



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



УДАРНАЯ СЖИМАЕМОСТЬ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК6

**Савенко Егор Михайлович^{1,2},
Д.Ю. Кадочников¹, А.А. Дегтярев¹, Е.Б. Смирнов^{1,2}, Д.Т. Юсупов¹, К.С. Сидоров¹**

¹ ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск

² Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск

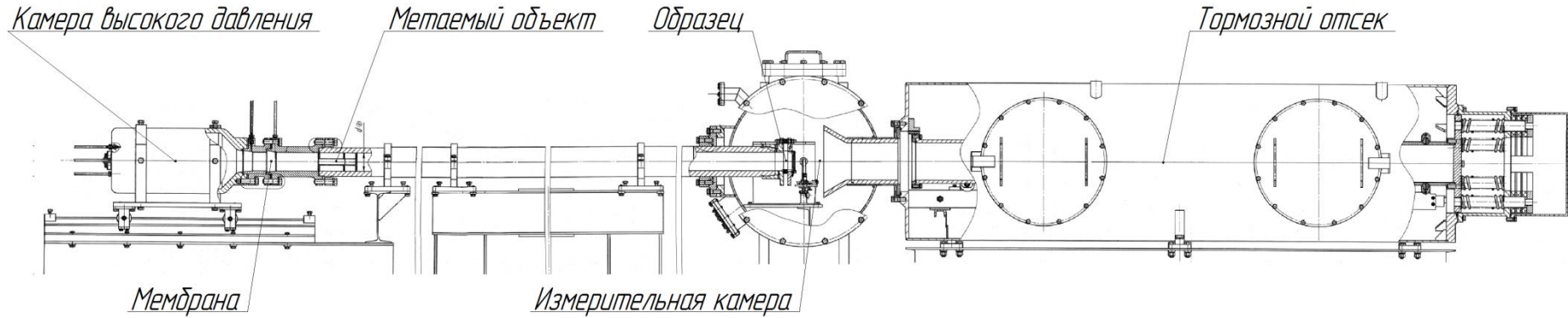
Актуальность: Одним из основных источников информации, используемой при построении уравнений состояний материала, являются экспериментальные данные по ударному сжатию сплошных веществ, которые определяют связь давления с плотностью и энергией, т.е. ударную адиабату. Сплав АК6 является широко используемым конструкционным материалом, ударная адиабата которого на сегодняшний день не определена.

Цель работы: определение ударной сжимаемости алюминиевого сплава АК6.

Поставленные задачи:

- выбор нагружающих устройств и методов исследования динамических свойств конструкционных материалов;
- проведение ударно-волновых экспериментов и обработка полученных результатов;
- анализ источников погрешностей и поиск способов повышения точности;
- построение ударной адиабаты смесевым методом.

Пневматическая баллистическая установка



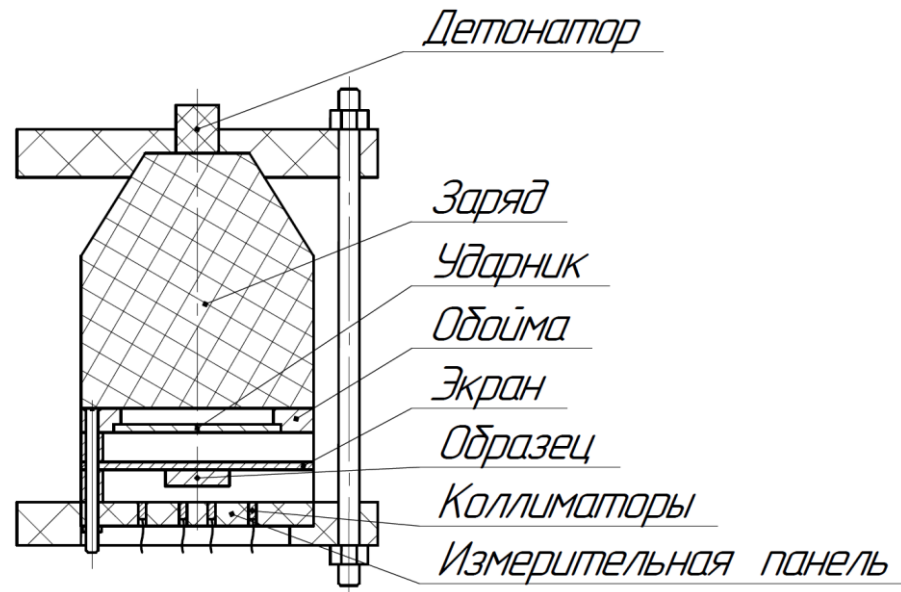
Основные факторы, влияющие на точность измерений:

- количество регистрирующих датчиков;
- временное разрешение методик регистрации;
- наличие вакуума в стволе;
- наклон ударника;
- обтюрация метаемого объекта.

Взрывное нагружающее устройство

Основные факторы, влияющие
на точность измерений:

- количество регистрирующих датчиков
- временное разрешение методик регистрации
- форма ударника
- однородность ударника



Постановка ударно-волнового эксперимента

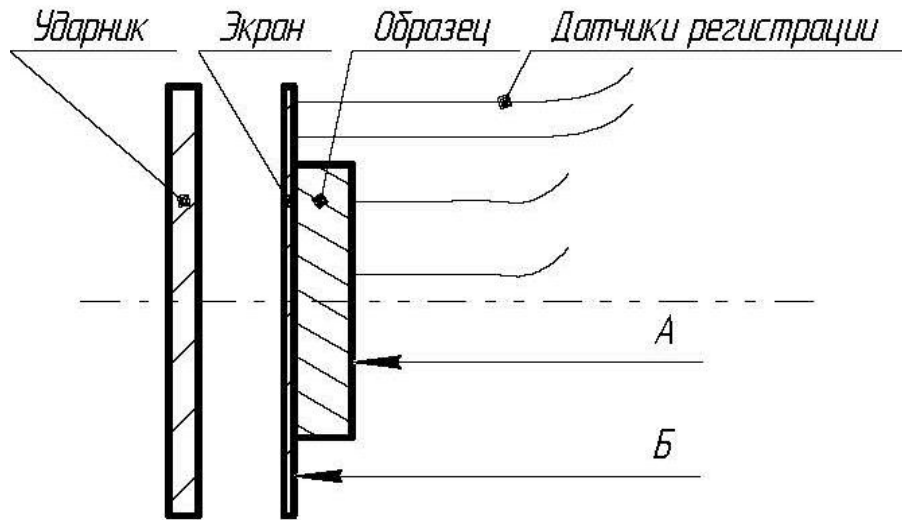
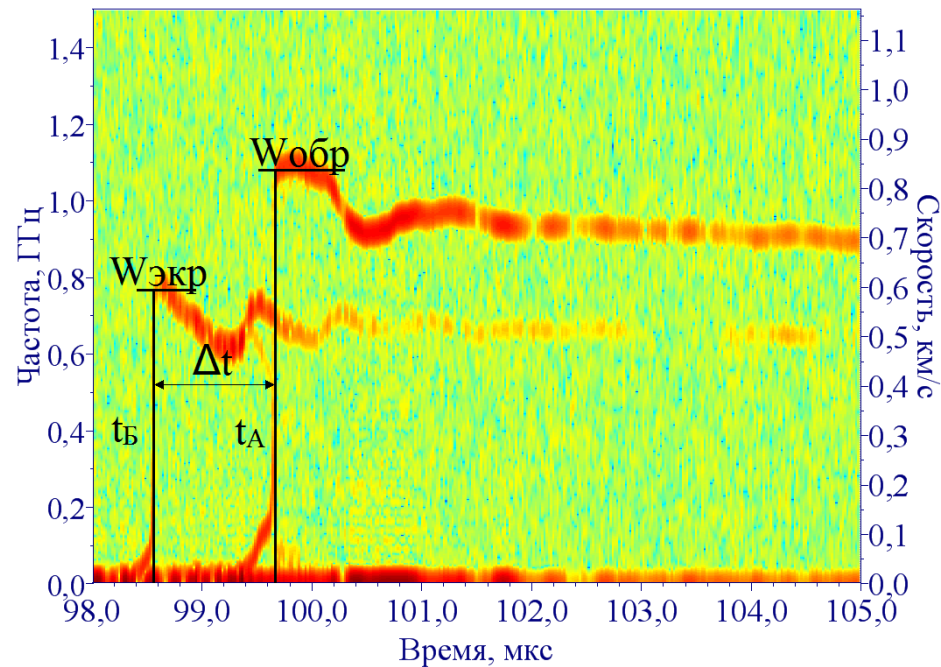


Схема эксперимента



$W_{\text{экp}}$, $W_{\text{обp}}$ – скорости свободных поверхностей экрана и образца,
 Δt – искомое время прохождения УВ через образец

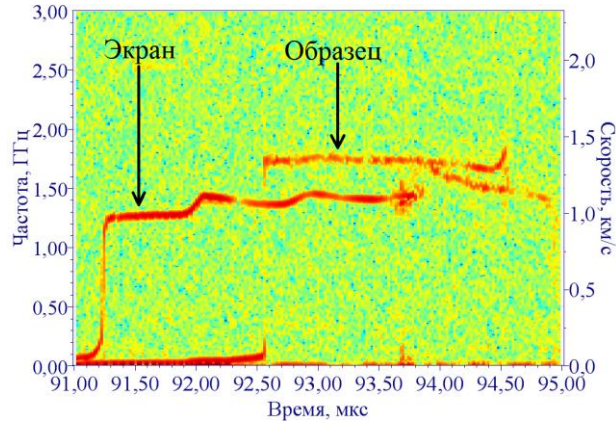
Спектрограмма

Исходные данные ударно-волновых экспериментов

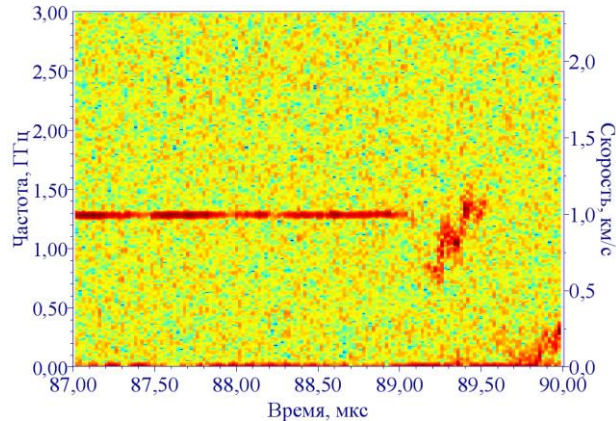


РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

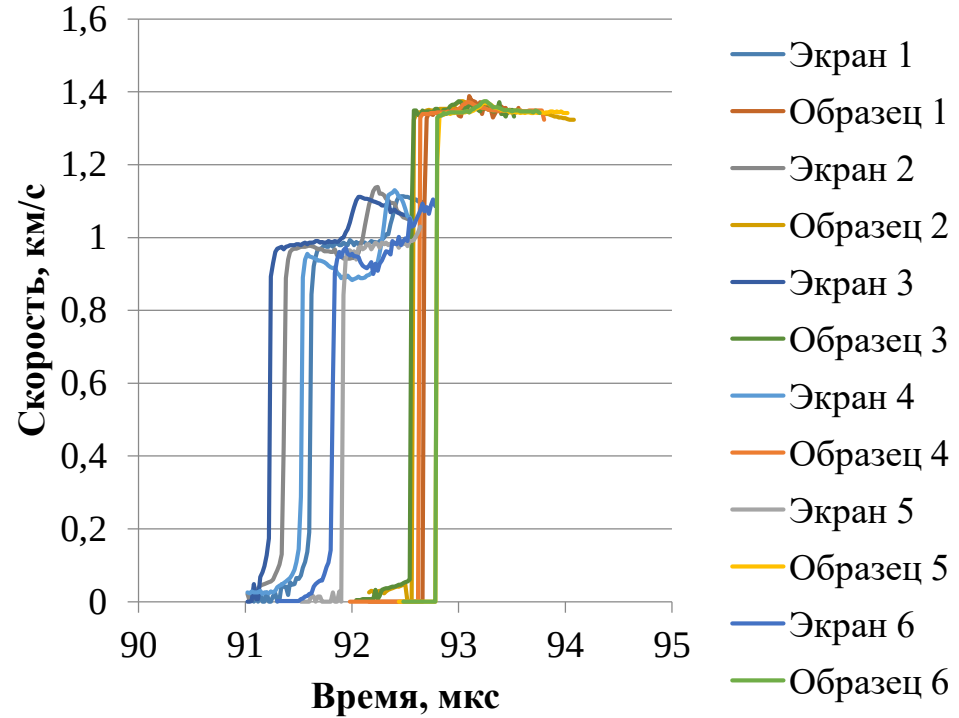
№ опыта	W, [км/с]	Образец	Экран	Ударник	Кол-во датчиков (экран/образец), шт
1	0,650	AK6 Ø 28×6 мм	12X18H10T Ø 42×1 мм	12X18H10T Ø42×3 мм	4 / 4
2	0,870		12X18H10T Ø 42×2 мм		
3	0,650				
4	0,997	AK6 Ø70×7 мм	12X18H10T Ø120×4 мм	12X18H10T Ø80×4 мм	6 / 6
5	2,64	AK6 3 шт Ø15×4 мм			9 / 6
6	2,67				3 / 3
7	3,54				6 / 6
8	3,58				8 / 8



Спектрограмма скоростей
свободных поверхностей экрана и образца



Спектрограмма
подлетной скорости ударника



Профили скоростей
свободных поверхностей

Метод учета влияния наклона ударника



РФЯЦ-ВНИИФ
РОСАТОМ

Расположение датчиков в плоскости XY , где R_1, R_2 – радиусы установки датчиков, φ – полярный угол

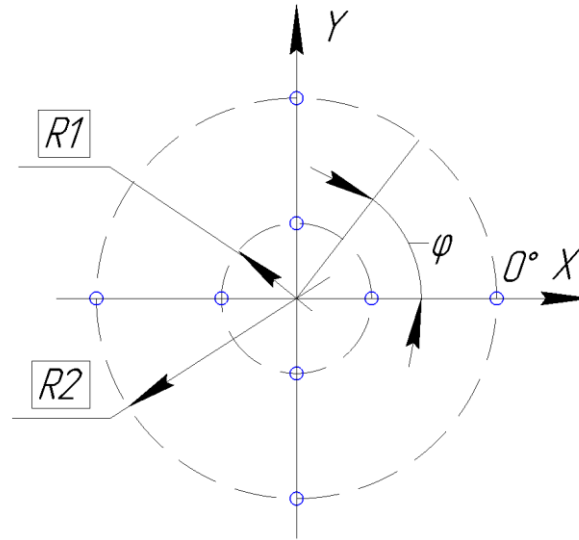
$$x_i = \cos(\varphi_i) \cdot R_i$$

$$y_i = \sin(\varphi_i) \cdot R_i$$

Координаты точек зондирования

x_i, y_i, z_i , где z – момент регистрации явления

$$z_i^0 = t_i$$



Уравнение аппроксимирующей плоскости:

$$z = Ax + By + C$$

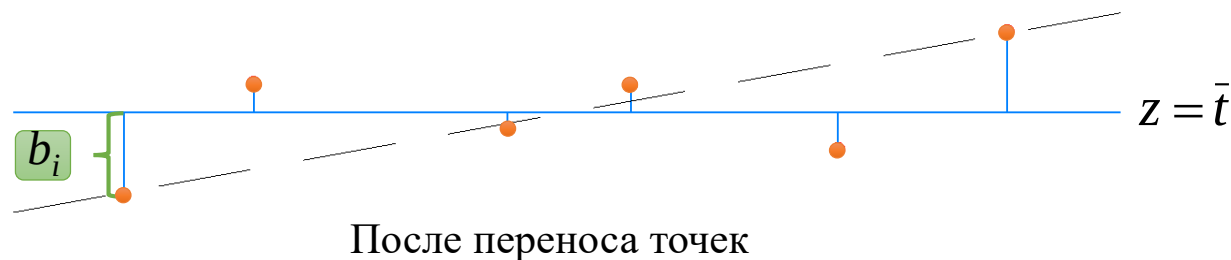
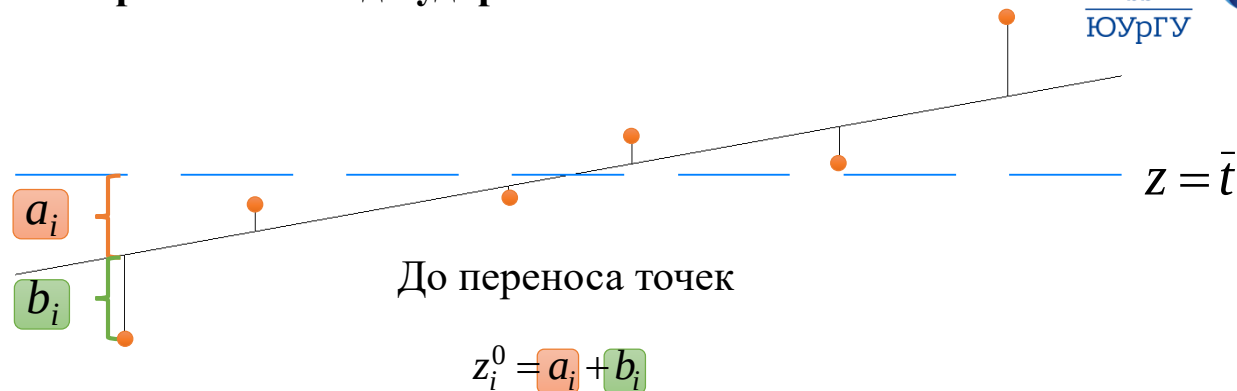
Угол наклона ударника (ударной волны) α :

$$\cos(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2 + 1}}$$

Наклон ударника как составляющая систематической погрешности регистрации момента времени выхода ударной волны



РФЯЦ-ВНИИФ
РОСАТОМ



- — точки зондирования
- — аппроксимирующая плоскость

$$z_i = b_i$$

a — систематическое отклонение, связанное с наклоном ударника
 b — неучтенное отклонение

Расчет погрешности прямого измерения времени прохождения ударной волны через образец [2]



РФЯЦ-ВНИИФ
РОСАТОМ

Среднее квадратическое отклонение среднего арифметического:

$$S_{\bar{t}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta t_i)^2}{n(n-1)}}$$

Доверительные границы случайной погрешности оценки измеряемой величины:

$$\varepsilon = t_{st} S_{\bar{t}}$$

Суммарное среднее квадратическое отклонение оценки измеряемой величины:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\Theta}^2 + S_{\bar{t}}^2}$$

Коэффициент в зависимости от числа НСП:

$$K = \frac{\varepsilon + \Theta_{\Sigma}}{S_{\bar{t}} + S_{\Theta}}$$

Границы погрешности оценки измеряемой величины:

$$\Delta_t = K S_{\Sigma}$$

Расчет погрешности косвенного измерения скорости ударной волны

Скорость ударной волны, где h – толщина образца, τ – время прохождения ударной волны через образец:

$$D = \frac{h}{\tau}$$

Предельная погрешность косвенного измерения скорости ударной волны:

$$\Delta D_{np} = k_{H3P} \sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial \tau} \cdot S_{\tau} \right)^2 + \left(\frac{\partial D^2}{\partial \tau} \cdot \frac{\Theta_{\tau}}{k_{\tau}} \right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial h} \cdot S_h \right)^2 + \left(\frac{\partial D^2}{\partial h} \cdot \frac{\Theta_h}{k_h} \right)^2}$$

где $k_{\tau,h}$ – коэффициент, зависящий от закона распределения погрешности ($k_{\tau,h} = 1,96$);

k_{H3P} – коэффициент НЗР погрешности измерений ($k_{H3P} = 1,96$);

$S_{\tau,h}$ – СКО случайных погрешностей результата измерений аргументов;

$\Theta_{\tau,h}$ – доверительные границы НСП.



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

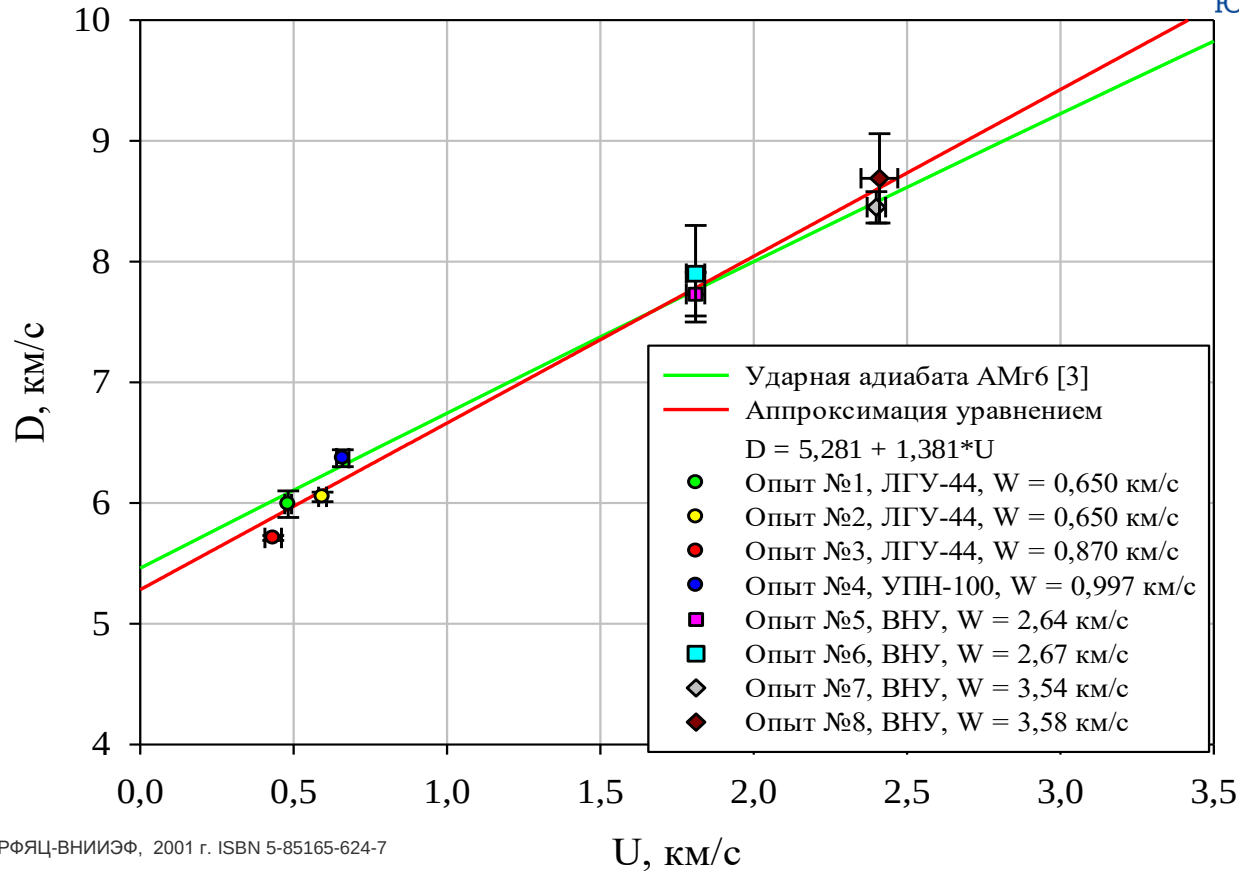
Результаты проведенных экспериментов



РФЯЦ-ВНИИФ
РОСАТОМ

№ опыта	W, [км/с]	P, [ГПа]	До учета наклона ударника		После учета наклона ударника		Коэффициент детерминации аппроксимации
			D, [км/с]	u, [км/с]	D, [км/с]	u, [км/с]	
1	0,650	$7,95 \pm 0,76$, $\varepsilon = 9,6\%$	$5,99 \pm 0,53$, $\varepsilon = 8,9\%$	$0,482 \pm 0,016$, $\varepsilon = 3,3\%$	$5,99 \pm 0,11$, $\varepsilon = 1,8\%$	$0,482 \pm 0,011$, $\varepsilon = 2,3\%$	0,96 / 0,97
2	0,870	$9,94 \pm 0,29$, $\varepsilon = 2,9\%$	$6,11 \pm 0,11$, $\varepsilon = 1,8\%$	$0,592 \pm 0,013$, $\varepsilon = 2,2\%$	$6,05 \pm 0,04$, $\varepsilon = 0,7\%$	$0,594 \pm 0,013$, $\varepsilon = 2,2\%$	0,93 / 0,99
3	0,650	$6,82 \pm 0,51$, $\varepsilon = 7,5\%$	$5,71 \pm 0,23$, $\varepsilon = 4,0\%$	$0,433 \pm 0,027$, $\varepsilon = 6,2\%$	$5,71 \pm 0,02$, $\varepsilon = 0,4\%$	$0,433 \pm 0,027$, $\varepsilon = 6,2\%$	0,99 / 0,92
4	0,997	$11,3 \pm 1,0$, $\varepsilon = 8,9\%$	$6,11 \pm 0,51$, $\varepsilon = 8,4\%$	$0,660 \pm 0,020$, $\varepsilon = 2,4\%$	$6,37 \pm 0,07$, $\varepsilon = 1,1\%$	$0,663 \pm 0,020$, $\varepsilon = 3,0\%$	0,99 / 0,98
5	2,64	$38,7 \pm 1,7$, $\varepsilon = 4,4\%$	$7,73 \pm 0,18$, $\varepsilon = 2,3\%$	$1,81 \pm 0,03$, $\varepsilon = 1,7\%$	Данные получены при уровне значимости $P = 0,95$ $Z = Ax + By + C$		
6	2,67	$39,5 \pm 2,5$, $\varepsilon = 6,3\%$	$7,90 \pm 0,40$, $\varepsilon = 5,1\%$	$1,81 \pm 0,03$, $\varepsilon = 1,7\%$			
7	3,54	$56,2 \pm 2,0$, $\varepsilon = 3,6\%$	$8,45 \pm 0,13$, $\varepsilon = 1,5\%$	$2,40 \pm 0,03$, $\varepsilon = 1,3\%$			
8	3,58	$57,8 \pm 2,8$, $\varepsilon = 4,8\%$	$8,69 \pm 0,37$, $\varepsilon = 4,3\%$	$2,41 \pm 0,06$, $\varepsilon = 2,5\%$			

Результаты проведенных экспериментов



Смесевой метод определения ударной адиабаты



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Аддитивное приближение [4]:

$$V(P) = \sum \alpha_i V_i(P),$$

где V – удельный объем смеси, V_i , α_i – удельный объем и массовая концентрация i -го компонента смеси, P – давление

Для алюминиевого сплава АК6 уравнение примет вид:

$$\begin{aligned} V(P) &= 0,0108 \cdot V_{Si} + 0,0027 \cdot V_{Fe} + 0,0213 \cdot V_{Cu} + 0,0068 \cdot V_{Mg} + 0,0007 \cdot V_{Zn} \\ &+ 0,00049 \cdot V_{Ti} + 0,00009 \cdot V_{Ni} + 0,95712 \cdot V_{Al} \end{aligned}$$

Смесевой метод определения ударной адиабаты



РФЯЦ-ВНИИФ
РОСАТОМ

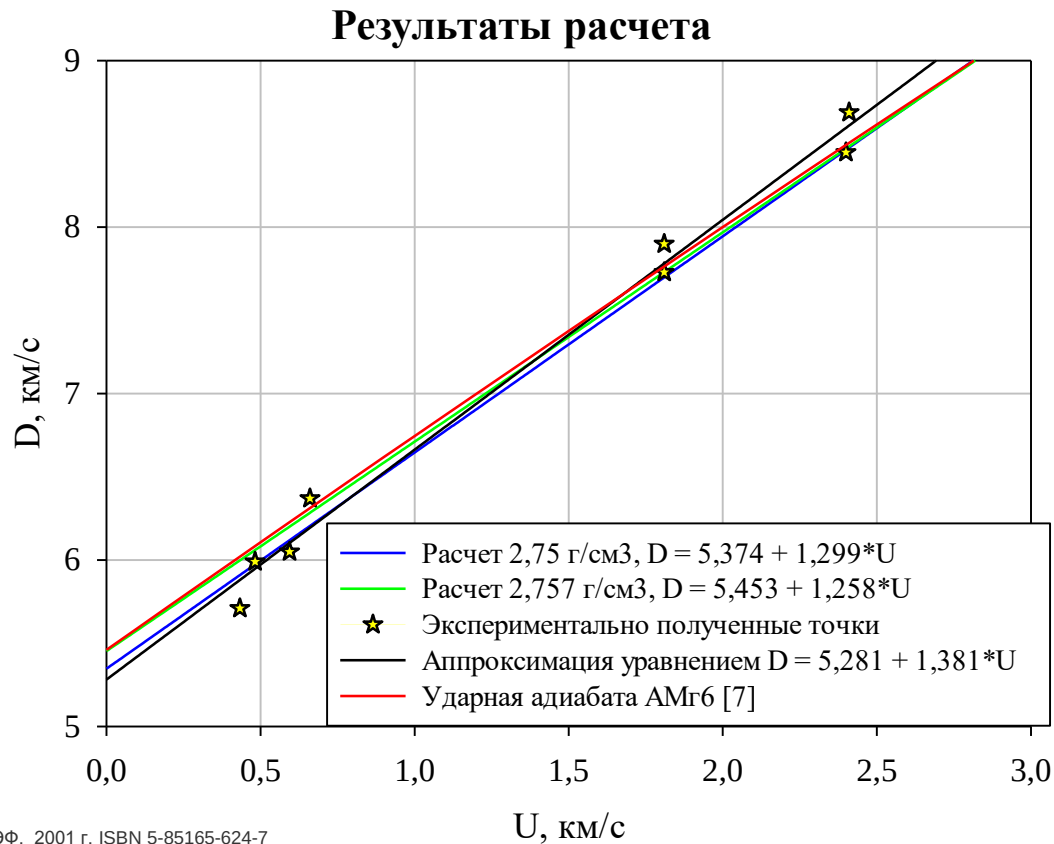
Химический состав алюминиевого сплава АК6

Компонент сплава	Массовая доля, [%] [5]	$D(U)$ [6]	ρ_0 , [г/см ³]
Алюминий (Al)	95,712	$5,333 + 1,356 \cdot U$	2,71
Кремний (Si)	1,080	$1,76 + 1,682 \cdot U + 0,0126 \cdot U^2$	2,36
Железо (Fe)	0,270	$3,664 + 1,790 \cdot U - 0,0342 \cdot U^2$	7,85
Медь (Cu)	2,130	$3,899 + 1,534 \cdot U - 0,0129 \cdot U^2$	8,93
Марганец (Mn)	0,068	$4,54 + 1,238 \cdot U$	1,74
Цинк (Zn)	0,007	$3,031 + 1,608 \cdot U - 0,0224 \cdot U^2$	7,14
Титан (Ti)	0,049	$4,842 + 1,135 \cdot U + 0,001 \cdot U^2$	4,50
Никель (Ni)	0,009	$4,501 + 1,627 \cdot U - 0,0264 \cdot U^2$	8,87

[5] – ГОСТ 4784-2019 Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые.

[6] – Трунин Р.Ф. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001 г. ISBN 5-85165-624-7

Смесевой метод определения ударной адиабаты



Заключение



РФЯЦ-ВНИИФ
РОСАТОМ

- Проведены эксперименты по определению ударной сжимаемости алюминиевого сплава АК6 с применением баллистических установок, взрывных устройств и лазерно-гетеродинной методики. Полученные результаты позволяют построить ударную адиабату сплава в диапазоне давлений 5-60 ГПа. Уравнение ударной адиабаты:

$$D = 5,281 + 1,381 \cdot U; R = 0,989$$

- Предложенный метод учёта систематической погрешности, связанной с наклоном ударника, позволяет существенно снизить погрешность определения скорости ударной волны. Преимуществом метода является невмешательство в постановку и ход эксперимента, что позволяет уточнить результаты уже проведенных экспериментов.
- Проведена оценка ударной сжимаемости алюминиевого сплава АК6 смесевым методом. Результаты расчета удовлетворительно согласуются с экспериментами. Метод оказался чувствительным к изменениям плотности сплава. Уравнение ударной адиабаты, рассчитанное смесевым методом:

$$D = 5,453 + 1,258 \cdot U; R = 0,998$$

Спасибо за внимание

Савенко Егор Михайлович

Магистрант Южно-Уральского государственного университета

21.05.2025