



Объединенный институт высоких температур  
ФИЦ Химической Физики РАН им. Н.Н.Семенова  
ФИЦ Проблем Химической Физики и МХ РАН  
НИЯУ МИФИ

Москва, Черноголовка

# ОСОБЕННОСТИ УДАРНОГО СЖАТИЯ НАНОРАЗМЕРНОГО НИКЕЛЯ

*FEATURES OF SHOCK COMPRESSION OF  
NANOSIZED NICKEL*

**А.Ю. Долгобородов**

**Т. А. Ростиллов, С.Ю. Ананьев, В. С. Зиборов, В.В. Якушев,  
М.Л. Кусков**

**Физико-химические превращения веществ при ударно-  
волновых воздействиях  
(ударно-индуцированные реакции)**



Воскобойников И.М.  
1934 – 2010

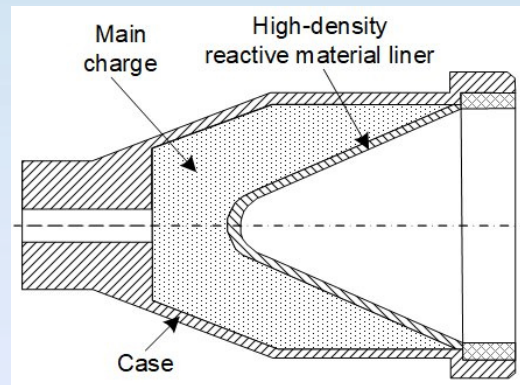
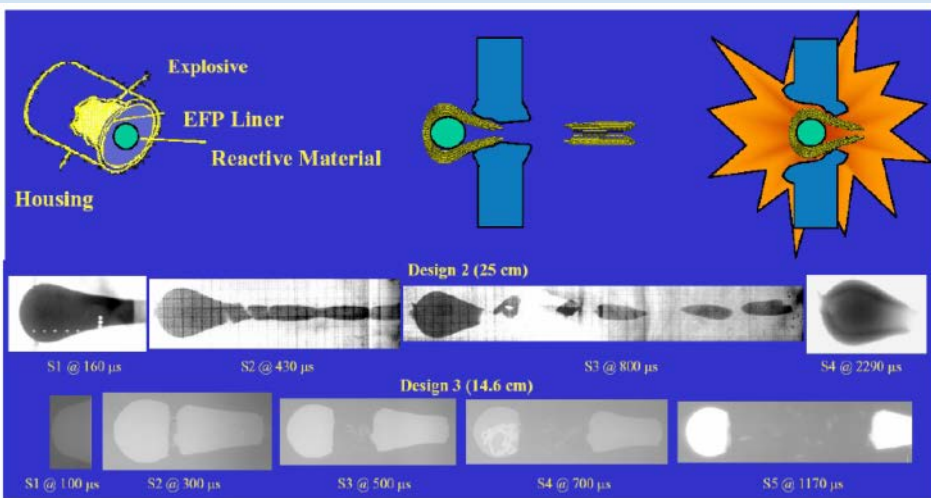


Фортов В.Е.  
1946 – 2020



Канель Г.И.  
1944 – 2021

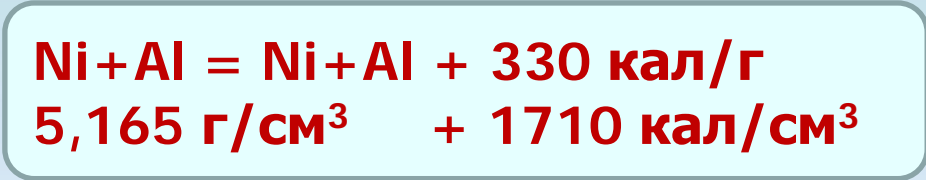
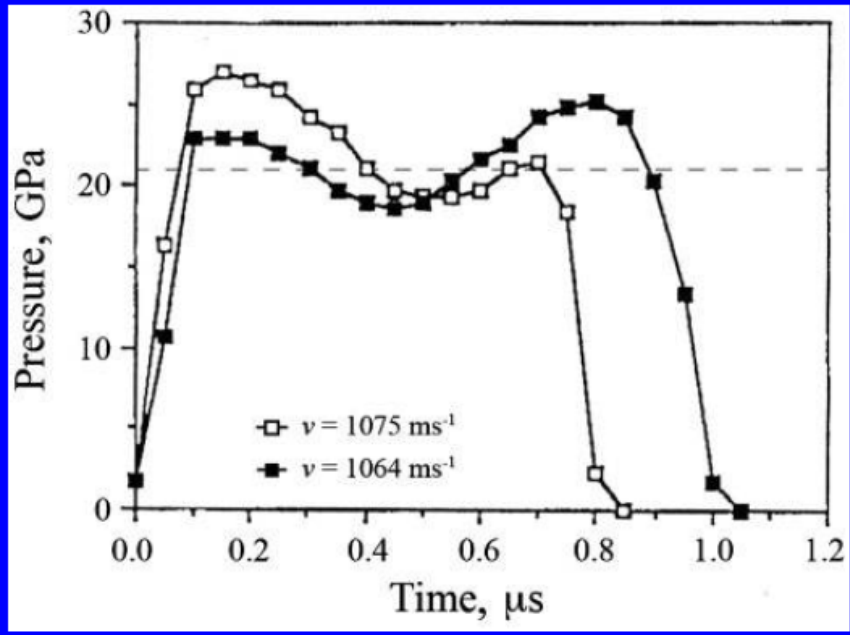
# HDRM высокоплотные реакционные материалы (High Density Reactive Materials)



*Penetration Behavior of High-Density Reactive Material Liner Shaped Charge // 2019 Materials 12(21):3486 H.Guo et al.*

HDRM обладает прочностью алюминиевых сплавов и плотностью мягкой низкоуглеродистой стали, что делает материал идеальной заменой обычной стали в снарядах. До выстрела компоненты оболочки боеприпаса остаются инертными. Зато при сильном механическом или тепловом воздействии осколки быстро сгорают или взрываются, высвобождая дополнительную энергию вдобавок к кинетической. Поражающая способность боеголовок с HDRM, может увеличиваться в несколько раз по сравнению с традиционными боеприпасами



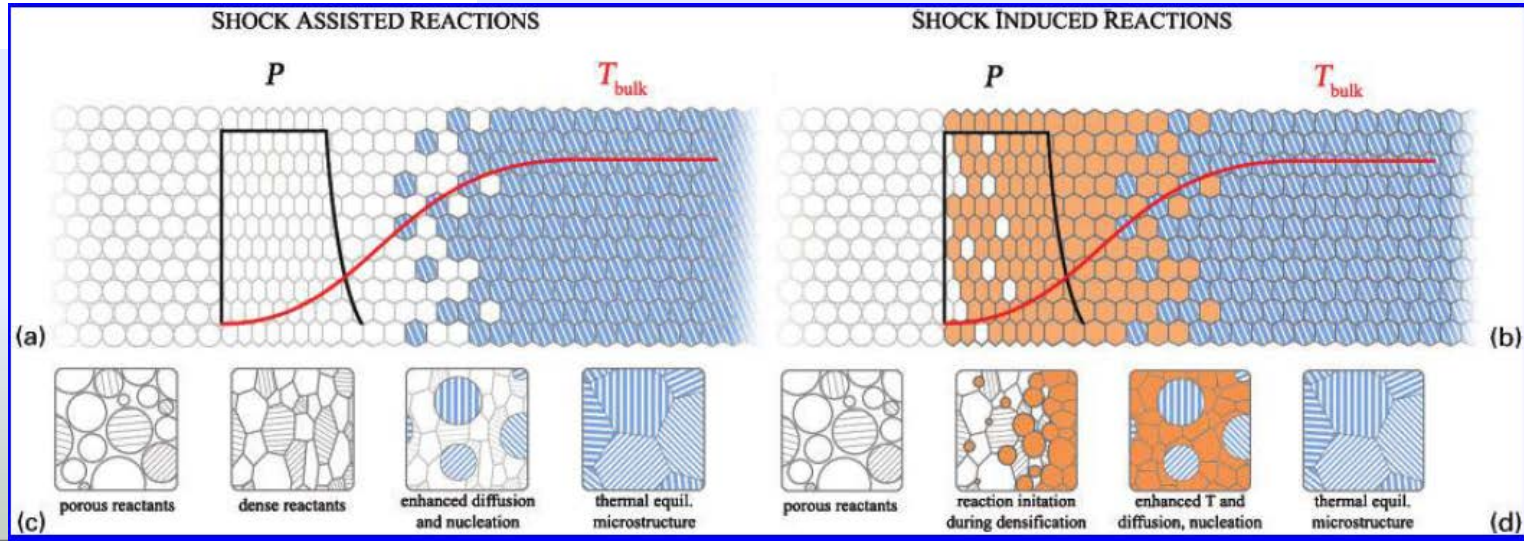


### Shock compression of reactive powder mixtures

D. E. Eakins and N. N. Thadhani\*

International Materials Reviews 2009

17 Time resolved stress traces recorded in a Ni+Al mixture at two impact velocities  $v$ . Pressures in excess of those expected for an inert material were observed in both experiments shown. The expected inert pressure was  $\sim 21$  GPa for the closed and open data set, as shown by the dashed line (adapted from Bennett *et al.*<sup>104</sup>)



**Ударная сжимаемость смесей никеля и алюминия из микро- и наноразмерных порошков // Физика горения и взрыва. – 2018. – Т. 54, № 5.**

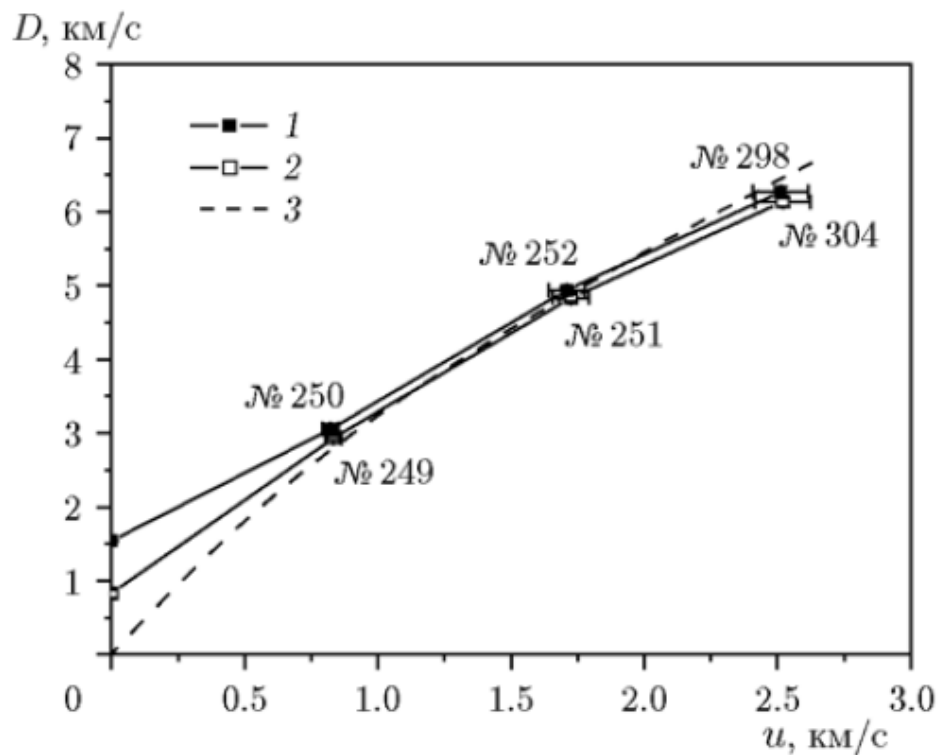


Рис. 3. Ударные адиабаты смесей в координатах  $D-u$ :

1 — нанодисперсная смесь, 2 — микродисперсная смесь, 3 — расчетная ударная адиабата смеси

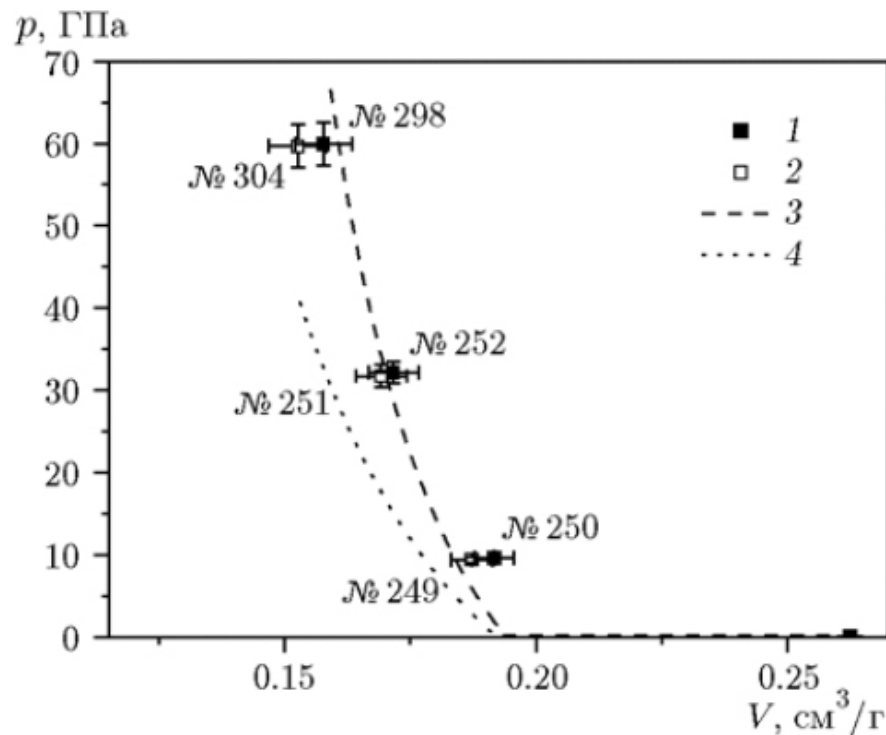
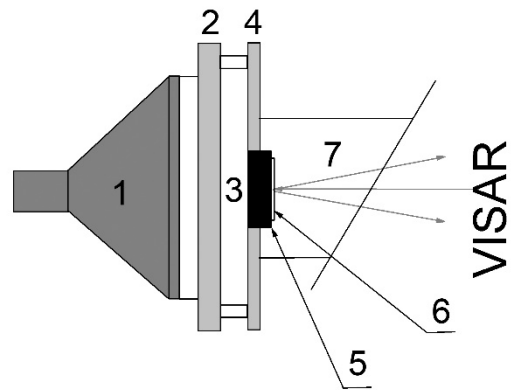


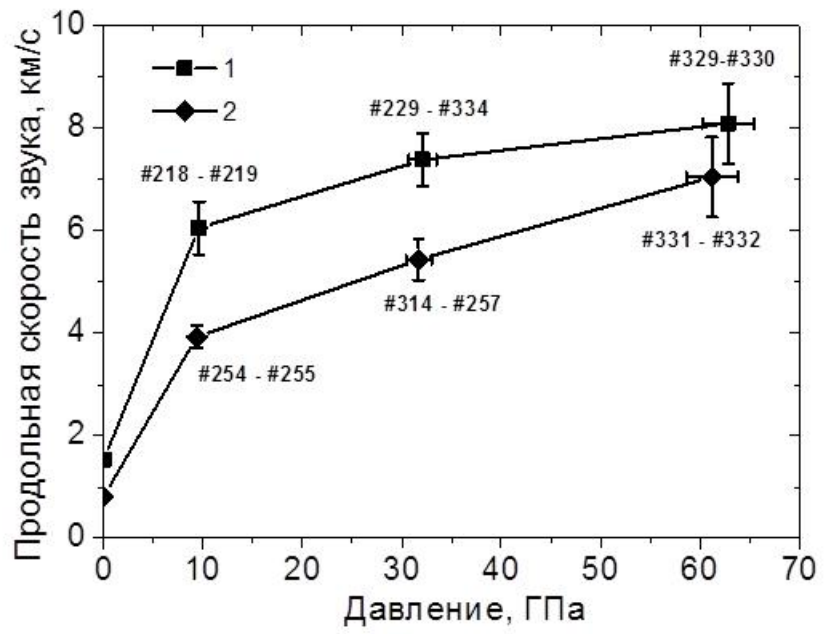
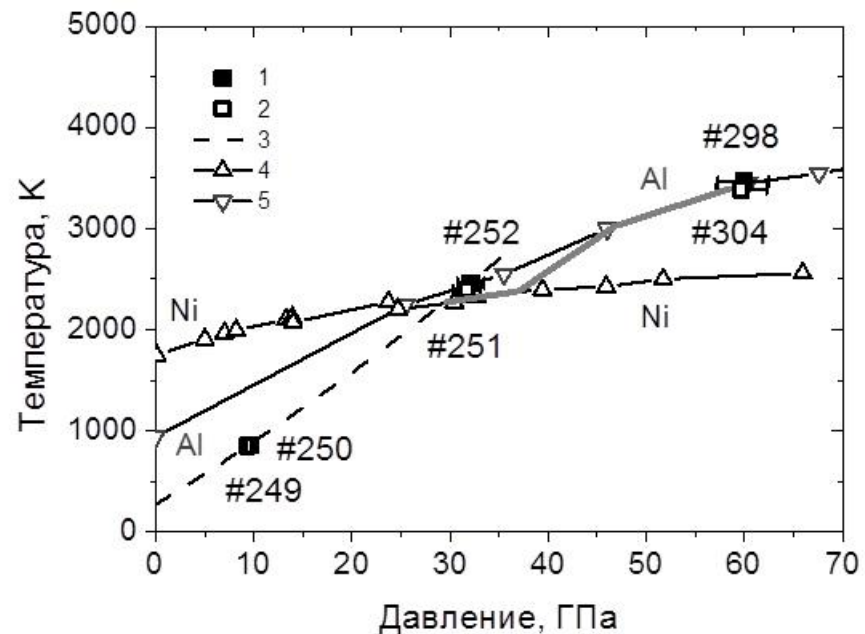
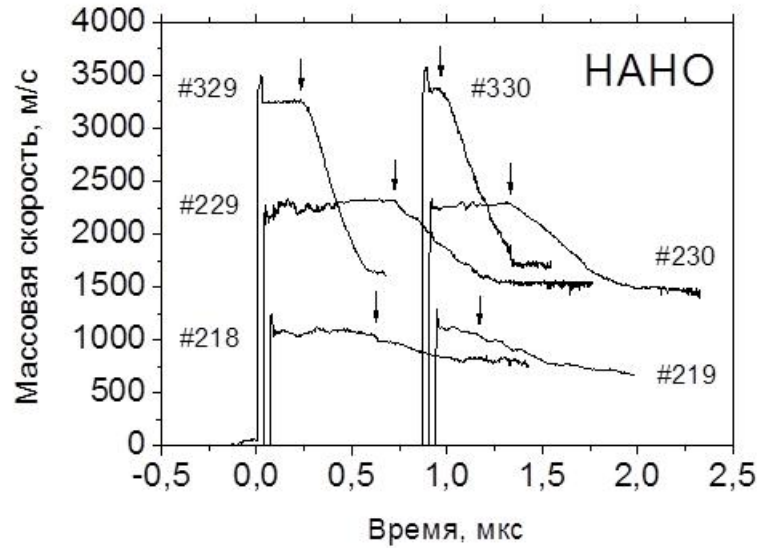
Рис. 4. Ударные адиабаты смесей в координатах  $p-V$ :

1 — нанодисперсная смесь, 2 — микродисперсная смесь, 3 — расчетная ударная адиабата смеси, 4 — кривая холодного сжатия смеси

**СКОРОСТЬ ЗВУКА В УДАРНО СЖАТЫХ ОБРАЗЦАХ ИЗ СМЕСИ  
МИКРО- И НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ НИКЕЛЯ И  
АЛЮМИНИЯ. ФГВ, 2019, №6**



$$C = \frac{HC_f D_f (D_s - u)}{HC_f D_f - h_f D_s (C_f + u + D_f - v_f)}$$



$$P = \rho_{00} \times D \times u$$

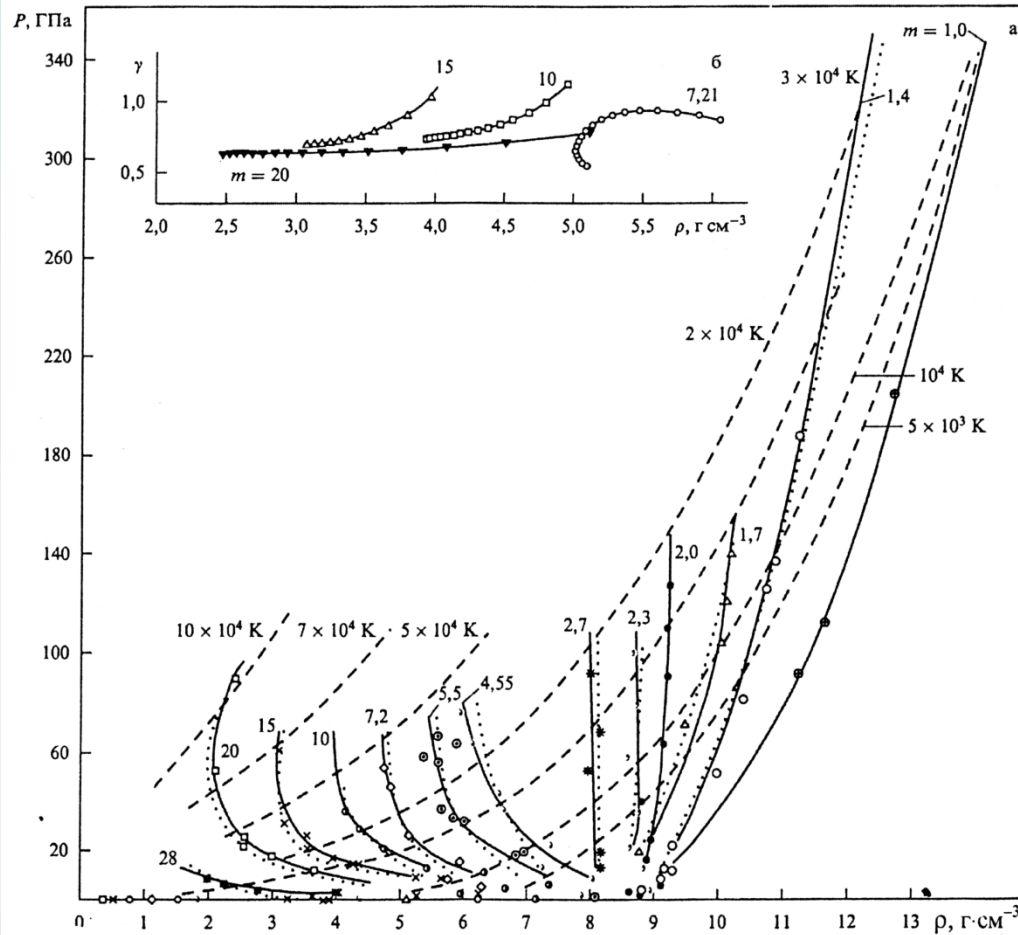
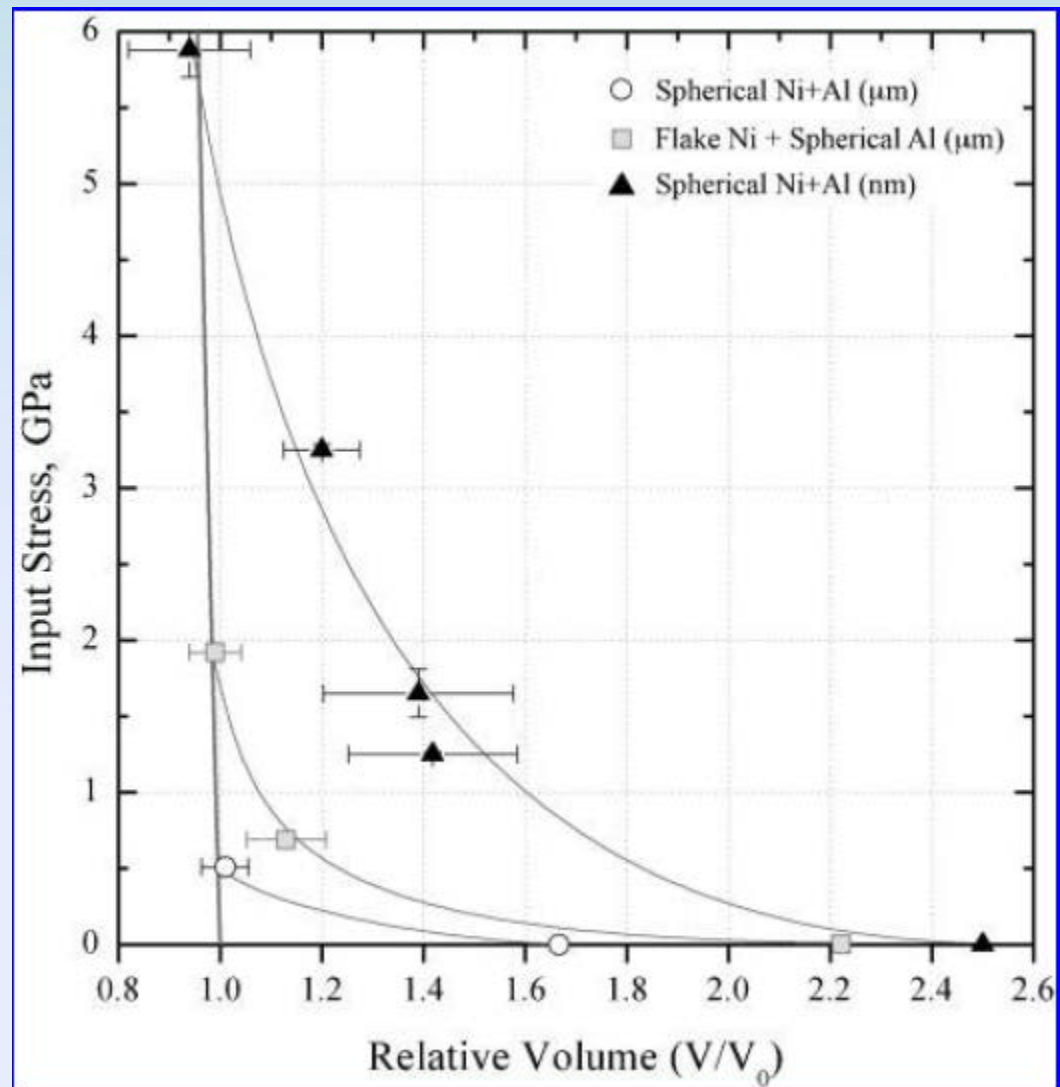
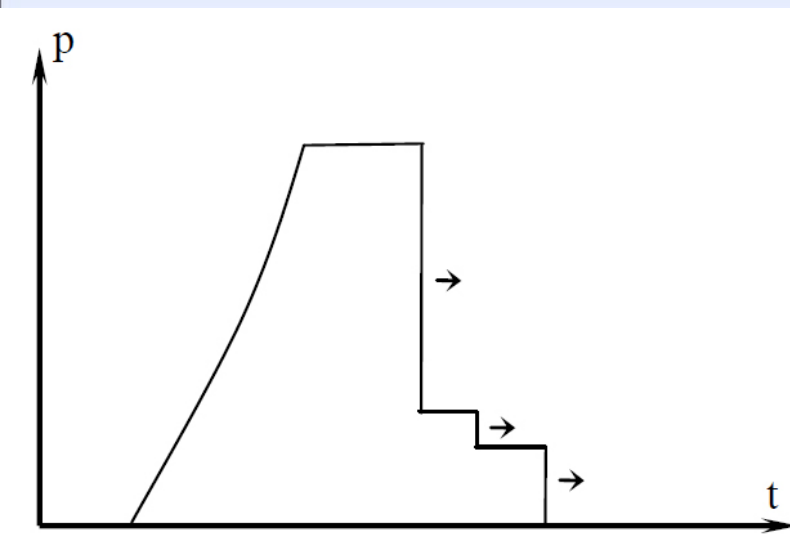
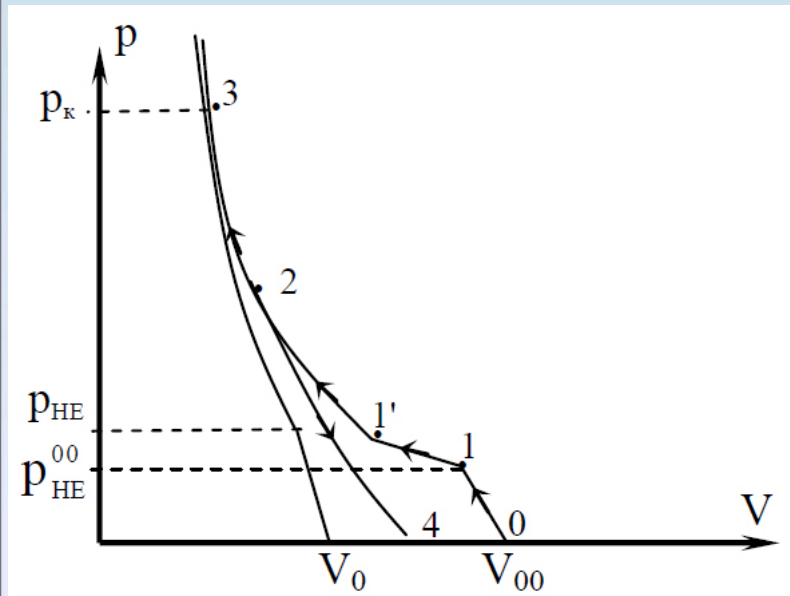


Рис. 10. (а)  $P$ - $\rho$ -диаграмма никеля для разных  $m$ : сплошные линии – экспериментальные ударные адиабаты, точечные линии – расчетные адиабаты по [20], штриховые линии – расчетные изотермы по [20] (цифры у изотерм отвечают соответствующим температурам). (б) Зависимость  $\gamma(\rho)$  на адиабатах для разных  $m$  (расчет по [20])



Shock compression of reactive powder mixtures

D. E. Eakins and N. N. Thadhani\*

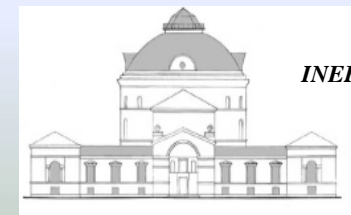
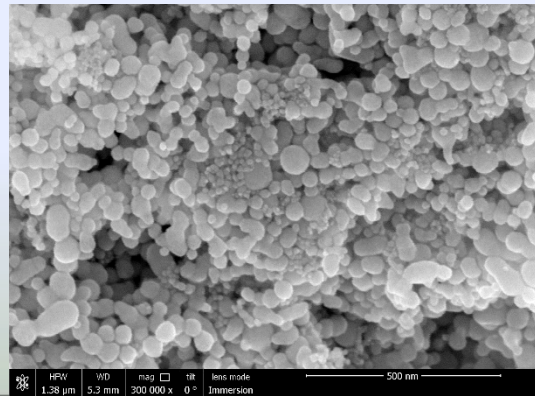
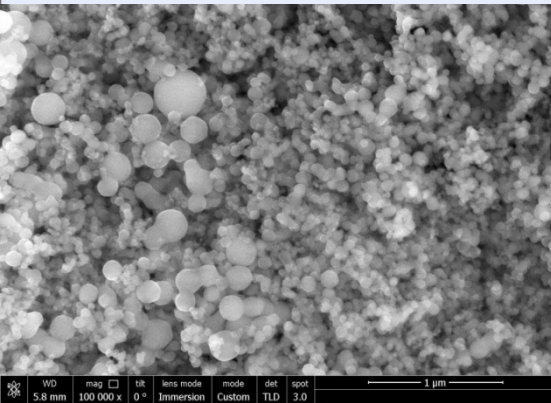
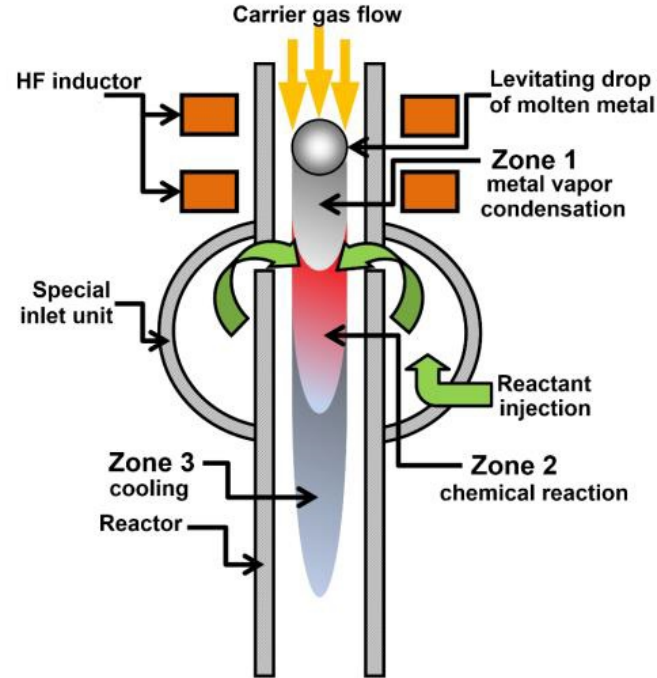
International Materials Reviews

2009

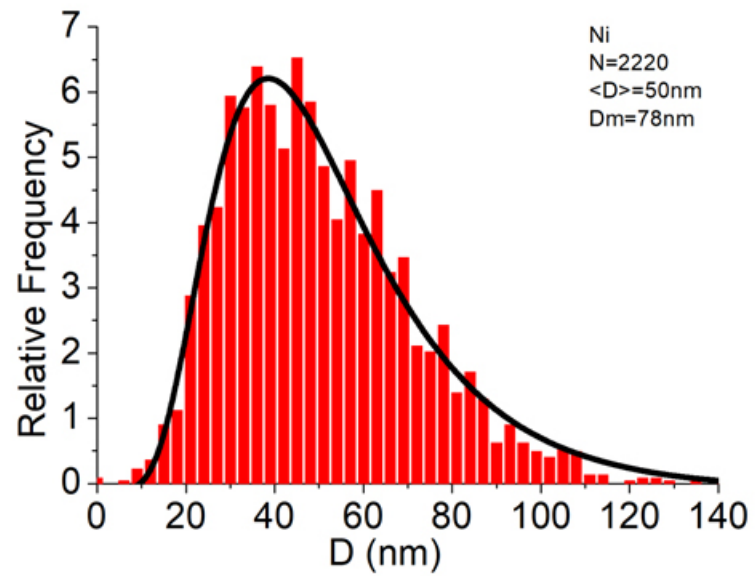
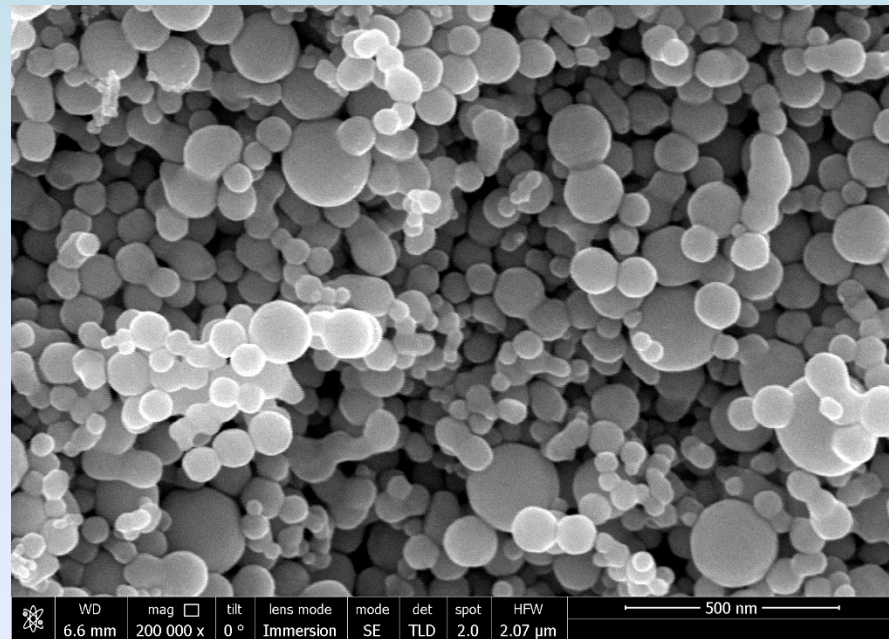
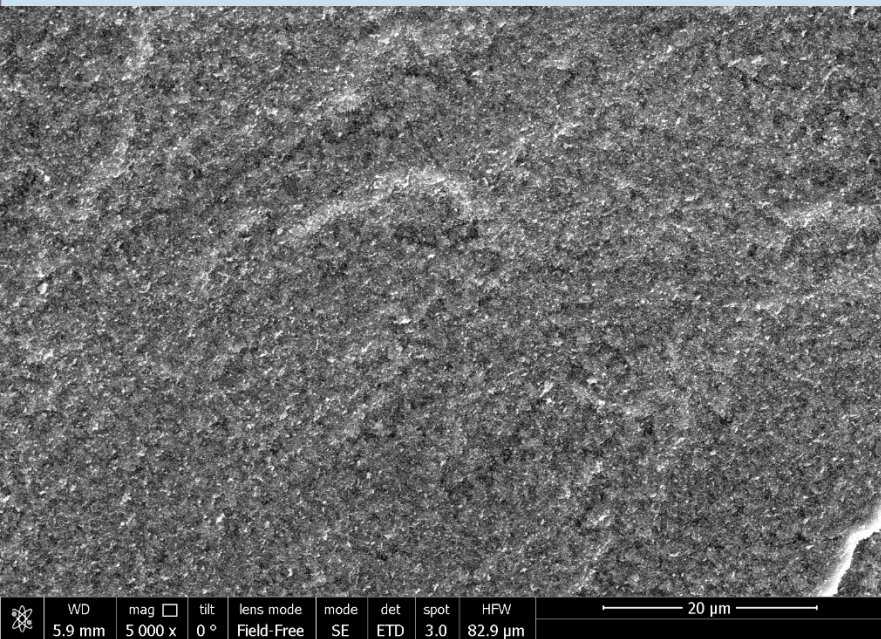


# Metal nanoparticles equipment appearance

## MIGEN



INEPCP RAS



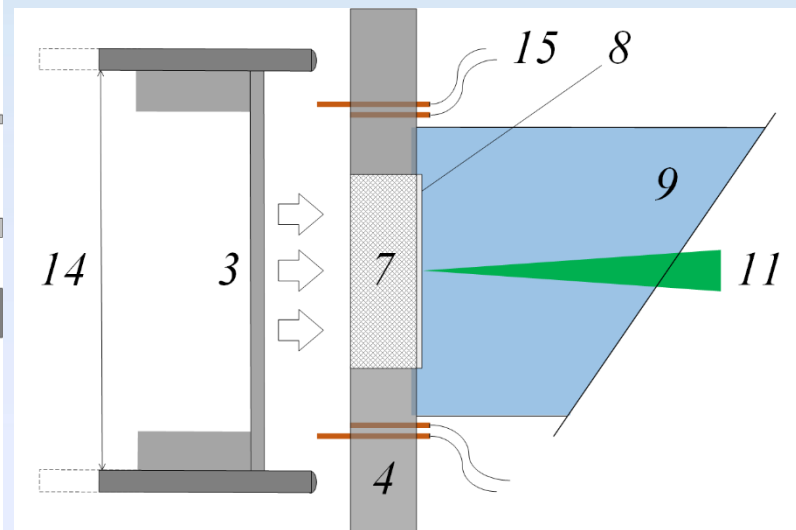
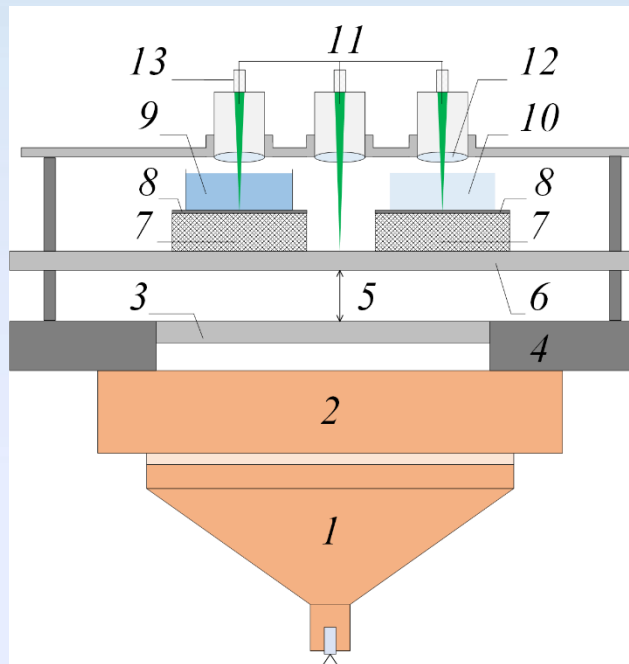
# Постановка экспериментов: метание ВВ+4 канальный VISAR интерферометр, пороховая пушка+1 канал. VISAR

Окна: H<sub>2</sub>O, LiF, Воздух

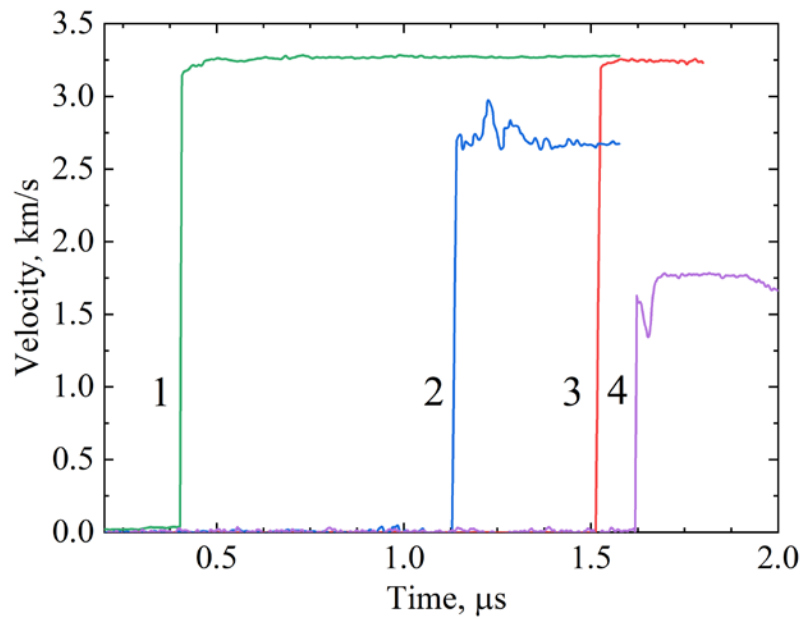
Al фольга 7 – 50 мкм

nNi  
Al  
Al

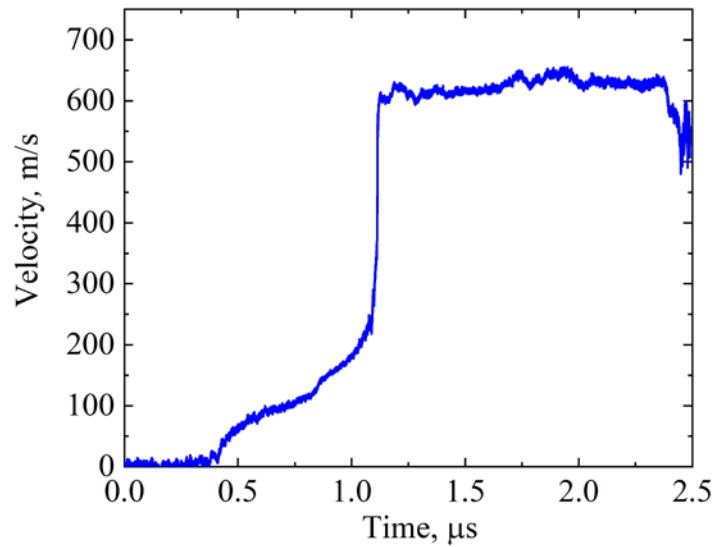
Линза  
100 мм



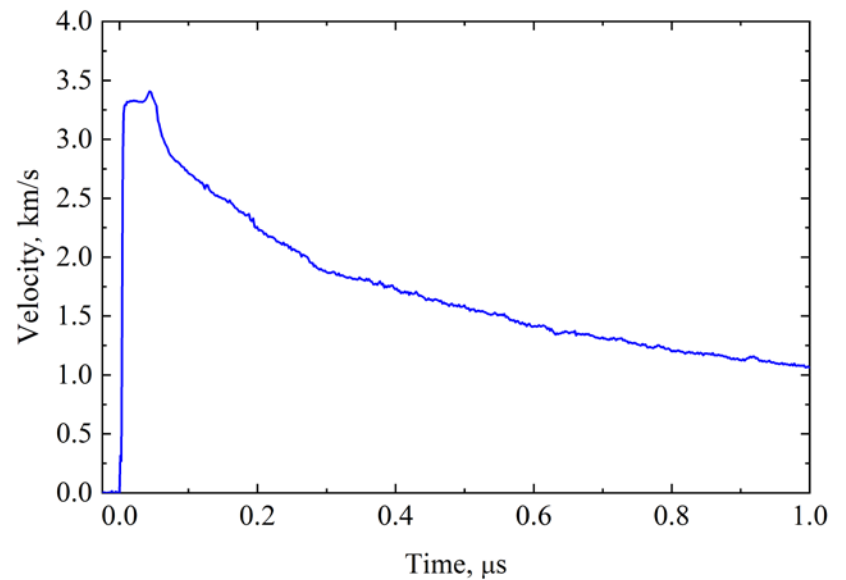
nNi  $h = 1.6-4.5 \text{ мм}$   $\rho_{00} = 4,3-4,6 \text{ г/см}^3$   $\epsilon = 50\%$  (48,5-51,5)  $k = 2$  (1.94-2.07)  
 $\langle d \rangle = 50 \div 80 \text{ нм}$   $E \approx 8 \text{ Дж/г}$  (Удельная поверхностная энергия)



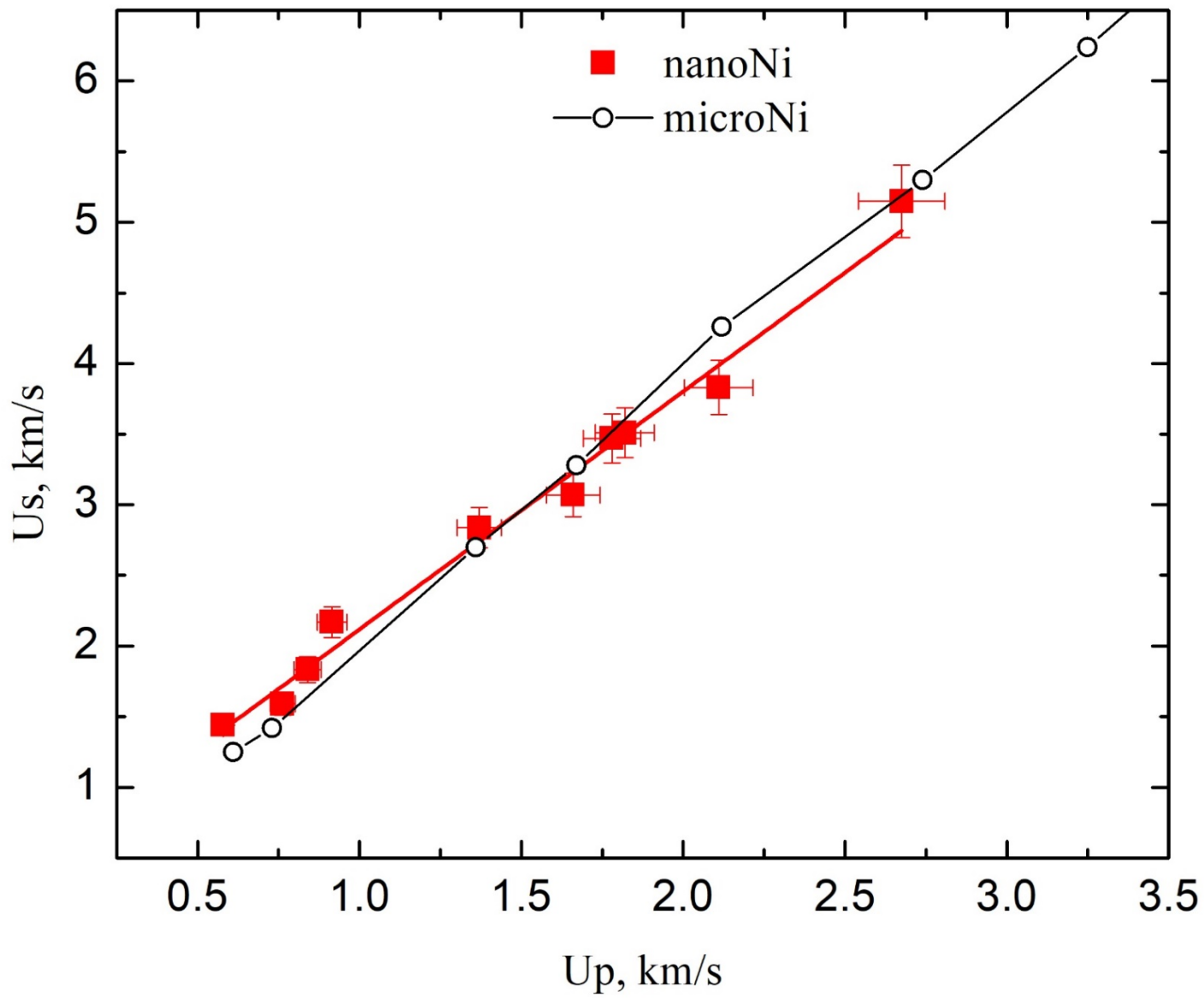
1 — base plate; 2 — sample with water window; 3 — sample bordering with air; 4 — sample with LiF.  
 $W = 3.26$  km/s      Velocity of flyer  
 $h = 3.54, 3.84, 3.90$  mm      Thicknesses of samples

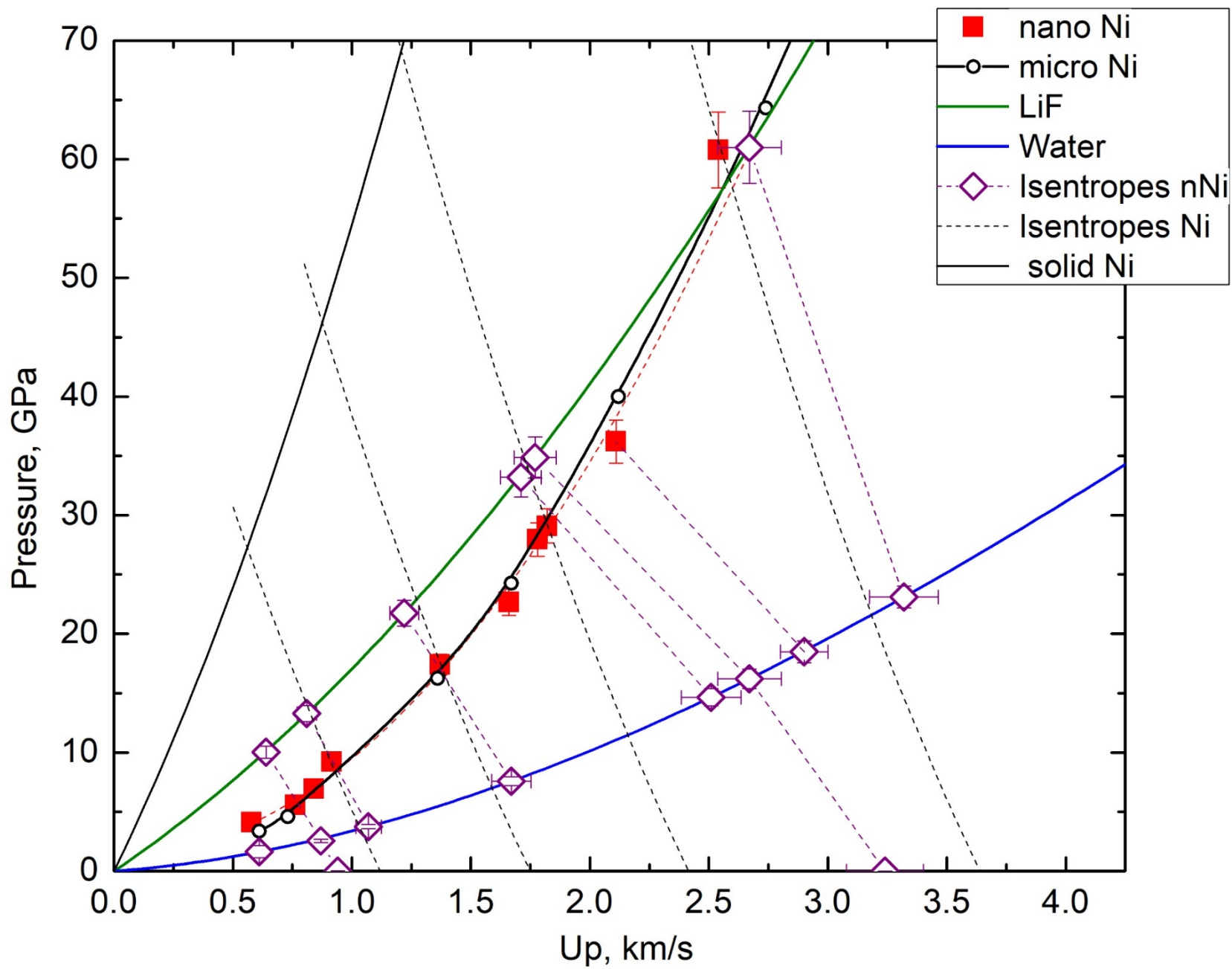


$W = 0.837$  km/s,  $h = 2.06$  mm



$W = 5.3$  km/s,  $h = 2.41$  mm

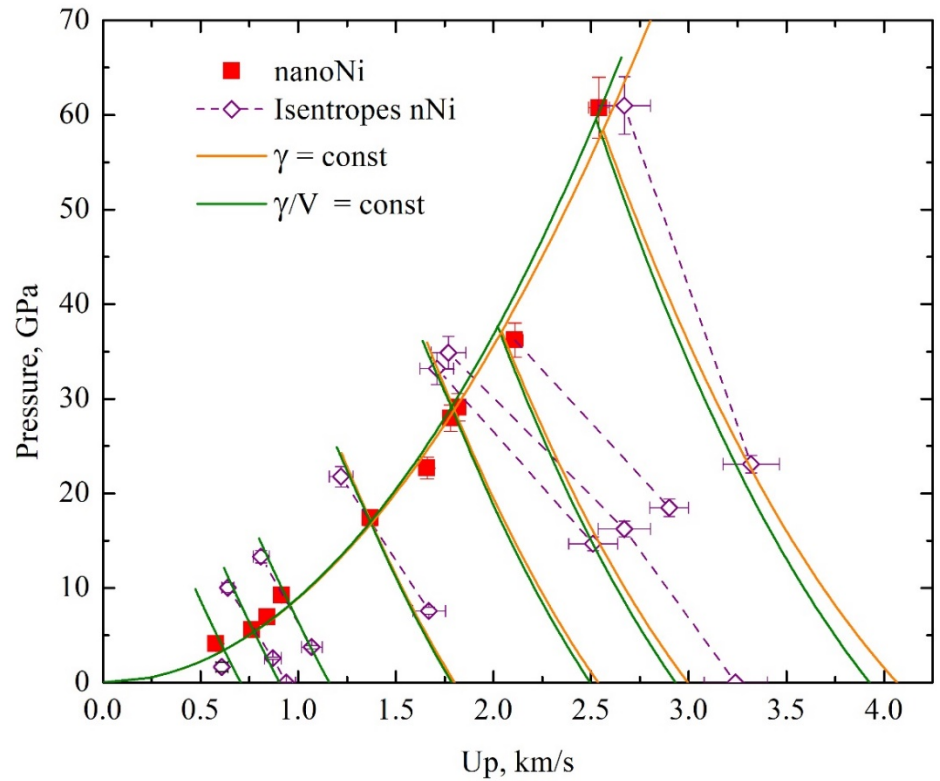
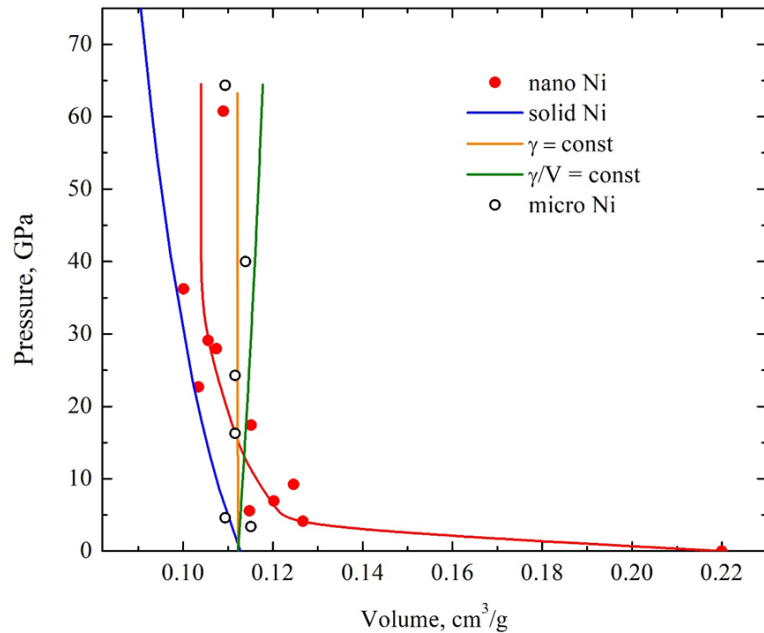


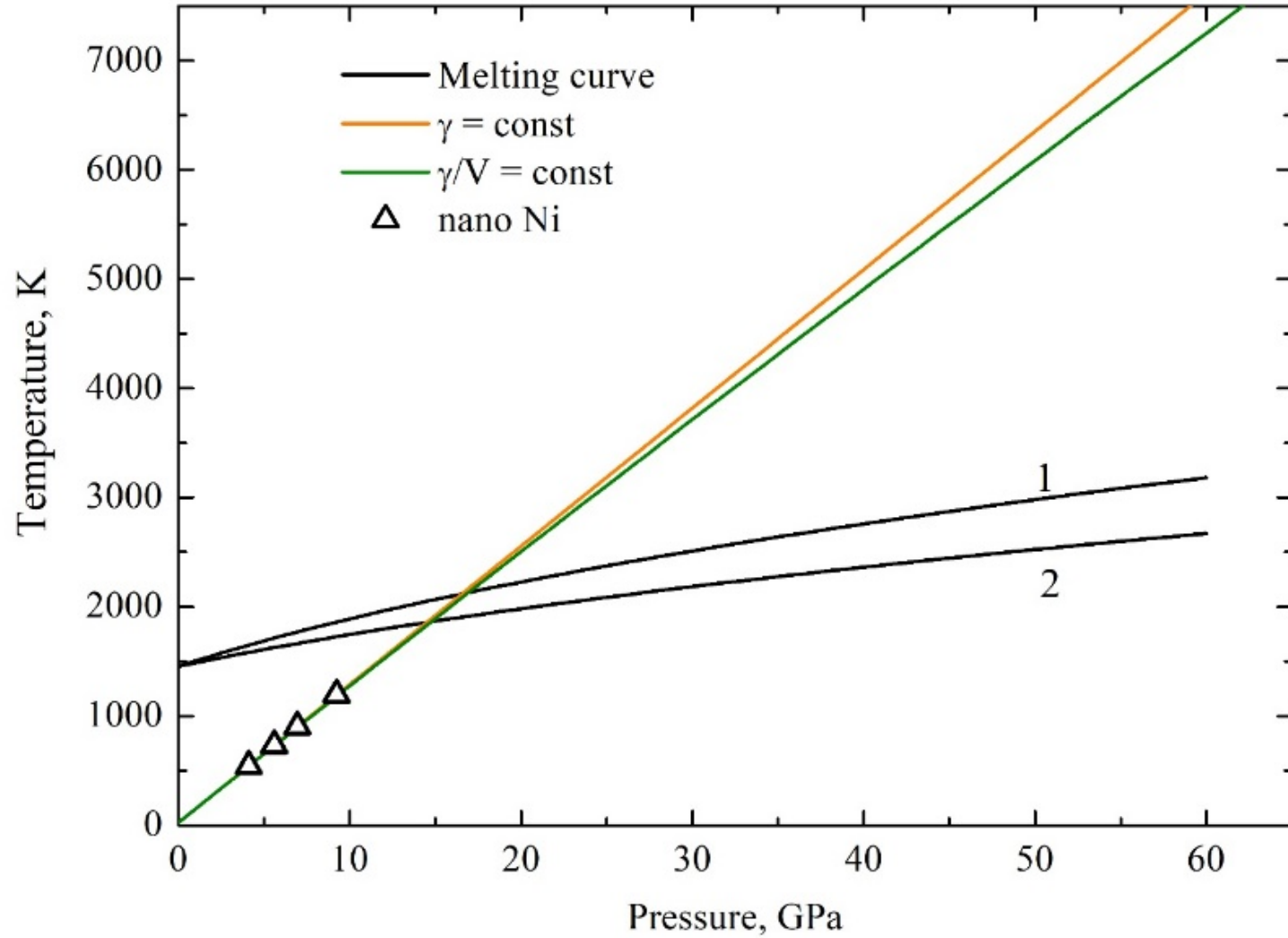


Mie-Gruneisen EOS  $\gamma = \text{const}$  and  $\gamma/V = \text{const} = (\gamma_0/V_0)$  ( $\gamma_0=2$ )  
 Isotherm - Birch-Murnaghan expression with free coefficients  $K_0$  and  $K_1$  (185 GPa and 5)

$$P_H(V, E_T) = P_T(V) + \frac{\gamma}{V} (E_H(V) - E_T(V))$$

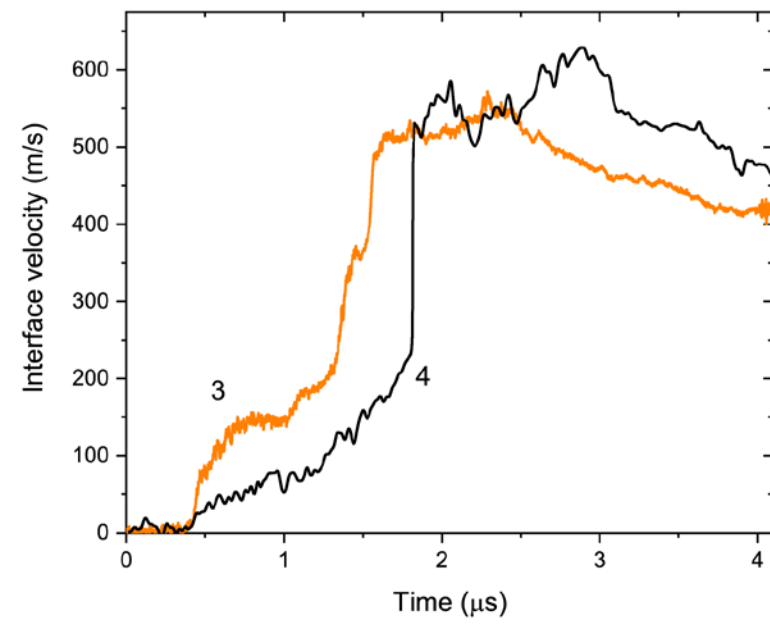
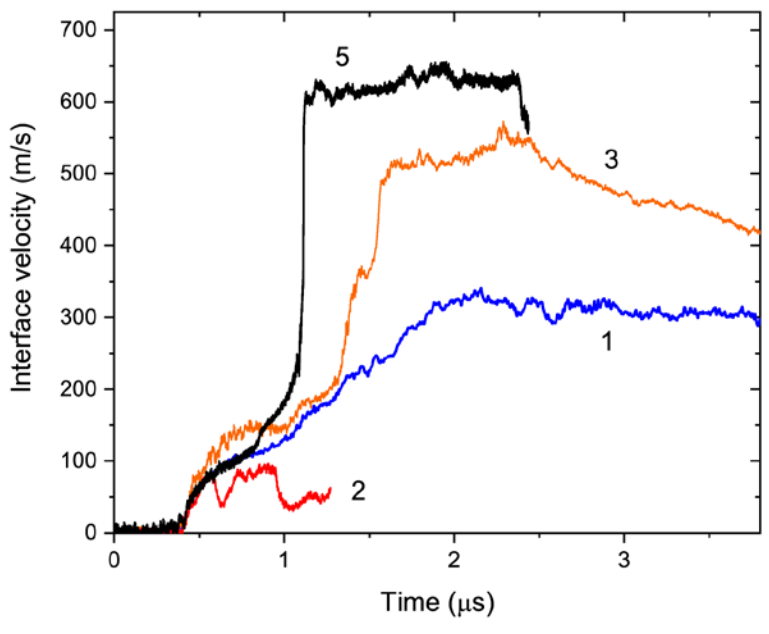
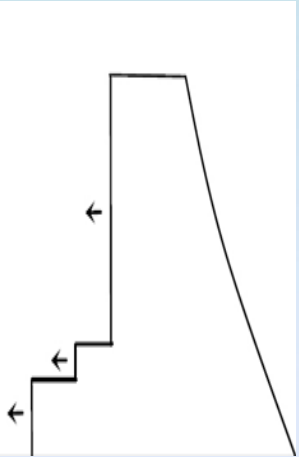
$$P_T = \frac{3}{2} K_0 \left( \left( \frac{V}{V_0} \right)^{-\frac{7}{3}} - \left( \frac{V}{V_0} \right)^{-\frac{5}{3}} \right) \left[ 1 - \frac{3}{4} (4 - K_1) \left( \left( \frac{V}{V_0} \right)^{-\frac{2}{3}} - 1 \right) \right]$$





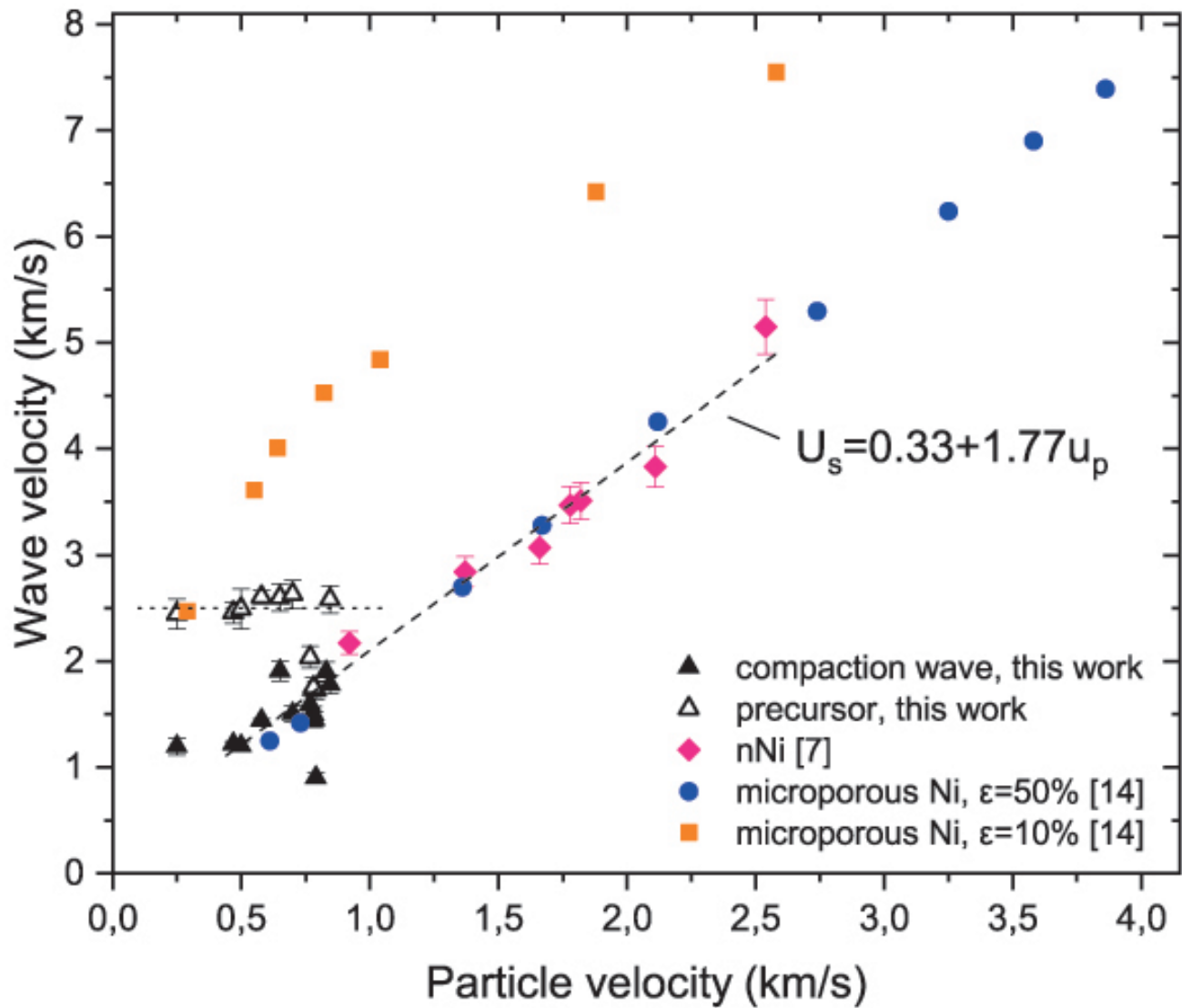
1-2 melting [Boccatto S. et al. // J. Geoph. Res. 2017]



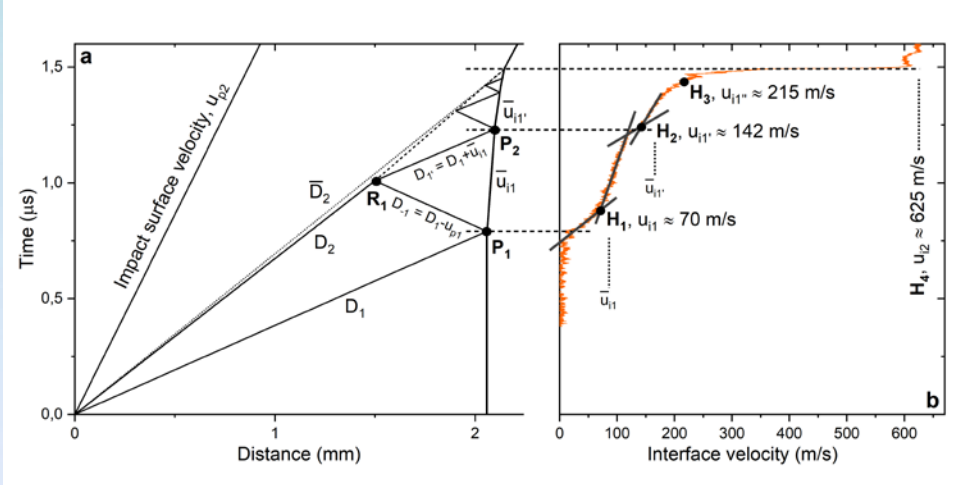
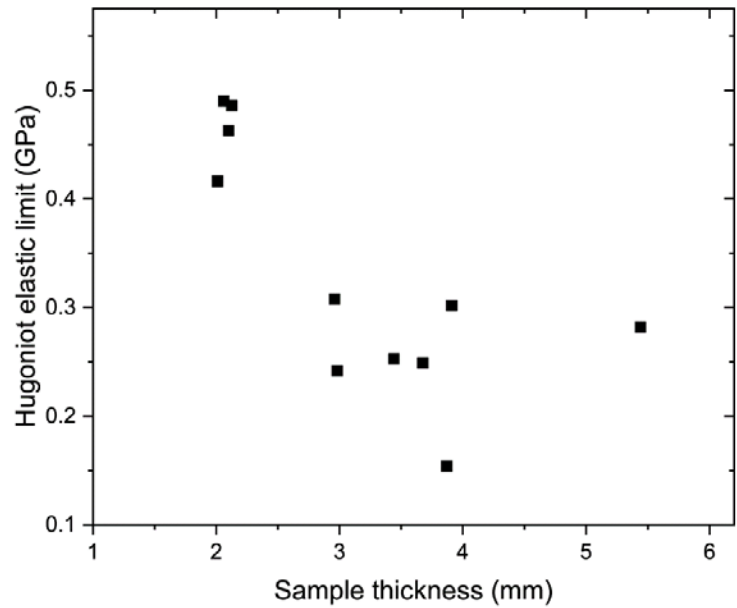


$W =$  1- 296 m/s  
 2-587 (LiF)  
 3-646  
 4-682  
 5-837

№	Материал ударника	Материал окна	Толщина отражающей фольги, мкм	Скорость ударника $V_i$ , м/с	Толщина образца $h_s$ , мм
1	Медь	вода	7	296	2.10
2	Д16т	LiF	7	587	2.01
3		вода	7	648	2.125
4		вода	7	682	2.98
5		вода	7	837	2.06
6		вода	50	1010	5.44
7.1		вода	50	1010	3.675
7.2		LiF	50		2.96
8.1		воздух	10	1105	3.91
8.2		вода	10		3.87
8.3		LiF	10		3.82
9.1		вода	100	1260	3.44
9.2		LiF	20		3.33

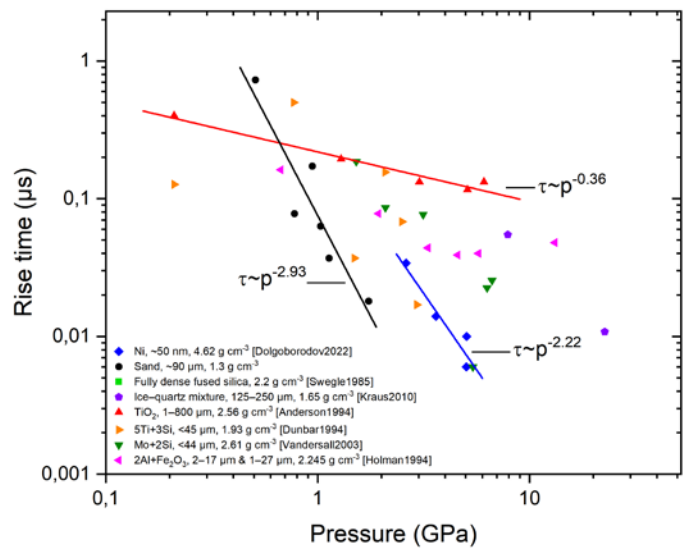


Скорость предвестника - 2.3 – 2.5 km/s



Времена нарастания на фронте волн уплотнения, распространяющихся в наноразмерном Ni оказались сравнимы с временами, измеренными для микронных порошков. Это приводит к тому, что толщины волн уплотнения в случае nano Ni пропорциональны нескольким сотням средних размеров частиц, а не среднему размеру частиц, что характерно для различных микропорошков. Предел упругости Гюгио в nano Ni снижается с 0,45 до 0,2 ГПа с увеличением толщины образцов (от 2 до 5 мм), что свидетельствует о достаточно быстром затухании упругого предвестника.

Зависимость предела упругости Гюгио от толщины образца



# Заключение

- Ударная адиабата наноразмерного никеля в пределах ошибок эксперимента совпадает с ударной адиабатой микронного никеля. Ударное сжатие до 61 ГПа не имеет особенностей, хорошо описывается моделью Зельдовича для пористой среды и может быть рассчитано с помощью уравнения состояния Ми-Грюнайзена.
- **Изэнтропы разгрузки имеют существенные особенности. При разгрузке из состояний с давлением до 20 ГПа расчетные изэнтропы расширения описывают данные в пределах погрешности эксперимента. Однако в среднем диапазоне при расширении из состояний с давлением 20–35 ГПа изэнтропы на диаграммах давление–массовая скорость существенно отклоняются в сторону массовых скоростей на 300–400 м/с выше, чем в случае «зеркальной симметрии».**
- **Профили ударных волн при давлениях ниже 8 ГПа имеют сложную многоступенчатую структуру, в которой выделяются волна-предвестник и волна уплотнения. Толщины волн уплотнения в случае нано Ni пропорциональны нескольким сотням средних размеров частиц.**