$

$$\delta U = \left(\frac{h}{C_0} - \frac{h}{C_L} \right) \frac{|\dot{U}_1| \cdot \dot{U}_2}{|\dot{U}_1| + \dot{U}_2}$$

$$\delta \sigma = \frac{1}{2} \rho_0 c_0 \delta U \quad (2)$$

$$C_L = C_0 \quad \longrightarrow \quad \delta U = 0 \quad \longrightarrow \quad \sigma_{отк} = \frac{1}{2} \rho_0 C_0 (U_0 - U_{min}) \quad (3)$$

Цель доклада – оценка точности этих соотношений.



1. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах, «Янус-К», (1996).

Измерение откольной прочности нержавеющей стали 12Х18Н10Т

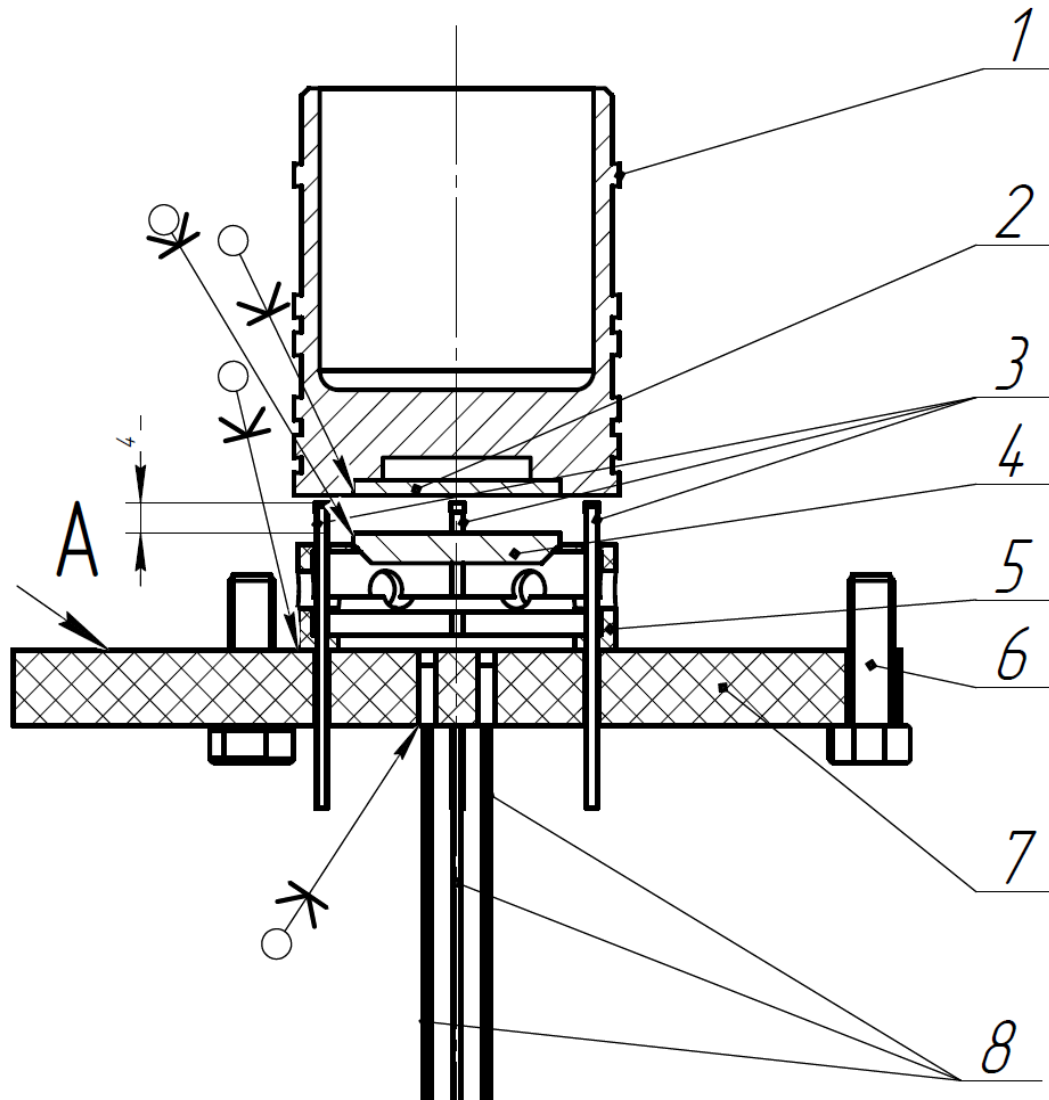
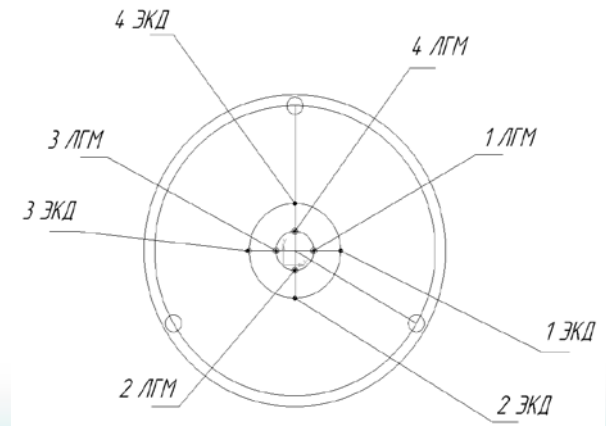
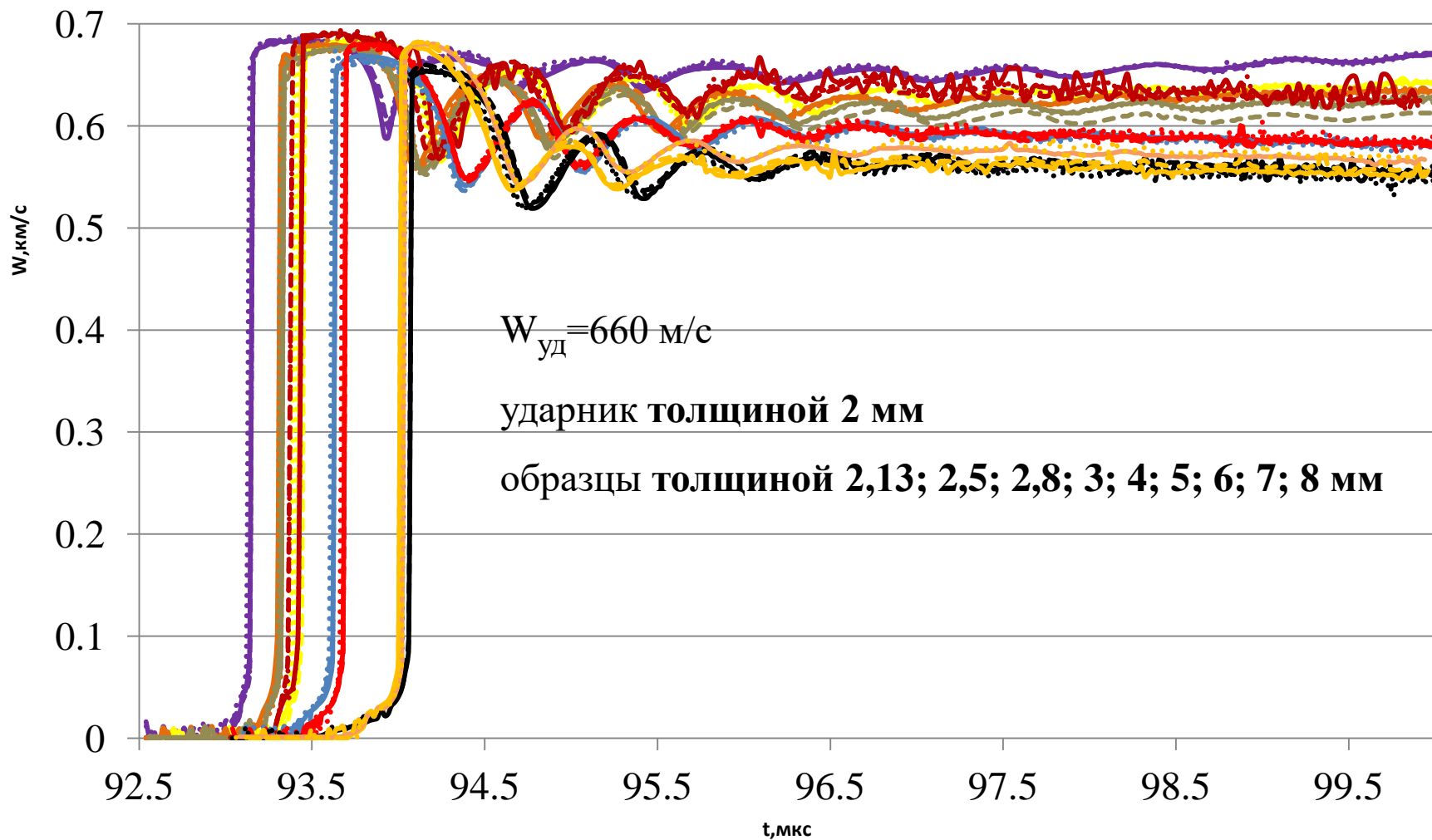


Схема измерительного узла

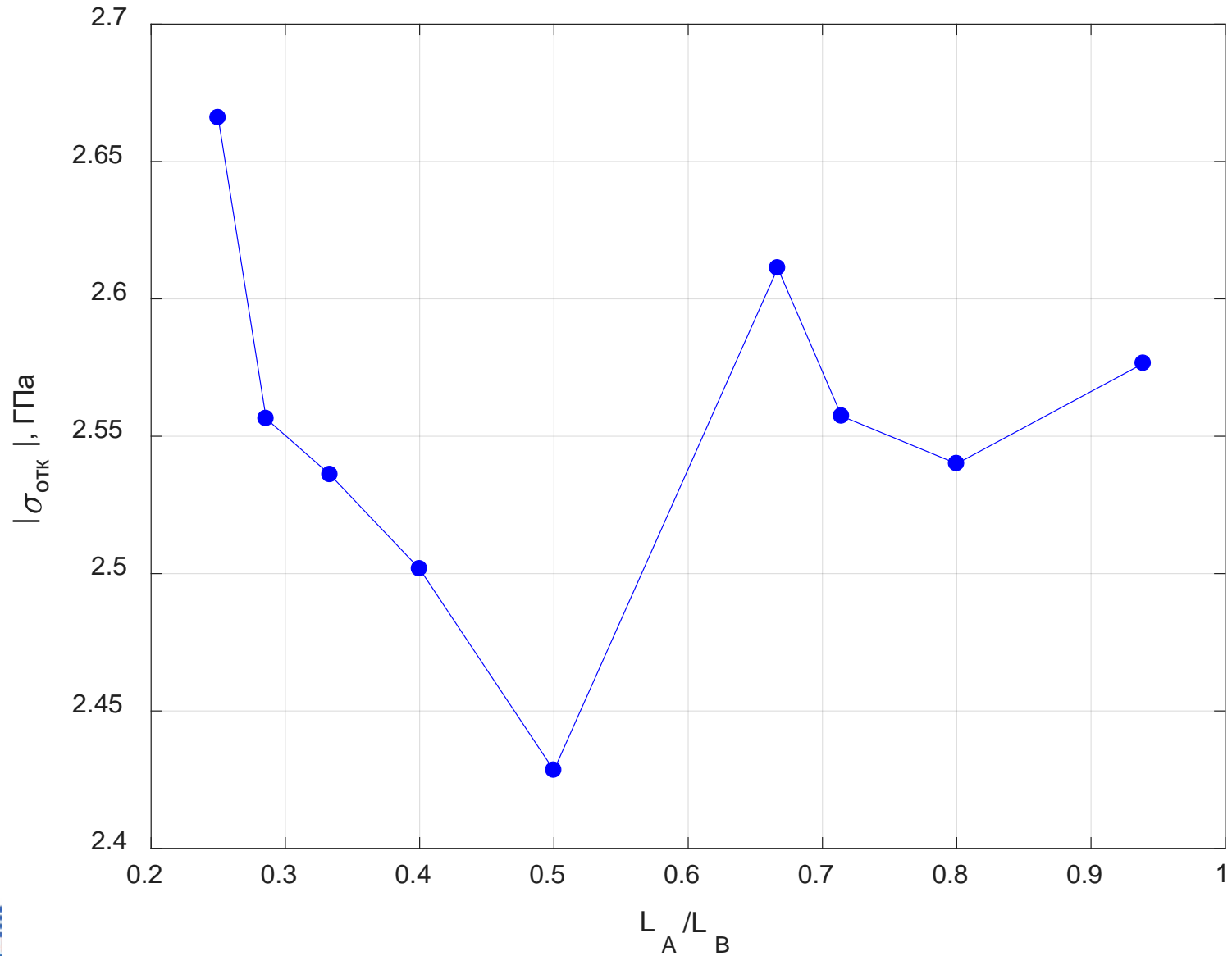
- 1 - поршень,
- 2 - ударник – сталь 12Х18Н10Т $\varnothing 28 \times 2$ мм,
- 3 - ЭКД колпачковые (4 шт.),
- 4 - образец – сталь 12Х18Н10Т $\varnothing 28 \times h$ мм,
- 5 - корпус,
- 6 - болт М6 на 20 - 3 шт,
- 7 - панель,
- 8 - датчики PDV



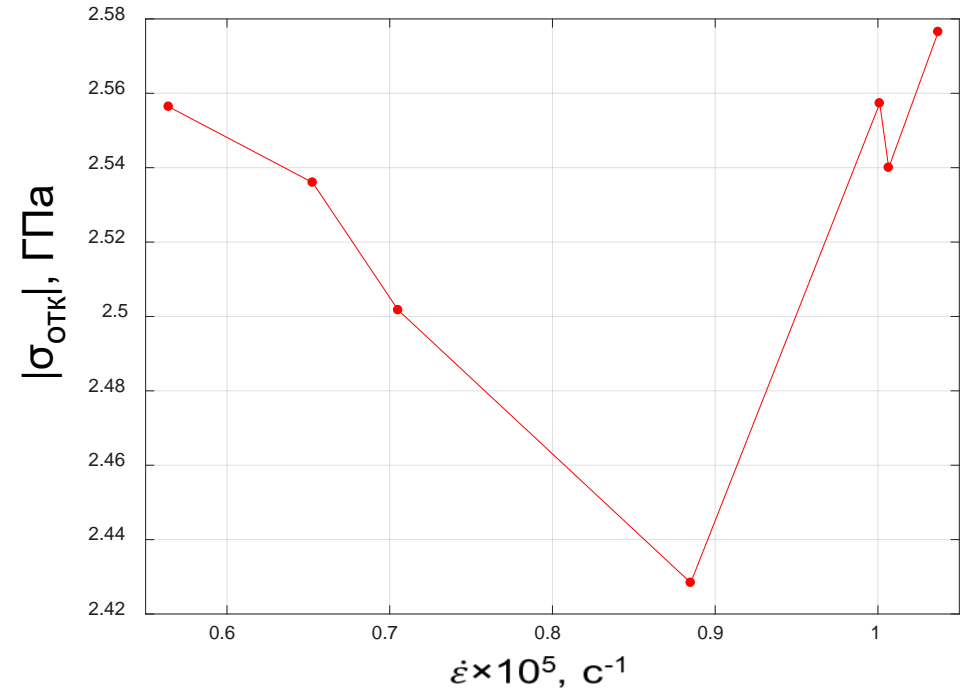
Сводные результаты экспериментов



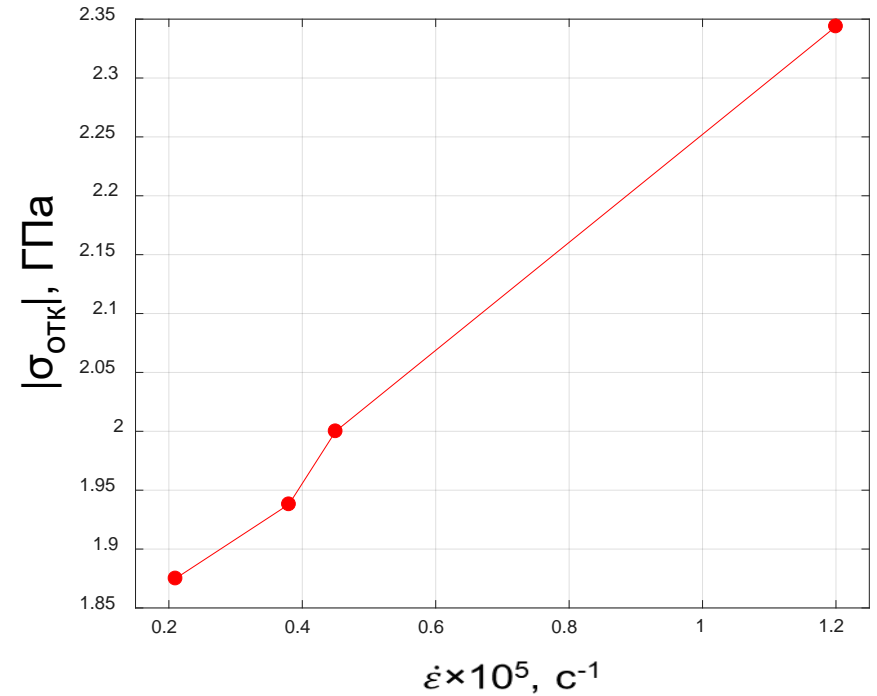
Оценка откольной прочности в опытах по формуле (1)



Зависимость откольной прочности в стали 12Х18Н10Т от скорости деформации



данная работа, оценка по формуле (1)

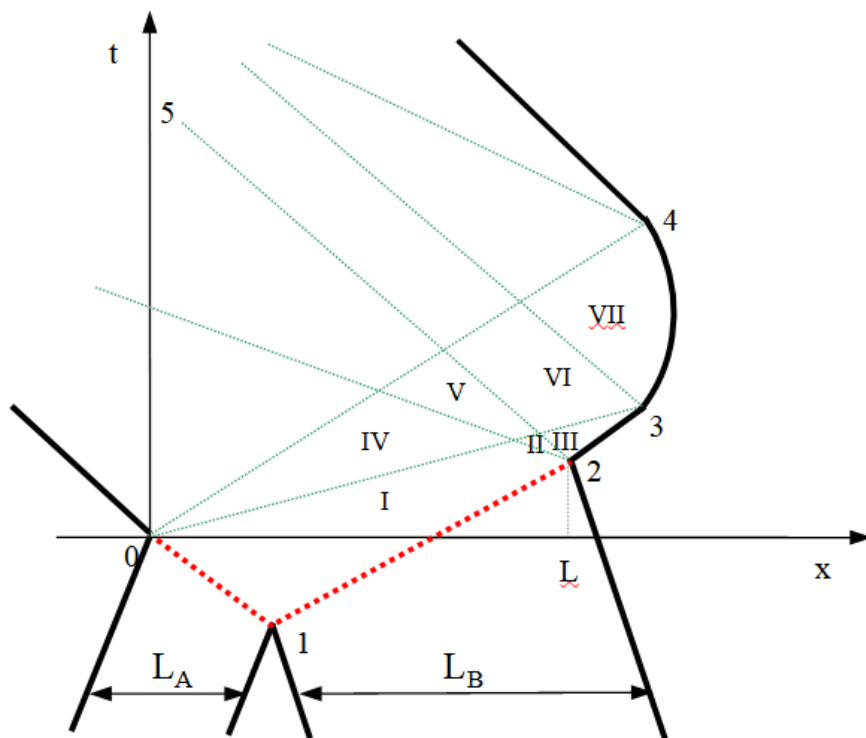


данные из работы [2]



2. Уткин А.В. Определение констант кинетики откольного разрушения материалов на основе экспериментальных данных. ПМТФ, т. 38, №6, с. 157-166, 1997.

Задача о столкновении пластин [3]



$$P = (\gamma - 1) \rho E + C_0^2 (\rho - \rho_0), \quad \gamma = 3$$

$$P = (P_1 + P_0) \left(\frac{C}{C_1} \right)^3 - P_0$$

$$C_1 = \left(3 \frac{P_1 + P_0}{\rho_1} \right)^{1/2} \quad P_0 = \frac{\rho_0 C_0^2}{3}$$

Граничные условия:

$$P = 0 \implies C_2 = C_1 \left(\frac{P_0}{P_1 + P_0} \right)^{1/3}$$

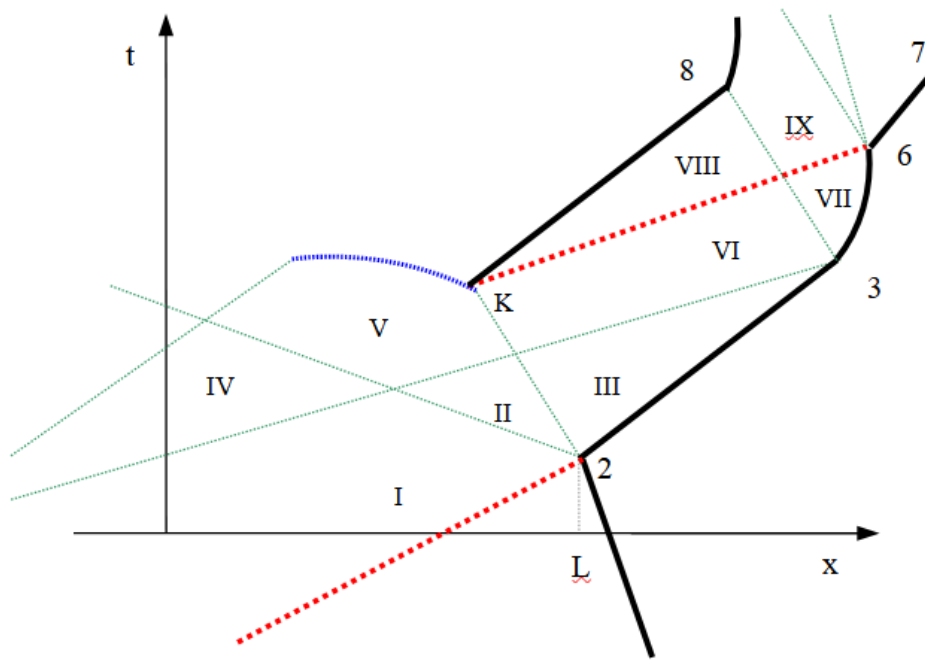
Красный пунктир – ударные волны, зеленый пунктир – характеристики, I – область покоя, III – область постоянного течения, II, IV – центрированные волны разрежения, V – область взаимодействия волн разрежения, VI – преломленная центрированная волна разрежения, VII – область взаимодействия преломленной центрированной волны со свободной границей.

Все характеристики – прямые линии!



3. Ногин В.Н. О гидродинамическом затухании плоской ударной волны произвольной амплитуды. Труды X Международной конференции “Забабахинские научные чтения”. Снежинск, 2010.

Откольное разрушение в задаче



акустическое приближение:

$$u - c = U_0 - C_2 = U_{отк} - C_2$$

$$U_{отк} = C_1 - C_2$$

$$u_{67} = U_0 = C_1 - C_2$$

$$t_2 = \frac{L_B - L_A}{D} \quad t_3 = \frac{L}{C_2} - t_2 \left(\frac{C_1}{C_2} - 1 \right)$$

$$u_{23} = U_0 = C_1 - C_2$$

$$\begin{cases} U_n(t) = C_1 - C_2 \left(1 - \ln \frac{t_3}{t} \right) \\ x_n(t) = C_1 t + C_2 t \ln \frac{t_3}{t} \end{cases}$$

При $P = P_k$ откол:

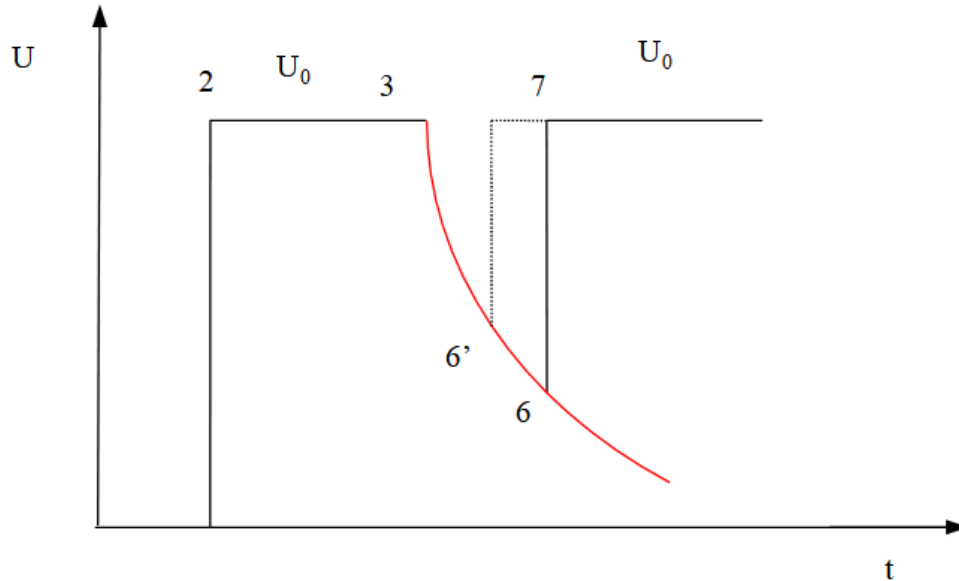
$$P = P_k \longrightarrow C_k = C_1 \left(\frac{P_k + P_0}{P_1 + P_0} \right)^{1/3}$$

с координатами:

$$\begin{cases} t_k = \frac{L + t_2 (2C_2 - C_1)}{2C_k} \\ x_k = (C_1 + 2C_k - 2C_2) t_k \end{cases}$$

Расчёт откольного сигнала

Первое приближение:



$$\begin{cases} x = (C_k + U_k) \cdot t = (C_1 + 2C_k - 2C_2) \cdot t \\ x(t) = C_1 t + C_2 t \ln \frac{t_3}{t} \end{cases}$$



$$U_0 - U_6 = U_0 - U_{\min} = 2(C_2 - C_k)$$

$$\frac{t_6}{t_3} = \exp\left(\frac{2(C_2 - C_k)}{C_2}\right) = \exp(2\Delta)$$

$$\Delta = 1 - \frac{C_k}{C_2} \ll 1 \quad \text{при} \quad -P_k \ll P_0$$



$$\sigma_{отк} = \frac{1}{2} \rho_0 C_0 (U_0 - U_{\min}) = \rho_0 C_0 (C_2 - C_k) \approx \rho_0 C_0^2 \Delta \approx -P_k$$

Расчёт откольного сигнала

Второе приближение:

$$\sqrt{\frac{t_k}{t_6}} = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{L + (2C_2 - C_1)t_2}{L + (C_2 - C_1)t_2}} \frac{e^{-2\Delta}}{1 - \Delta} \quad (4)$$

Следствие:

$$\Delta \approx -\frac{1}{3} \frac{P_k}{P_0} \ll 1$$

величина поправки слабо зависит от значения откольной прочности и определяется геометрией эксперимента!

Предельные случаи

Симметричный удар

$$t_2 = 0$$

$$\sqrt{\frac{t_k}{t_6}} = \sqrt{\frac{1}{2}}$$

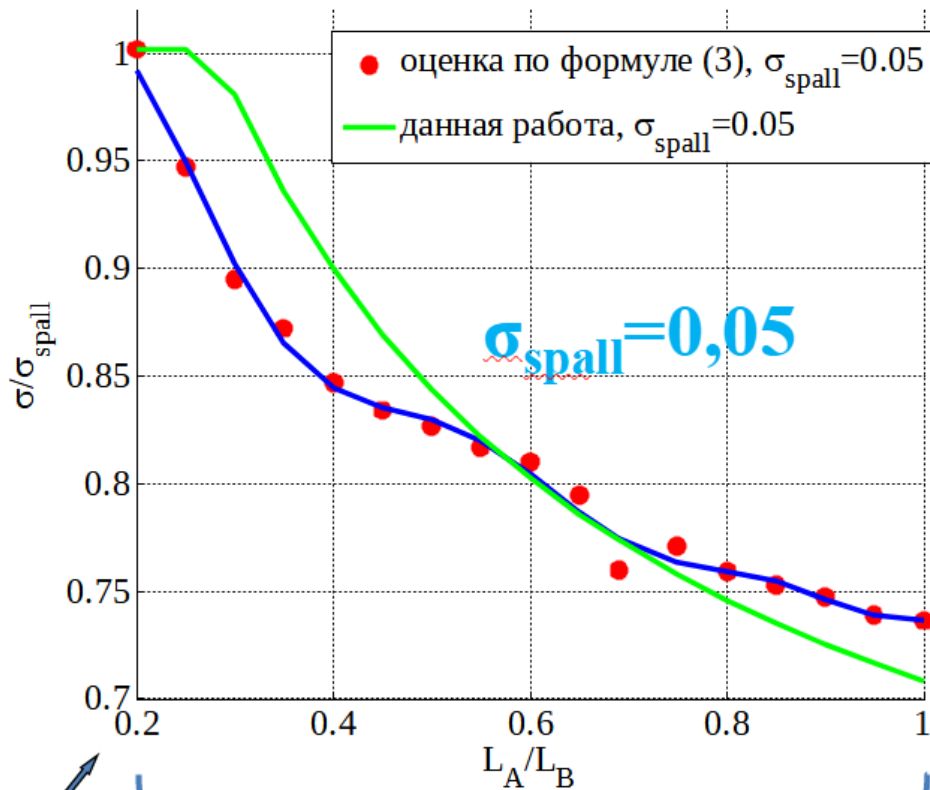
Треугольный профиль

$$t_2 = \frac{L}{C_1}$$

$$\sqrt{\frac{t_k}{t_6}} = 1$$

Расчётное моделирование столкновения, гидродинамическое приближение [4]

Расчёт задачи в той же постановке, «ВОЛНА» [5]



Таким образом,
значение
откольной
прочности,
полученное по
формуле (3),
меняется в
зависимости от
геометрии
эксперимента!

треугольный
импульс
нагрузки

платообразный
импульс нагрузки

4. Красильников А.В., Ногин В.Н. О точности определения величины откольной прочности по данным измерений на контактной поверхности. Труды XIII Международной конференции «Забабахинские научные чтения». Снежинск, 2017.

5. Куропатенко В.Ф., Коваленко Г.В. и др. Комплекс программ ВОЛНА и неоднородный разностный метод расчета движений сжимаемых сред. Вопросы атомной науки и техники, сер. Методики и программы численного решения задач математической физики, 1989, вып. 2, с. 9-25.



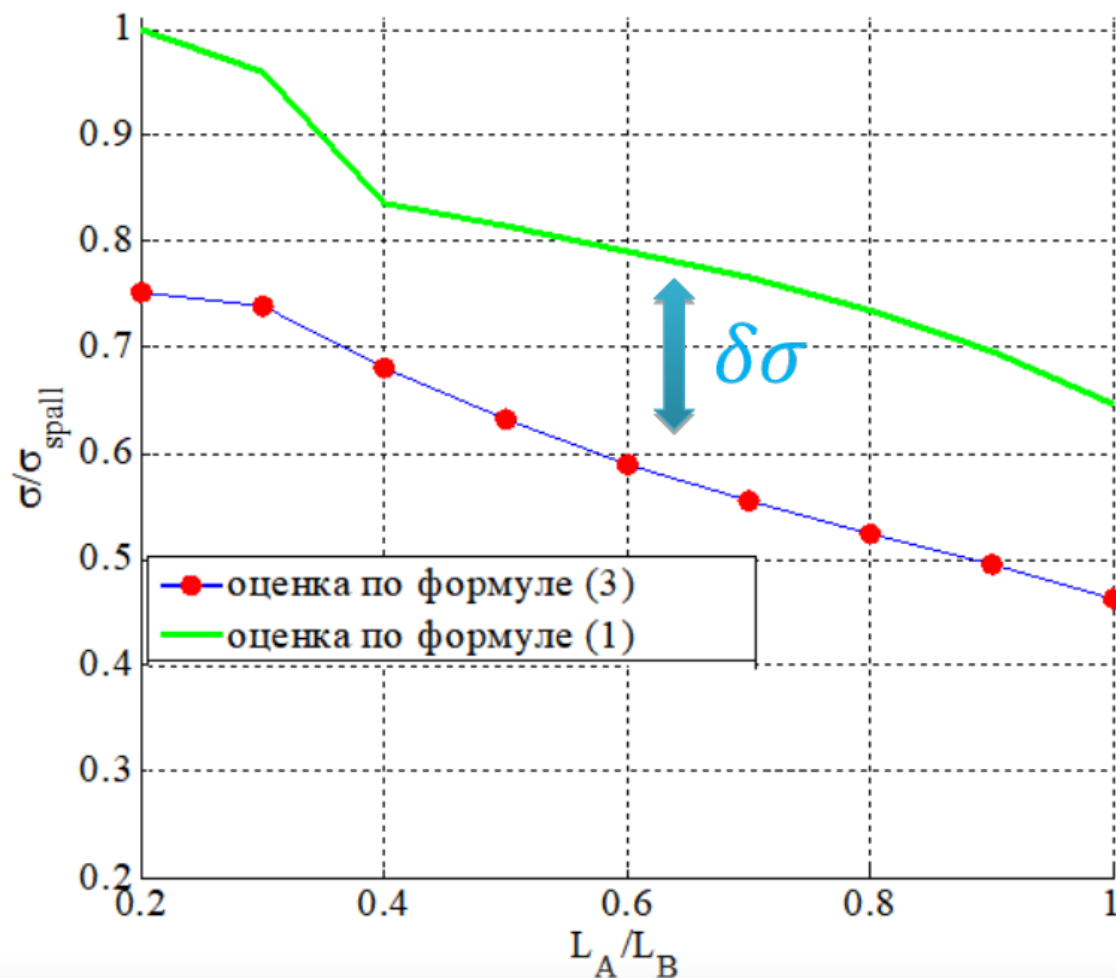
Моделирование с учётом упругопластических свойств

Задача о столкновении пластин 12X18H10T различной толщины

С табличным УрС и упругопластической моделью

$$\rho_0 = 7.89 \text{ г/см}^3$$

$$U = 350 \text{ м/с}$$



Предлагаемая поправка

$$K = \sqrt{2 \frac{1 + \left(\frac{c_0}{c_1} - 1\right) \cdot \frac{(1 - L_A / L_B) c_1}{(L_A / L_B + 1)(D - U_A)}}{1 + \left(2 \frac{c_0}{c_1} - 1\right) \cdot \frac{(1 - L_A / L_B) c_1}{(L_A / L_B + 1)(D - U_A)}}} \quad (5)$$

или, в упрощённом виде:

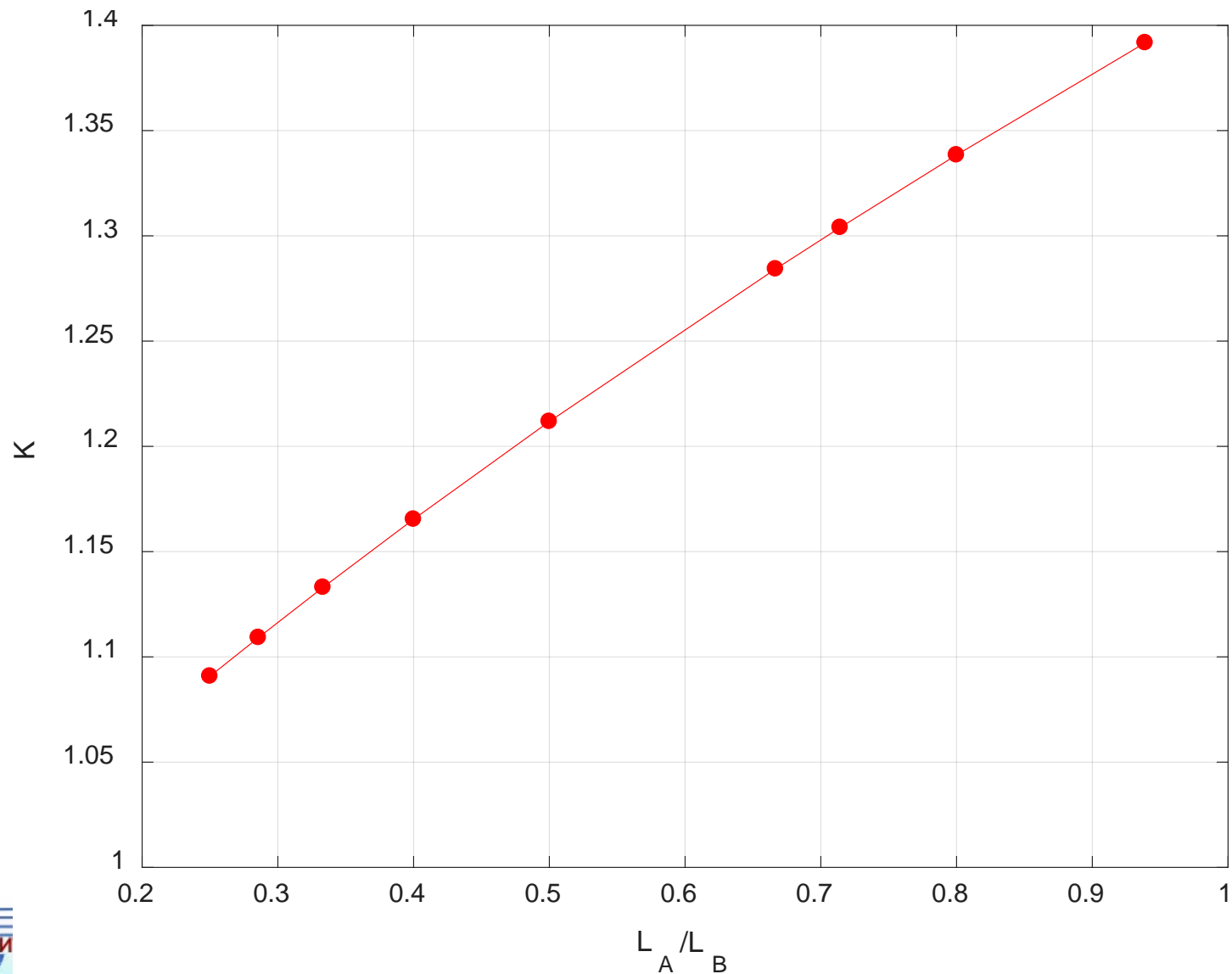
$$K = \frac{1 - \left(\frac{L_A}{L_B}\right)_*}{1 - \frac{L_A}{L_B} + \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{L_A}{L_B} - \left(\frac{L_A}{L_B}\right)_* \right)} \quad (6)$$

где $\left(\frac{L_A}{L_B}\right)_*$ – то значение, при котором на свободной поверхности исследуемого образца начинает реализовываться треугольный импульс ударной нагрузки.

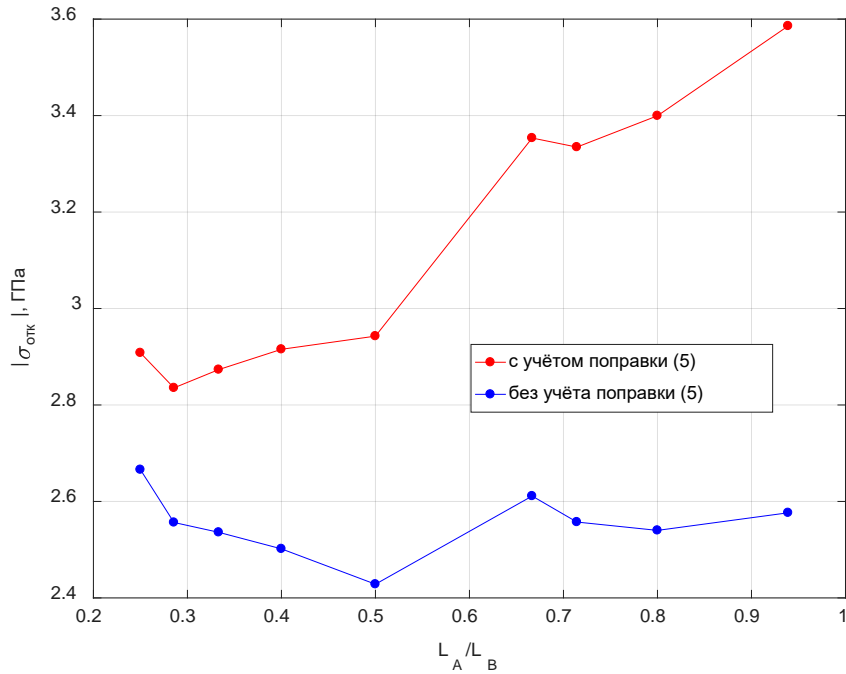
Таким образом, можно оценить $\sigma_{спал}$ по следующей формуле:

$$\sigma_{отк} = \frac{1}{2} \rho_0 C_0 (U_0 - U_{\min} + \delta U) \times K.$$

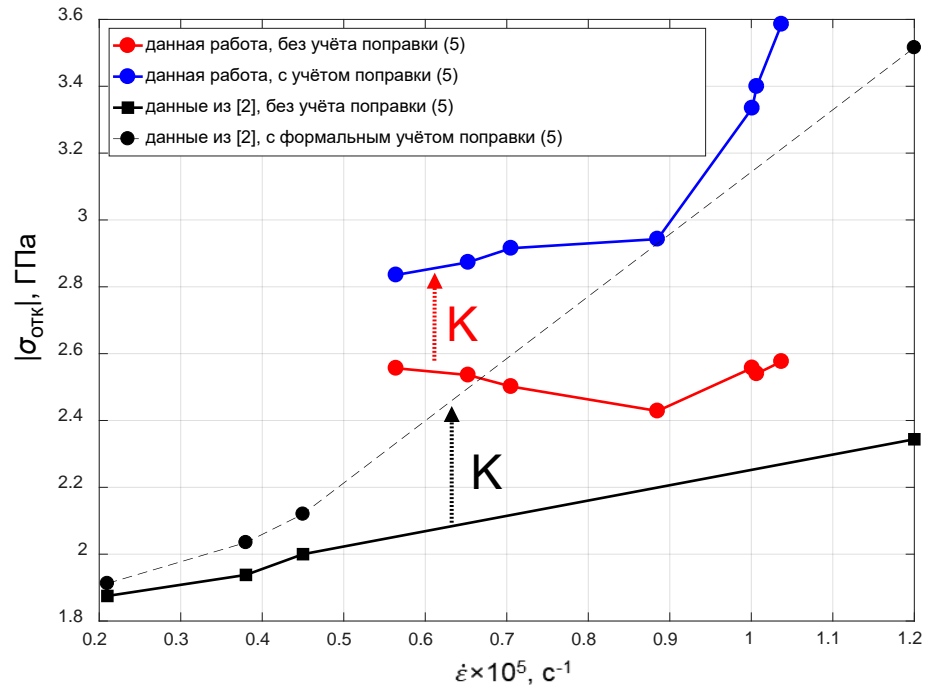
Величина поправки по формуле (5) в зависимости от соотношения толщин



Зависимость откольной прочности без учёта и с учётом поправки



от соотношения толщин



от скорости деформации



2. Уткин А.В. *Определение констант кинетики откольного разрушения материалов на основе экспериментальных данных.* ПМТФ, т. 38, №6, с. 157-166, 1997.

Заключение

На легкогазовой пушке проведены эксперименты по исследованию откольной прочности нержавеющей стали 12Х18Н10Т при различных соотношениях толщин ударника и образца.

При обработке экспериментов по стандартной формуле [1], учитывающей упругопластические свойства вещества, обнаружено, что откольная прочность не зависит от скорости деформации, что противоречит имеющимся данным.

Это связано с тем, что скорость откольного импульса выше, чем продольная скорость звука в веществе, чего не предполагается при получении стандартной формулы [1]. **Предположение о равенстве скорости звука** скорости этого импульса не приводит к искажениям только при треугольном нагружающем импульсе.

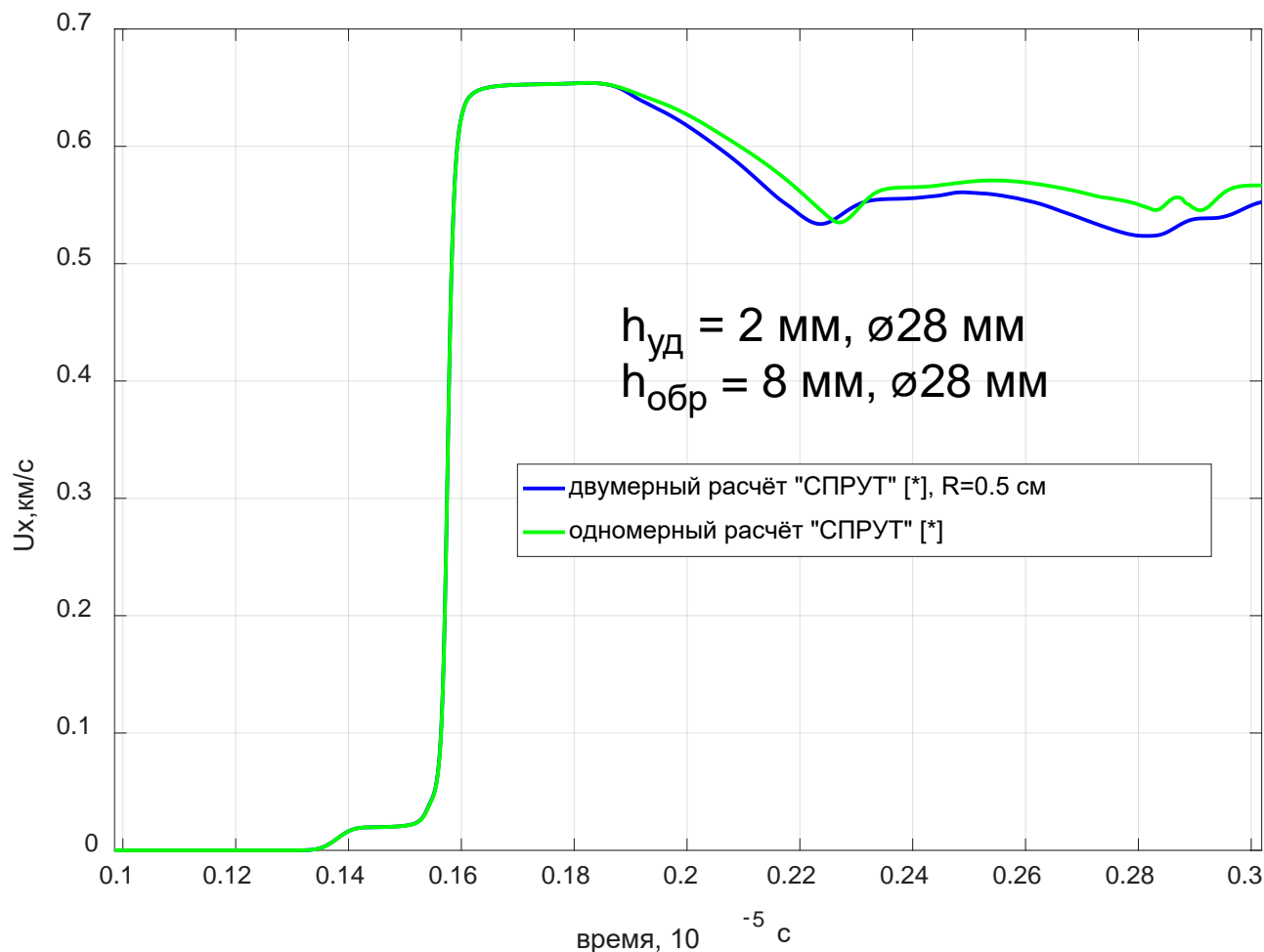
Предложена поправка к стандартной формуле [1], позволяющая адекватно учитывать указанный эффект. В итоге результаты обработки экспериментов из данной работы с учётом этой поправки находятся в согласии с ранее полученными экспериментальными результатами.

Спасибо за внимание!

Формула для определения скорости деформации

$$\dot{\varepsilon} = \frac{|\dot{U}_1|}{2c_0}$$

Сравнение одномерного и двумерного расчётов. Отсутствие влияния боковой разгрузки



* Быченков В.А., Гаджиева В.В. Метод СПРУТ расчёта одномерных неустановившихся течений разрушаемых сред // ВАНТ, сер. «Методики и программы численного решения задач математической физики», вып. 2(2), 1978.