



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

Павленко Александр Валериевич,  
А.В. Бочков, А.Ю. Гармашев, Г.Н. Рыкованов

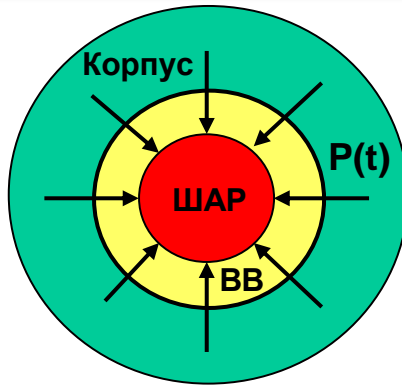
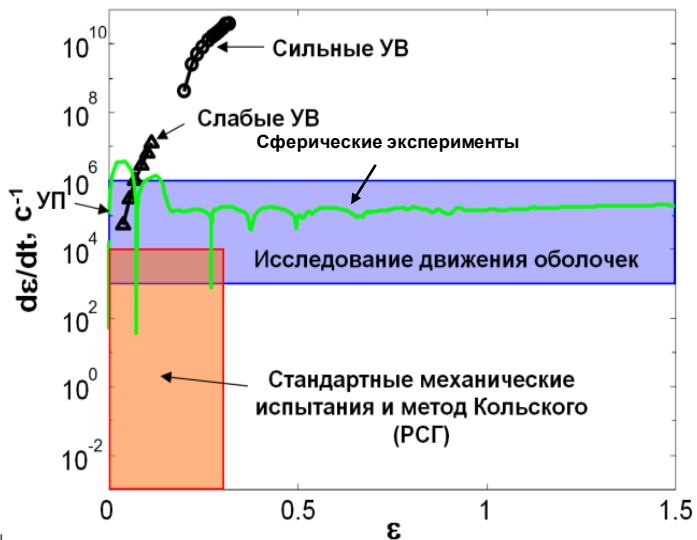
# ***Современные методы газодинамических исследований***

Забабахинские Научные Чтения, 29 мая – 02 июня, 2023

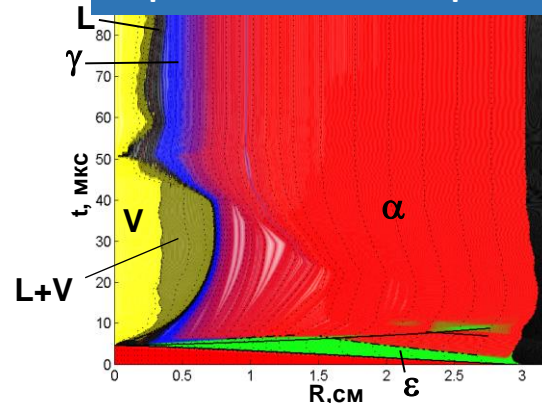
[avpavlenko@vniitf.ru](mailto:avpavlenko@vniitf.ru)



## Изменение скорости деформации



## Взрывное сжатие шара Fe



Модели должны учитывать:

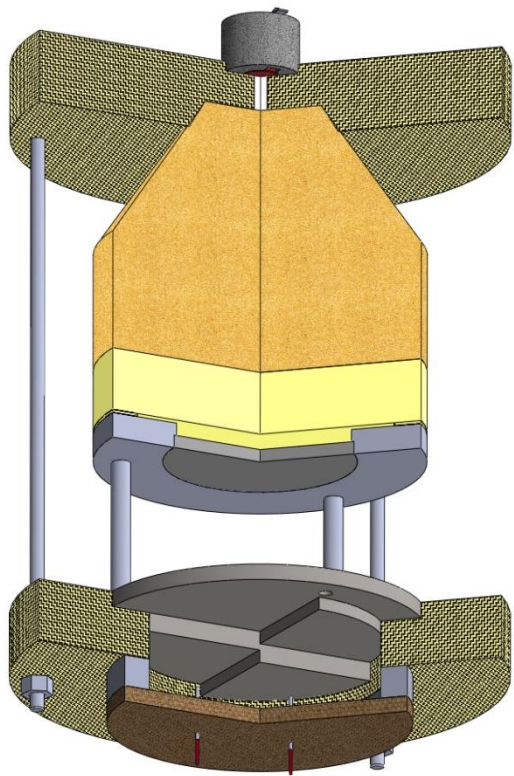
- ❑ Протекание полиморфных превращений с учетом неравновесности
- ❑ Изменение прочностных свойств в условиях высокоскоростного деформирования при ударно-волновом нагружении и сжатии системы
- ❑ Зарождение и развитие разрушения с учетом изменения скорости деформации, температуры и происходящих в материале фазовых превращений
- ❑ Залечивание образовавшихся повреждений



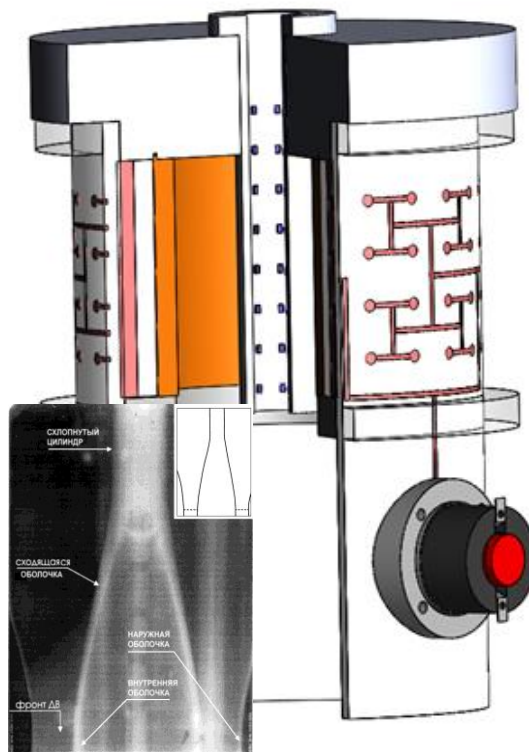
# Взрывные нагружающие устройства



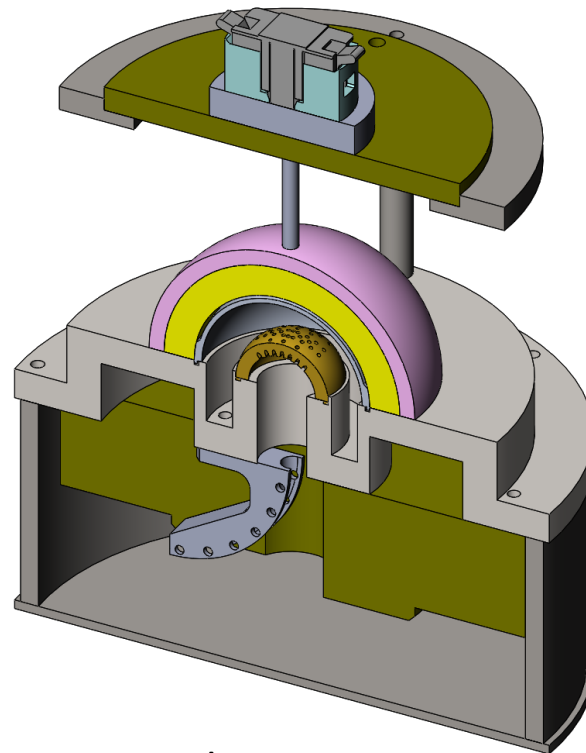
РФЯЦ-ВНИИФ  
РОСАТОМ



Плосковолновые



Цилиндрические



Сферические

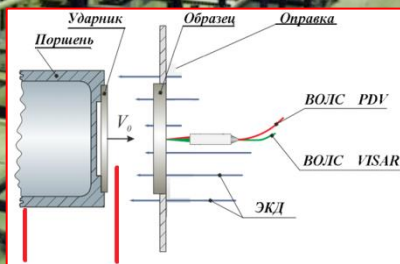
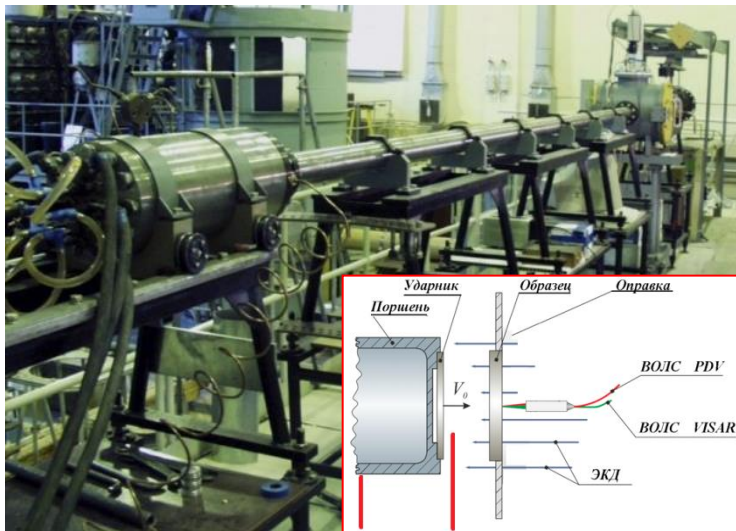


# Баллистические нагружающие установки, методология работ

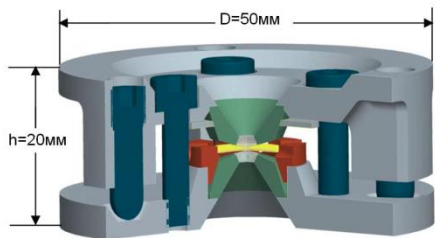
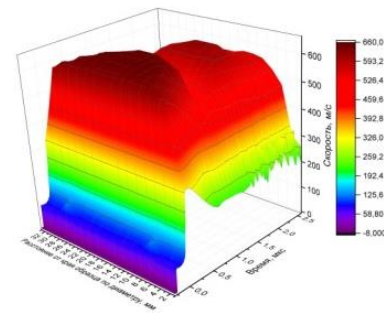
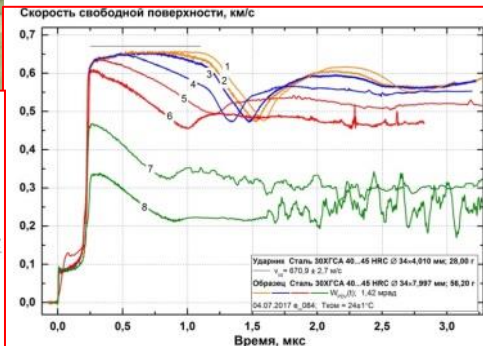


РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

Нагружение – легкогазовые пушки калибра 44мм, диагностика – интерферометрия VISAR, PDV



При необходимости диапазон нагружающих импульсов может быть расширен с применением лазерных установок ЦЛФИ РФЯЦ-ВНИИТФ и ЭФУ



Структура - световые микроскопы, Neophot-21 и др; Микроструктура, фазовый и элементный составы в сканирующем электронном микроскопе Quanta-200; в просвечивающем трансмиссионном электронном микроскопе JEM-200СХ; Рентгеновский структурный анализ (CuK $\alpha$ ); Микротвердость - ПМТ-3 при нагрузке 50 г;

Алмазные наковальни- ячейка типа Voehler-Almax.

Излучение – MoK $\alpha$   $\lambda = 0,711 \text{ \AA}$ . Передающая среда – NaCl. ( $\Delta P = \pm 0,3 \text{ ГПа}$ )



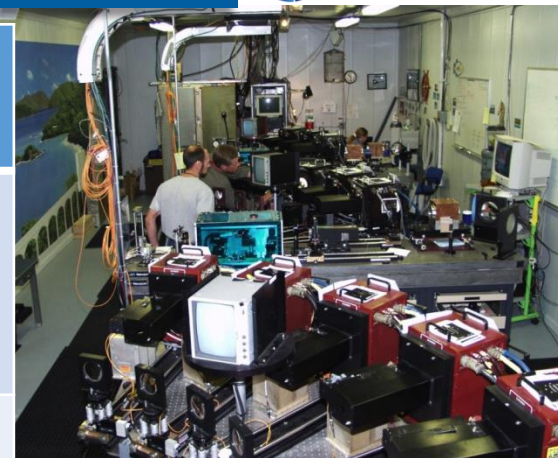


## Немного истории. Лазерные интерферометрические методы.



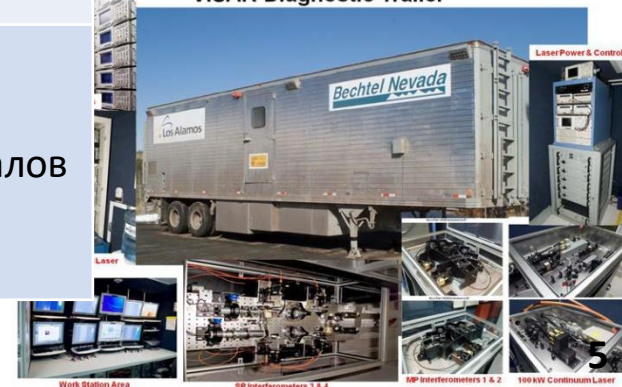
РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

Интерферометр Майкельсона	1965, Sandia
Интерферометры Фабри-Перо	1968 -LLNL, 1974 - CEA, 1983 – ВНИИЭФ; 1999 - ВНИИТФ 2003 - LLNL – 15 каналов , 2008 - AWE – 6 каналов
VISAR	1972 – L.Barker, Sandia; 1988 – Г.И.Канель, ИПХФ; 1990 – LANL, 36-Point VISAR System Trailer; 2006 – ВНИИТФ, ВНИИЭФ
PDV – НЕТ-V (ЛГМ)	1988 – B.T. Neyer 1999 – Oliver Strand, LLNL – 1 канал, 2004 – 4 канала, 2006 (LLNL) – 32 канала, 2012 – 96 каналов ВНИИТФ – 2011 -1 канал, 2012 – 4 канала, 2015 – 108 каналов



15-channel Fabry-Perot, NTS U1a /circa 2003

VISAR Diagnostic Trailer



Work Station Area

SP Interferometers 3 & 4

SP Interferometers 1 & 2

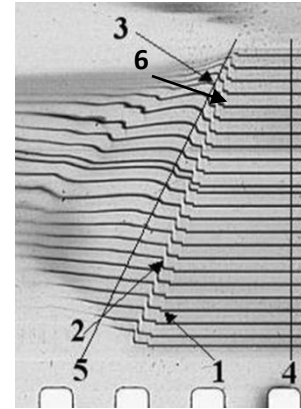
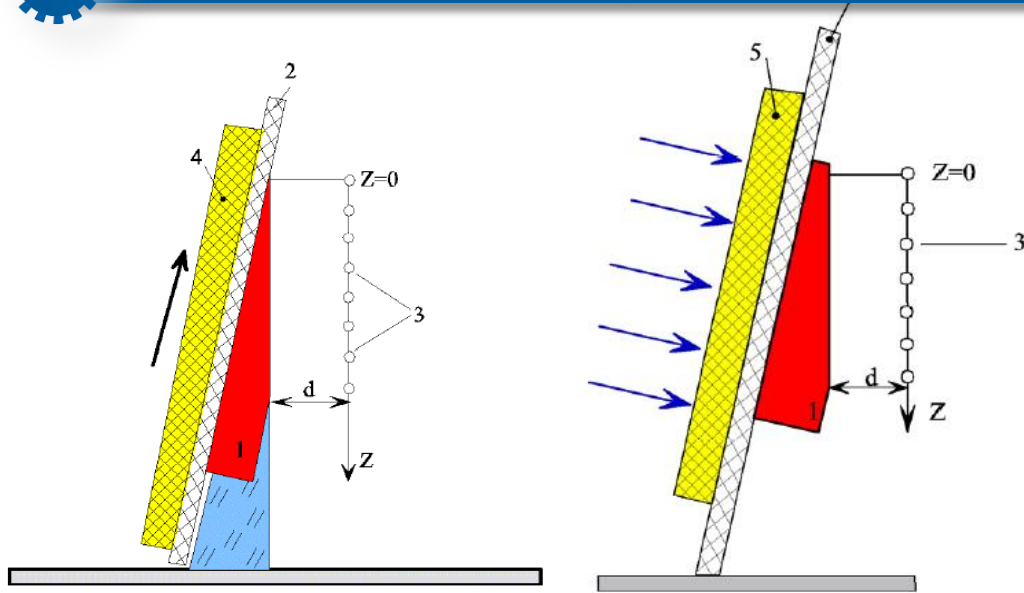
100 kW Continuum Laser



# Немного истории – метод оптического рычага



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

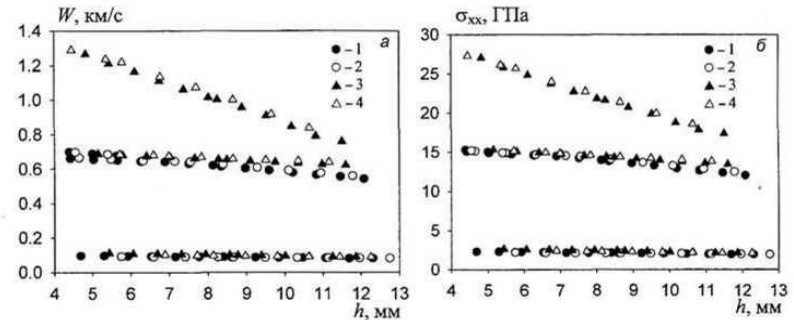


$$D = V_{\phi} \sin \alpha = \frac{V_p}{Mtg\gamma} \sin \alpha.$$

$$W_N = V_{\phi} tg\beta = \frac{V_p a}{2dM^2 tg\gamma}.$$

1. Owen J.D., Davies R.M. // Nature. 1949. V. 164. P. 752.
2. Allen W.A., McClary C.L. // Rev. Sci. Instrum. 1953. V. 24. P. 165.
3. Fowles G.R. // J. Appl. Phys. 1961. V. 32. № 8. P. 1475.

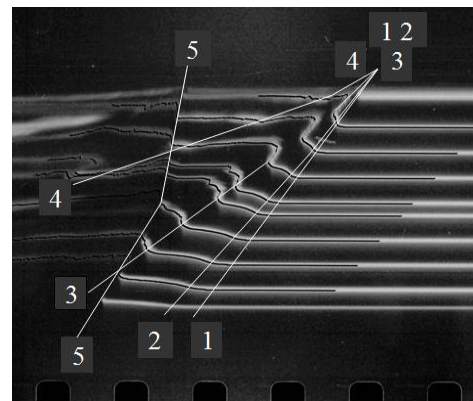
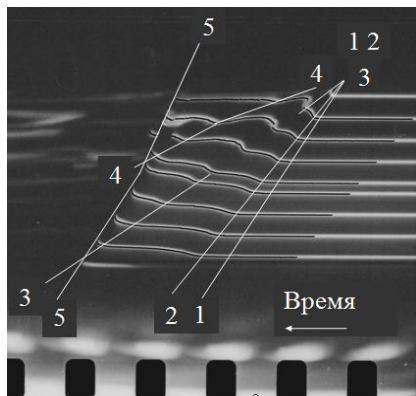
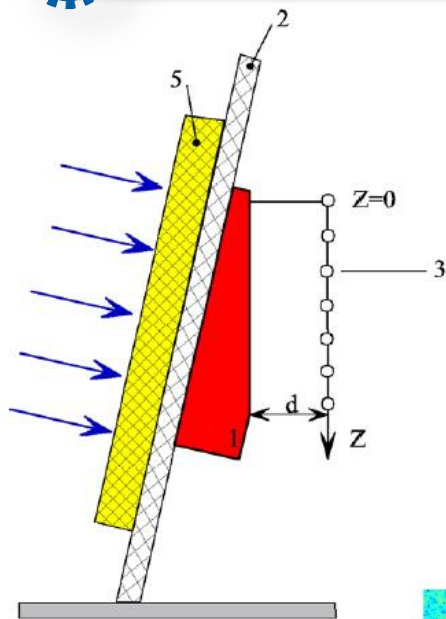
В.И. Таржанов. ПТЭ, 2022, № 1, С. 106–119



Е.А. Козлов, В.И. Таржанов, И.В. Теличко, Д.Г. Панкратов. *Сдвиговая и откольная прочность закаленной стали 30ХГСА при взрывном нагружении в области протекания твердофазного превращения. Деформация и разрушение материалов*, 2012, № 8, с. 32-38



# Метод оптического рычага. Церий.

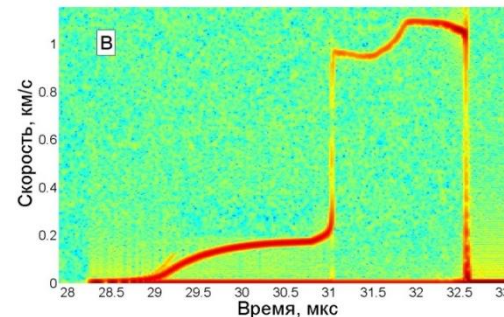
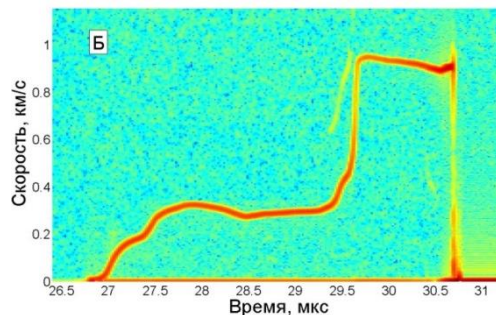


Двукратное нагружение церия: нормальная детонация ТГ46 через воздушный зазор 5 мм + слойка – медь 10,0 мм + ацетон 7,0 мм + медь 7,0 мм; толщина ВВ: слева – 10 мм, справа – 30 мм

Е.А. Козлов,  
В.И. Таржанов,  
И.В. Теличко,  
Д.Г. Панкратов, Д.П. Кучко,  
М.А. Ральников, и др.  
ЗНЧ – 2014

- 1-1 упругий и фазовый предвестники
- 2-2 основная пластическая волна
- 3-3 вторая волна в  $\alpha$ -фазе
- 4-4 вторая волна в  $\gamma$ -фазе
- 5-5 повторное нагружение

$x = 0,90$  мм



$x = 5,05$  мм



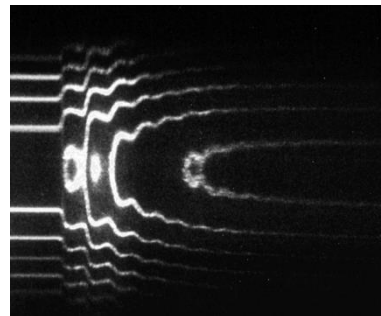
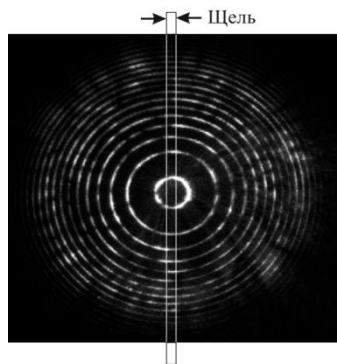
# Лазерные измерители скорости с интерферометром Фабри-Перо



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



15-channel Fabry-Perot, NTS U1a /circa 2003

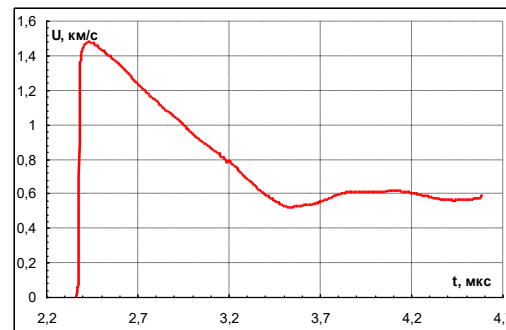
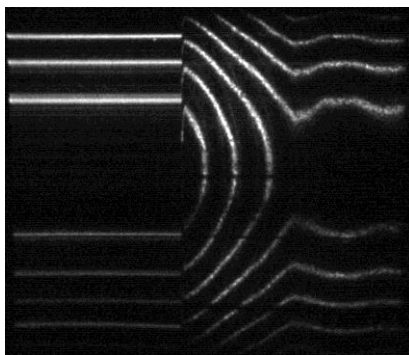


$$W(t) = \frac{c \lambda}{4h} \left( N + \frac{R_i^2(t) - R_i^2}{R_{i+1}^2 - R_i^2} \right)$$

Е.А. Козлов, В.И. Таржанов... Разгон ударника, временная развертка



2 – каналный комплекс ВНИИТФ (ВНИИА)



А.В. Федоров... Профиль ударной волны в стали 12Х18Н10Т.





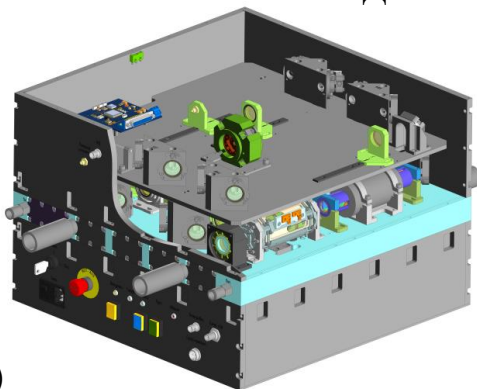
# Лазерные измерители скорости с интерферометром Фабри-Перо



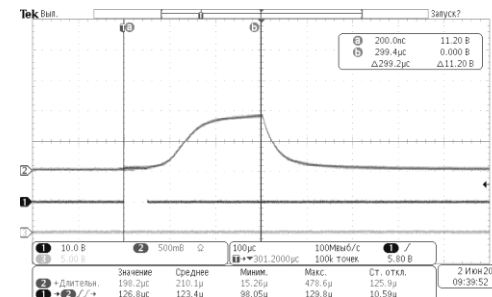
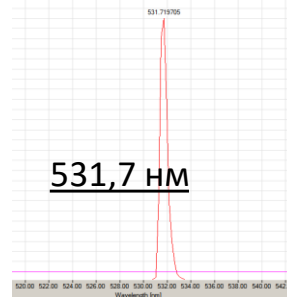
РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



2 – каналный комплекс ВНИИТФ (ВНИИА)



РФЯЦ-ВНИИТФ. Лазер видимого диапазона с  
длительностью импульса более 100 мкс  
для комплексов ФП / VISAR



Длительность импульса:  
по уровню 0,5 более 150 мкс  
по уровню 0,9 более 100 мкс

Волоконный вывод излучения;  
Импульсная мощность: более 100 Вт

## Применение

- Интерферометрические измерения
- Измерения скорости поверхности в быстропротекающих, ударно-волновых процессах
- Виброметрия
- Лазерная спектроскопия



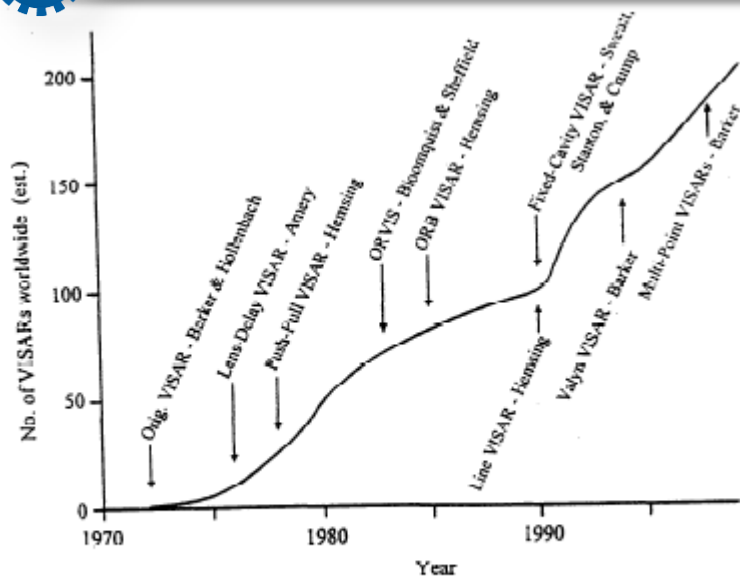
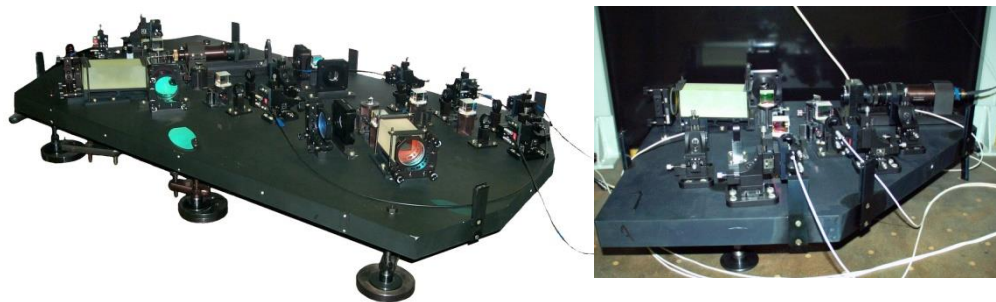


FIGURE 5. Approximate number of VISARs worldwide, with dates of some VISAR developments.

Barker Lynn M. *The Accuracy of VISAR Instrumentation*. In Proc. 10<sup>th</sup> SCCM, 1997 – «важно помнить, что точность измерения скорости интерферометрами VISAR от 0,5 % до 1 % достигается без каких либо видимых усилий...» (при наносекундном временном разрешении).

## РФЯЦ-ВНИИТФ: интерферометры VISAR

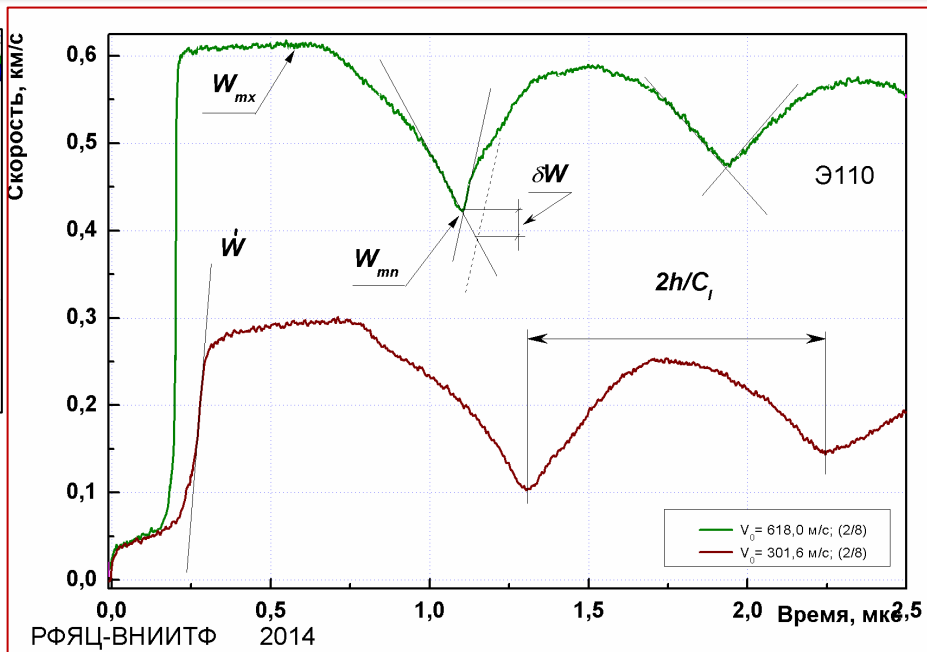
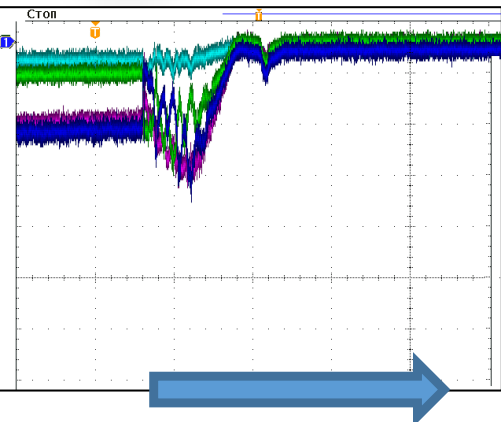


Barker Lynn M. *The Development of the VISAR, and Its Use in Shock Compression Science*. In Proc. 11<sup>th</sup> Shock Compression of Condensed Matter, c.11-17, 1999.

Патент №2638582 Российская Федерация МПК G01B 9/02 (2006.01)  
«Двухканальная интерферометрическая система для исследования ударно-волновых процессов»



# VISAR. Обработка, анализ профилей волн напряжений



$$\sigma^* = \rho_0 c_b (\Delta u_{fs} + \delta) / 2.$$

$$\delta = (h/c_b - h/c_F) |\dot{u}_1|$$

$$c_F = c_b c_l \sqrt{\frac{\dot{\sigma}_x^+ - \dot{\sigma}_x^-}{\dot{\sigma}_x^+ c_l^2 - \dot{\sigma}_x^- c_b^2}}$$

$$\sigma^* = \rho_0 c_b (\Delta u_{fs} + \delta) / 2.$$

$$\delta = \left( \frac{h}{c_b} - \frac{h}{c_l} \right) \frac{|\dot{u}_1 \dot{u}_2|}{|\dot{u}_1 + \dot{u}_2|}$$

$$W(t) = \frac{\lambda c}{4\ell} \cdot \frac{n}{n^2 - 1} \cdot \frac{1}{1 + \delta} \cdot \frac{1}{2\pi} \left[ \arctg \frac{D_2(t)}{D_1(t)} \right]_0^t$$

$$VPF = \frac{\lambda c}{4\ell} \cdot \frac{n}{n^2 - 1} \cdot \frac{1}{1 + \delta}$$

$$\delta = \delta(\lambda) = -\frac{n(\lambda_0)}{n^2(\lambda_0) - 1} \lambda_0 \left( \frac{dn}{d\lambda} \right)_{\lambda=\lambda_0}$$

Забабихин Е.И.

*Некоторые вопросы газодинамики взрыва.* Снежинск, 1997.

Канель Г.И., Фортов В.Е., Разоренов С.В., Уткин А.В.

*Ударно-волновые явления в конденсированных средах.* Москва, М:

Янус-К, 1996.

Канель Г.И.

*Искажение волновых профилей при отколе в упругопластическом теле.* ПМТФ, том 42, №2, с. 194-198, 2001.



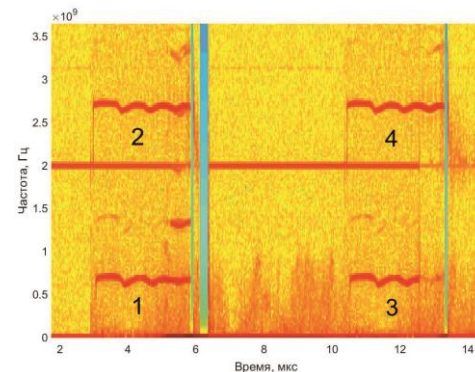
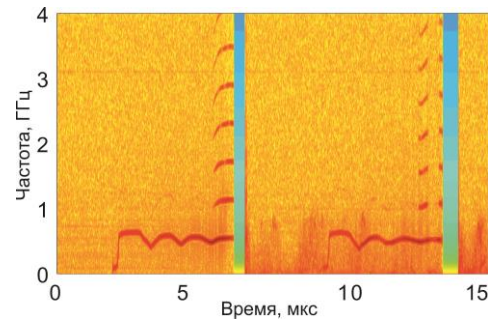
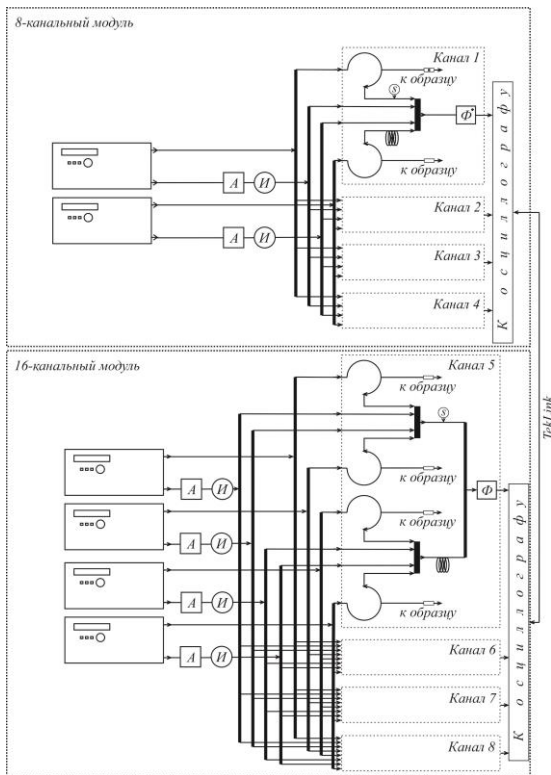
# Лазерные измерители скорости PDV / NET-V



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



MPDV Prototype 32-Probe System  
1x, 2x, 4x, 8x or 16x multiplexing  
(circa August 2011)



Комплексы PDV РФЯЦ-ВНИИТФ с временным и частотно-  
временным уплотнением

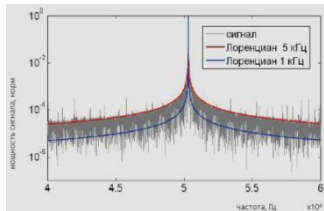


# Лазерные измерители скорости PDV / NET-V



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

РФЯЦ-ВНИИТФ. Эрбиевые оптоволоконные лазеры для комплексов PDV / MPDV



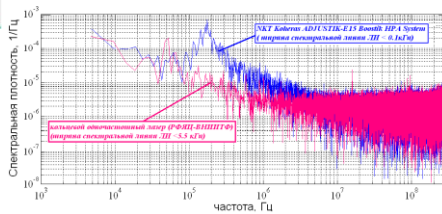
Ширина линии излучения  
(по Лоренциану) менее 5 кГц

## Применение

- Интерферометрические измерения
- Измерения скорости поверхности в быстропротекающих, ударно-волновых процессах
- Виброметрия
- Лазерная спектроскопия
- Оптическая связь

## Преимущества

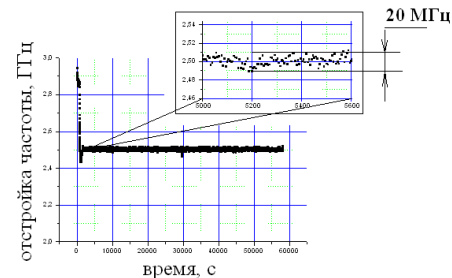
- Статус отечественной разработки. Защищены патентами № 2554337, №2664758
- Адаптированы к повышенным внешним воздействующим факторам



Низкий уровень спектральных шумов



Стабильность отстройки частоты  
излучения в двух каналах менее  
 $\pm 15$  МГц за 17 часов

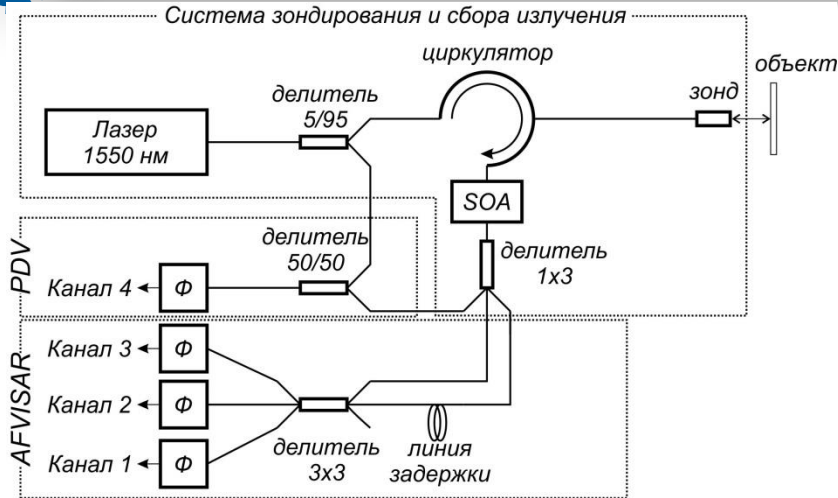




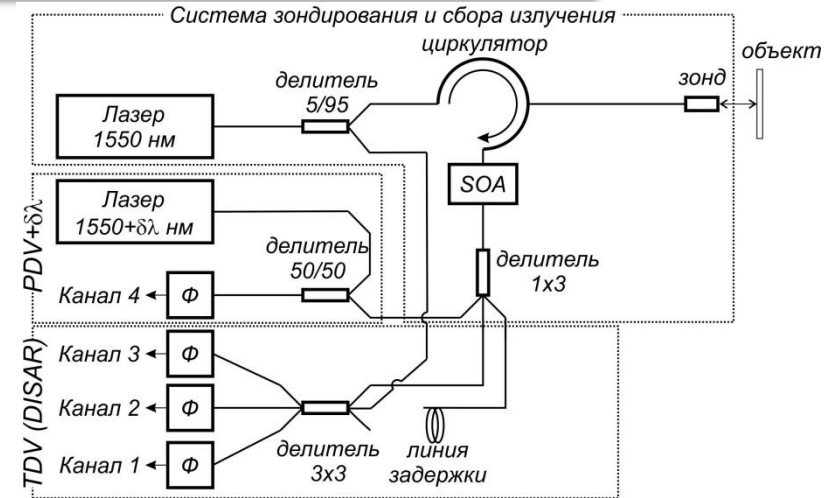
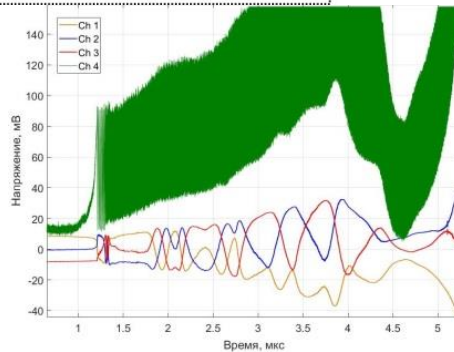
# Гибридные лазерные измерители скорости PDV / НЕТ-V



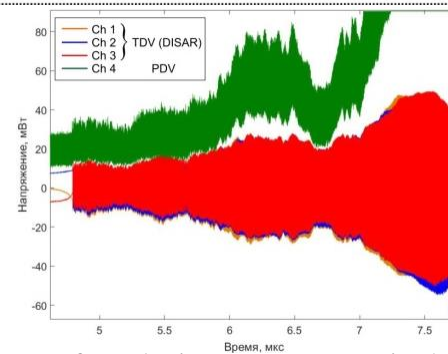
РФЯЦ-ВНИИФ  
РОСАТОМ



PDV - AFVISAR



PDV - TDV



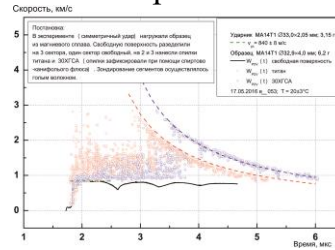
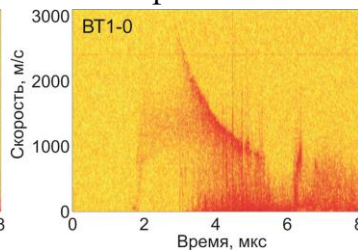
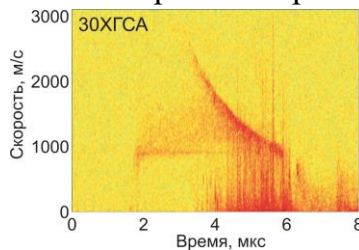




## Реализованы программные алгоритмы преобразований сигналов PDV

- **Скольльзящее оконное преобразование Фурье.** Спектрограмма наглядно демонстрирует спектральную плотность сигнала, разбитого на временные отрезки равные ширине окна преобразования.
- **Преобразование Гильберта** позволяет находить квадратурное дополнение к экспериментальному сигналу, после чего определяется фаза сигнала. Частота сигнала находится как производная фазы по времени.
- **Прямой метод обработки** – Первый способ - нахождение экстремальных точек, следовательно период или частоту биений. Второй способ прямой обработки сигнала - нахождение фазы как арксинуса приведенного к гармоническому виду сигнала, а затем и его частоту как производную фазы. Приведение сигнала к гармоническому виду осуществляется методом эмпирической декомпозиции и нахождением огибающей сигнала.
- **Метод локальной синусоидальной аппроксимации** в каждой точке сигнала или с заданным шагом, он позволяет определить непосредственно частоту сигнала на заданном отрезке (окне). Аппроксимация проводится с применением амплитудной огибающей на отрезке сигнала в виде Гауссовой кривой.
- **Оригинальный метод обработки PDV сигналов – метод квадратурного дополнения\***, основанный на применении к сигналу двух преобразований интегральной свёртки по приближённой фазе сигнала в качестве переменной.

\*Rev. Sci. Instrum. **92**. 075104 (2021);  
doi:10.1063/5.0044154

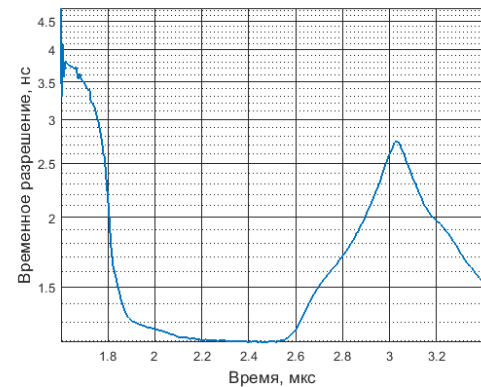
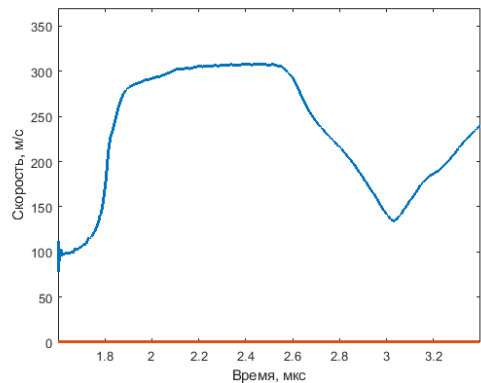
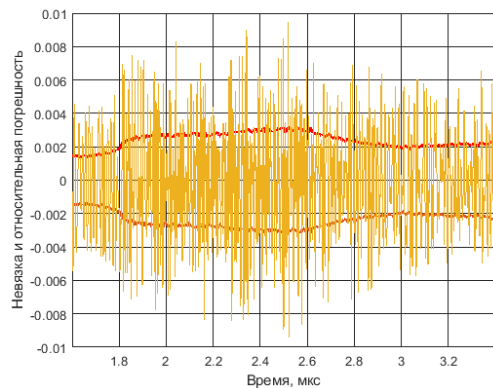
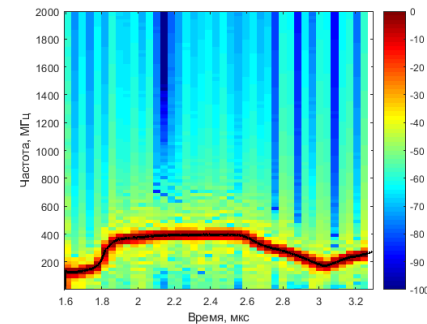
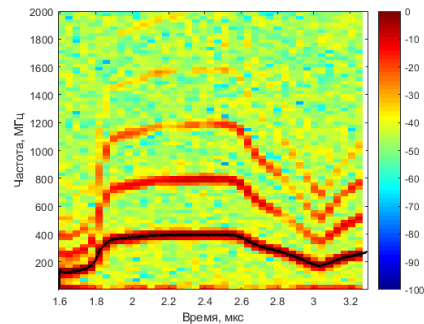
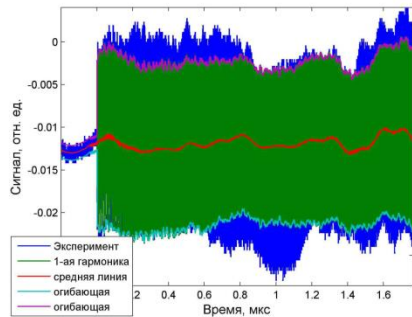
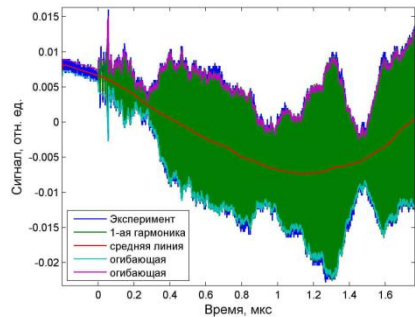




# Лазерные измерители скорости PDV / НЕТ-V. Методы обработки\*



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ





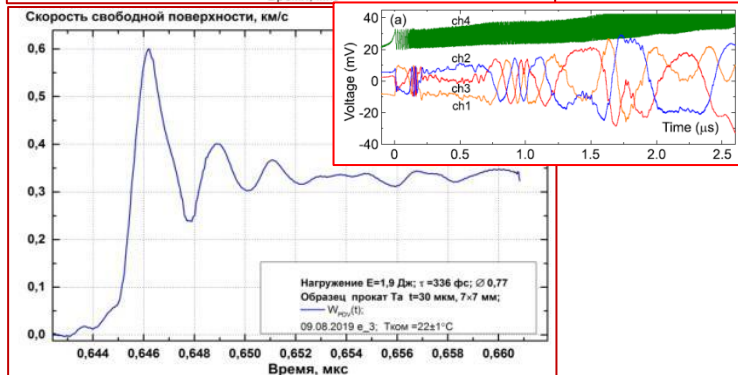
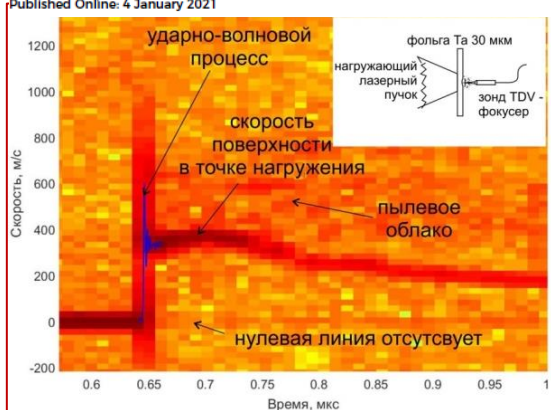
# Лазерные измерители скорости PDV / НЕТ-V. Методы обработки



РФЯЦ-ВНИИФ  
РОСАТОМ

## A hybrid interferometric system for velocity measurements in shock-wave experiments

Cite as: Rev. Sci. Instrum. 92, 015104 (2021); doi: 10.1063/5.0029815  
Submitted: 16 September 2020 • Accepted: 11 December 2020 •  
Published Online: 4 January 2021



## Quadrature complement method for time-resolved signal frequency reconstruction

Cite as: Rev. Sci. Instrum. 92, 075104 (2021); doi: 10.1063/5.0044154  
Submitted: 14 January 2021 • Accepted: 21 June 2021 •  
Published Online: 12 July 2021

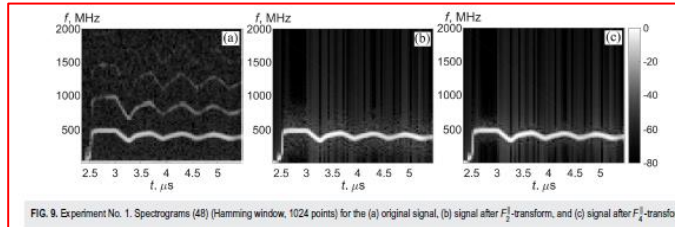


FIG. 9. Experiment No. 1. Spectrograms (Hamming window, 1024 points) for the (a) original signal, (b) signal after  $F_2$ -transform, and (c) signal after  $F_4$ -transform.

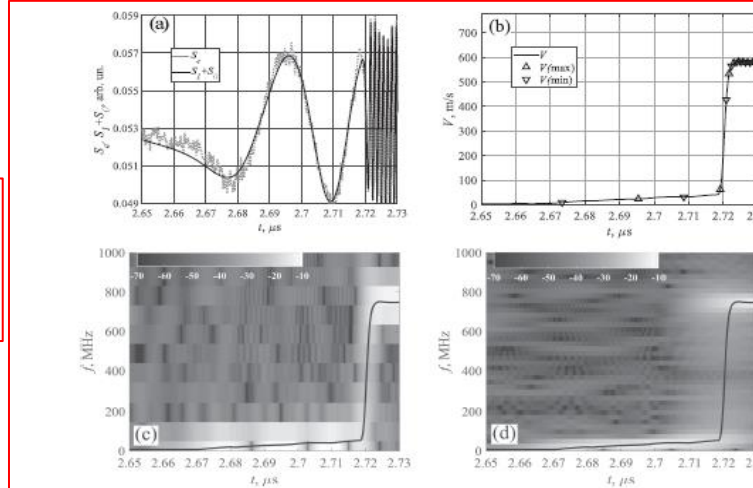
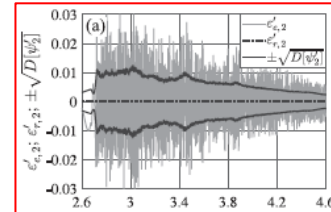
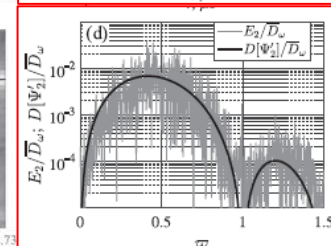
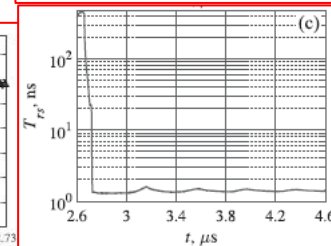


FIG. 12. Experiment No. 2: (a) experimental signal,  $S_\omega$ , and the sum of harmonics,  $S_\omega^1 + S_\omega^2$ ; (b) velocity profile,  $V$ , and the points that correspond to extrema of  $S_\omega^1$ ; (c) Spectrogram (Hamming window, 1024 points  $\Rightarrow$  41 ns) of  $S_\omega$  and velocity profile  $V$  (curve). (d) Spectrogram (Hamming window, 256 points  $\Rightarrow$  10 ns) of  $S_\omega$  and velocity profile  $V$  (curve).

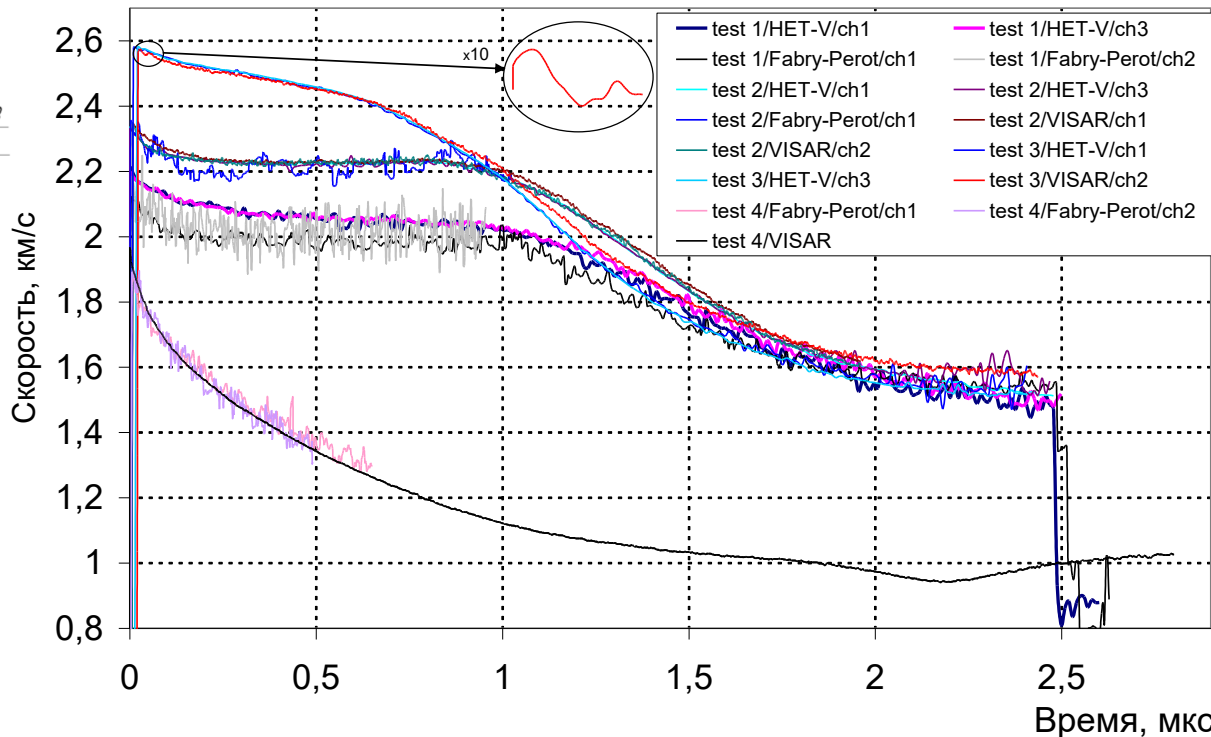
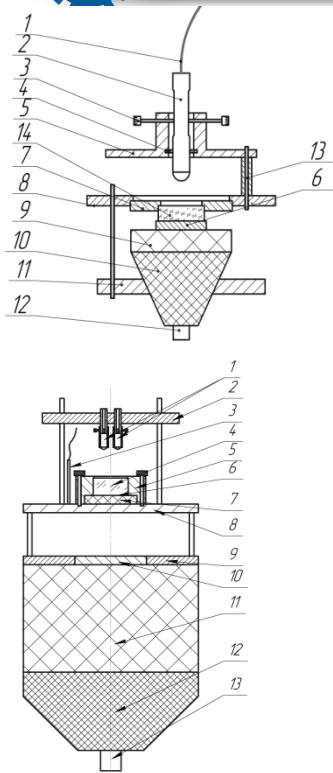




# Совмещение измерений VISAR - ФП - PDV / HET-V



РФЯЦ-ВНИИФ  
РОСАТОМ



$$p_s = 32,2 \pm 0,6 \text{ ГПа,}$$
$$u_s = 2,40 \pm 0,05 \text{ км/с,}$$

$$p_J = 26,5 \pm 0,6 \text{ ГПа,}$$
$$u_J = 1,99 \pm 0,04 \text{ км/с.}$$

$$p_s = 37,85 \text{ ГПа,}$$
$$k = 1,401$$

$$p_s = 41,07 \text{ ГПа,}$$
$$k = 1,509$$

$$p_s = 47,7 \text{ ГПа,}$$
$$k = 1,759$$

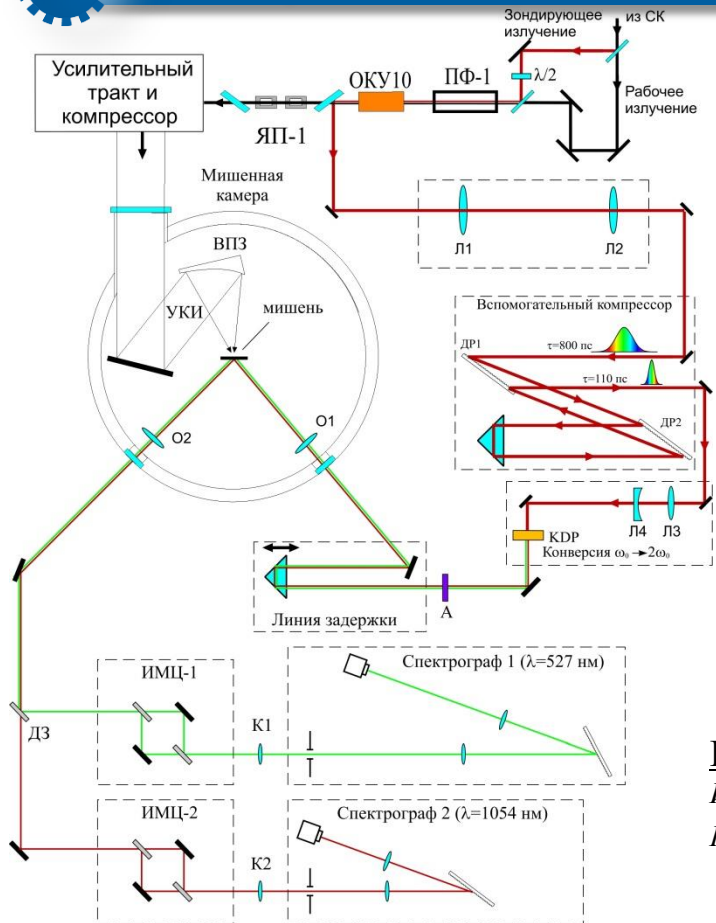
Е.А. Козлов, В.И. Таржанов, И.В. Теличко, А.В. Павленко, С.Н. Малюгина, и др. *Структура зоны реакции детонирующего мелкозернистого ТАТБ*. Эксперимент. ЗНЧ, Снежинск, 2012.;  
*Структура зоны реакции ТАТБ при нормальной и пересжатой детонации*. ХНЧ, Саров, 2013.



# Лазерные измерители скорости chirпированным импульсом



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



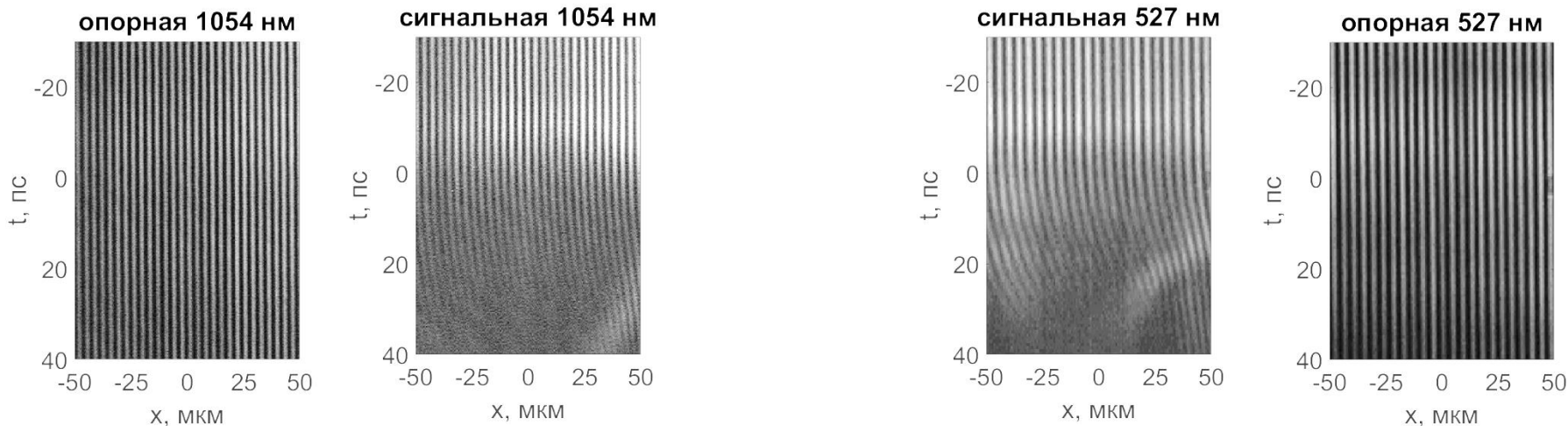
Длительность греющего лазерного импульса, пс	0,9
Энергия греющего лазерного импульса, Дж	10,6 – 12,8
Медные мишени, мкм	5; 10
Длительность зондирующего лазерного импульса, пс	110
Временное разрешение метода, пс	10
Пространственное разрешение в канале $\omega_0$ , мкм	10,7
Пространственное разрешение в канале $2\omega_0$ , мкм	6,9

Е.С. Борисов, Д.С. Гаврилов, Н.Ю. Титаренко. *ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СКОРОСТИ РАЗЛЕТА ВЕЩЕСТВА ПРИ ИЗОХОРИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ УЛЬТРАКОРОТКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ*, ЗНЧ-2023





## Эксперименты с мишенями 10 мкм



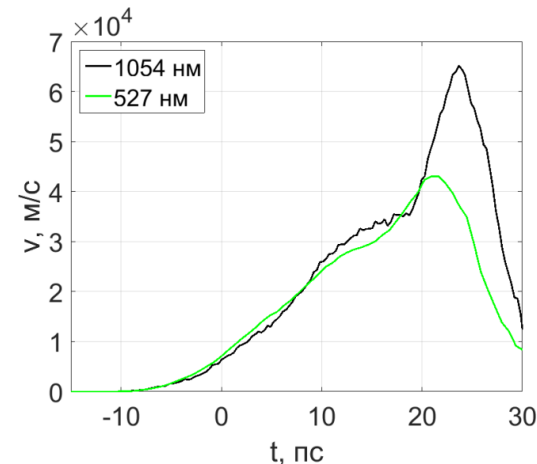
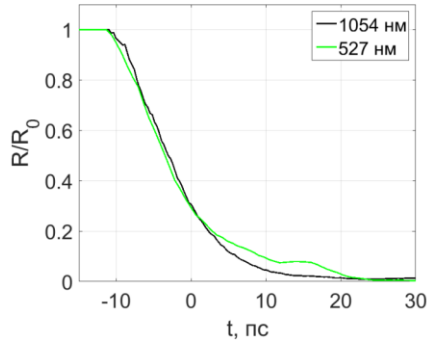
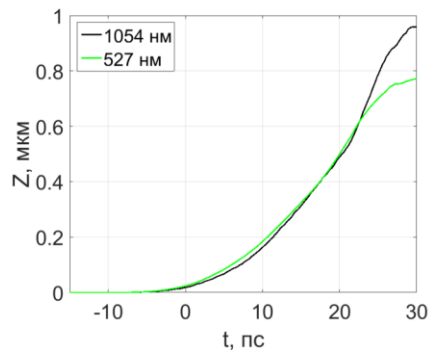
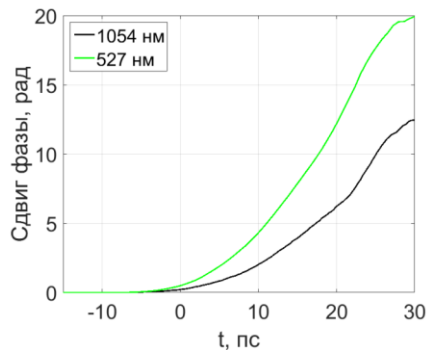
Параметры эксперимента	Значение
Энергия лазерного импульса на медной мишени, Дж	12,4
Интенсивность лазерного импульса на мишени, Вт/см <sup>2</sup>	$2 \cdot 10^{18}$



# Лазерные измерители скорости chirпированным импульсом



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



Медная мишень 10 мкм,  
максимальная скорость поверхности критической плотности  
65 км/с для 1054 нм и 43 км/с для 527 нм

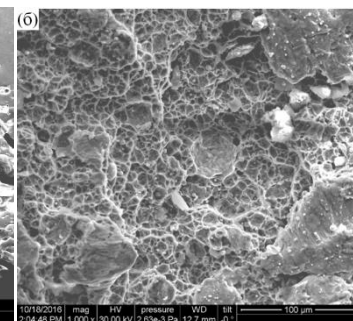
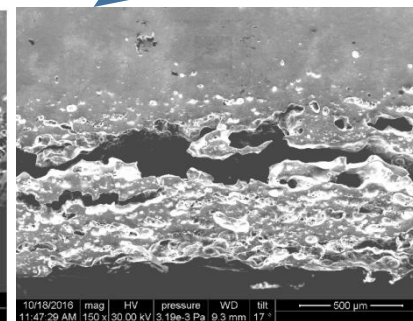
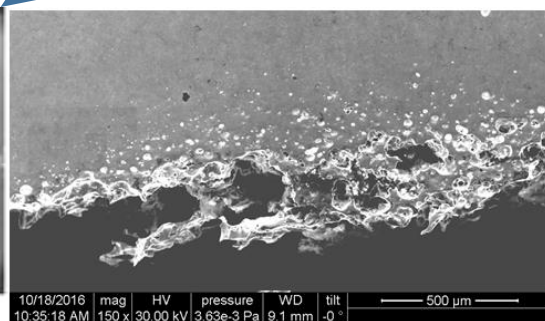
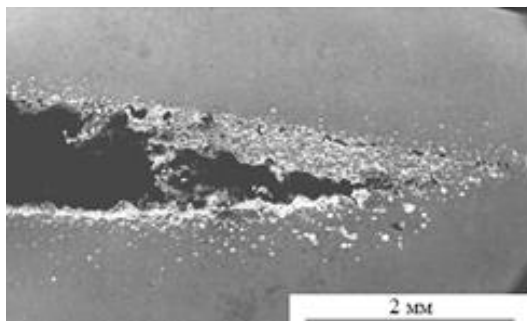
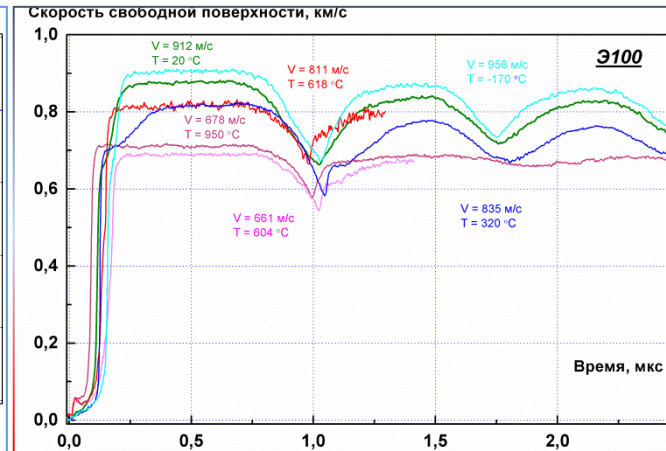
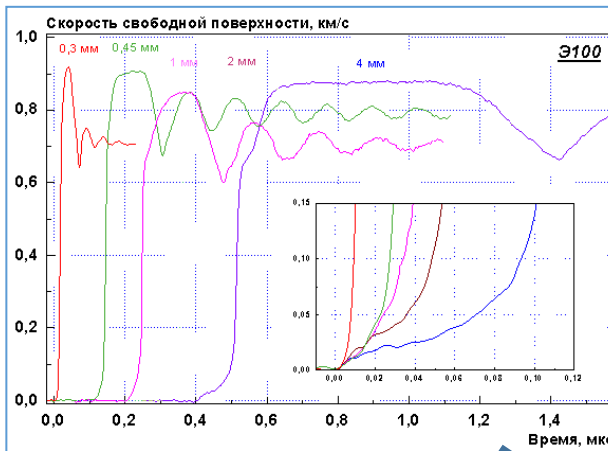
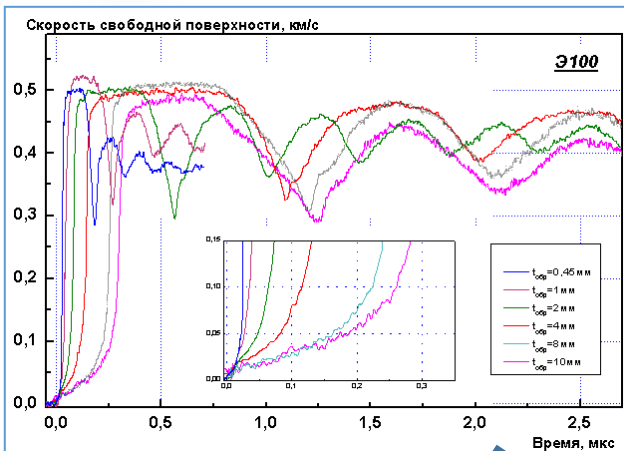
Параметры эксперимента	Значение
Энергия лазерного импульса на медной мишени, Дж	12,4
Интенсивность лазерного импульса на мишени, Вт/см <sup>2</sup>	2·10 <sup>18</sup>



# Профили волн напряжений, цирконий Э100



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

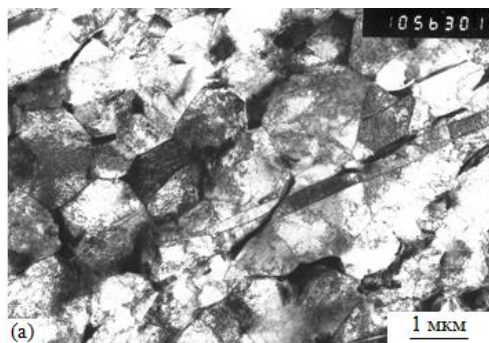
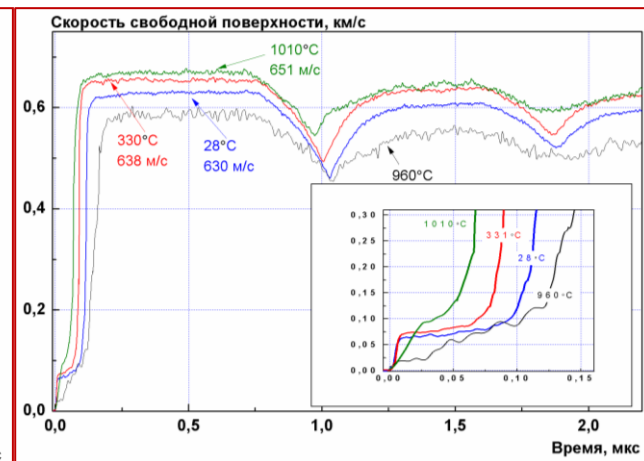
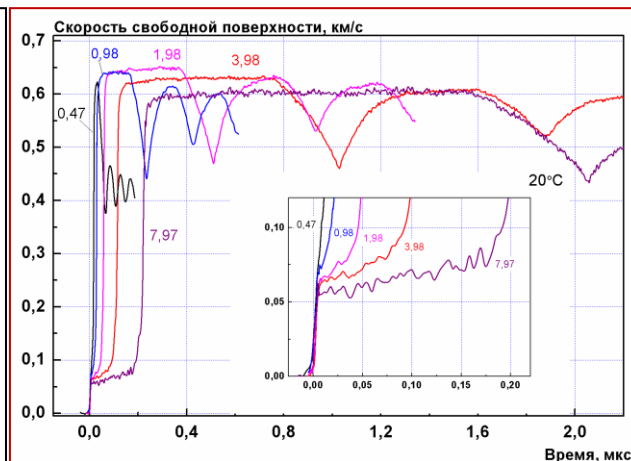
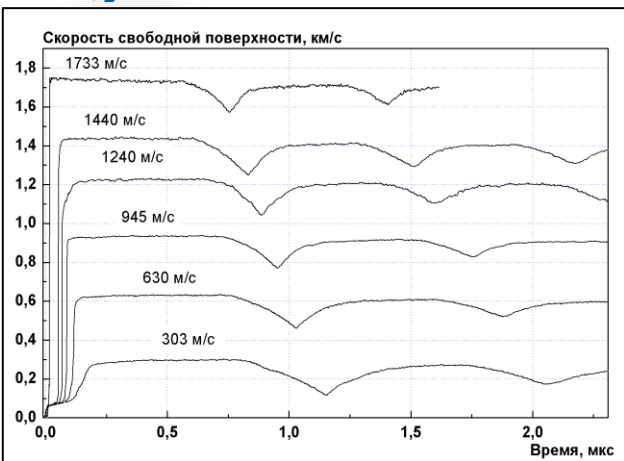




# Профили волн напряжений, циркониевый сплав Э635

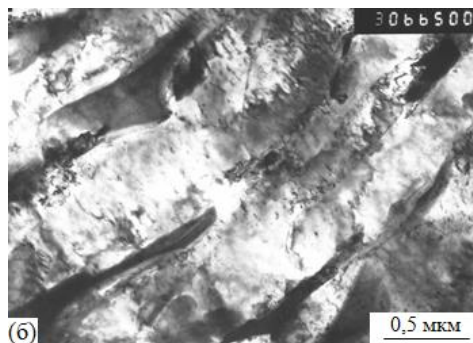


РФАЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



(a)

Исходное состояние



(b)

$V = 0,3 \text{ км/с}$ ;



(e)

$V = 0,22 \text{ км/с}$ ;  $T = 210 \text{ °C}$ ;

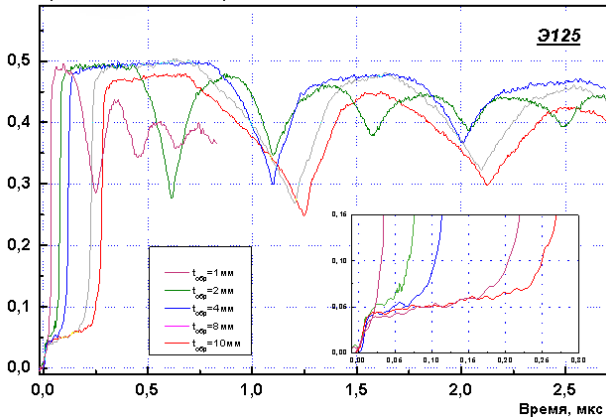


# Профили волн напряжений, циркониевый сплав Э125

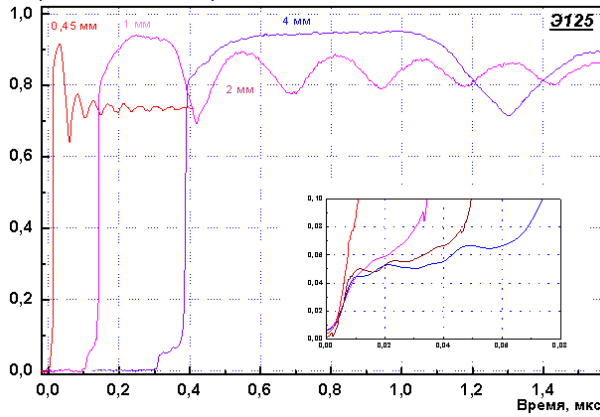


РФАЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

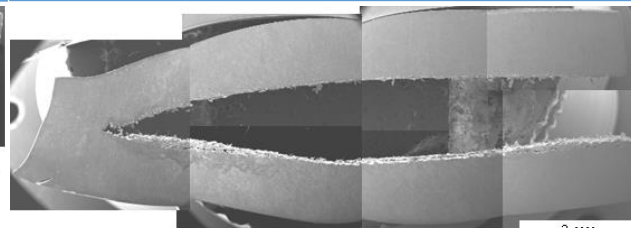
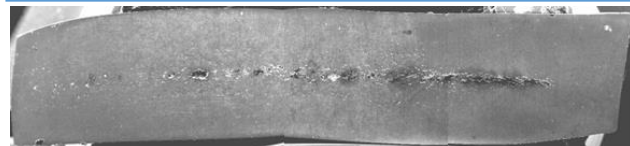
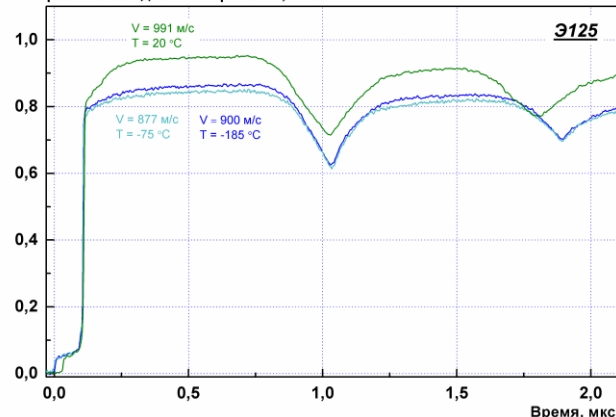
Скорость свободной поверхности, км/с



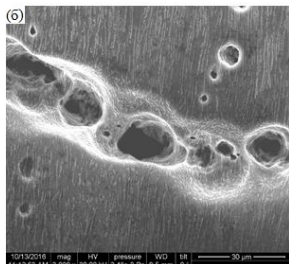
Скорость свободной поверхности, км/с



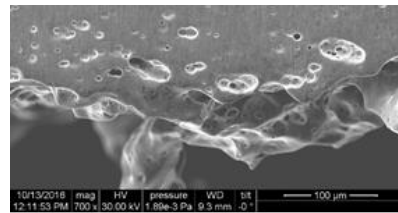
Скорость свободной поверхности, км/с



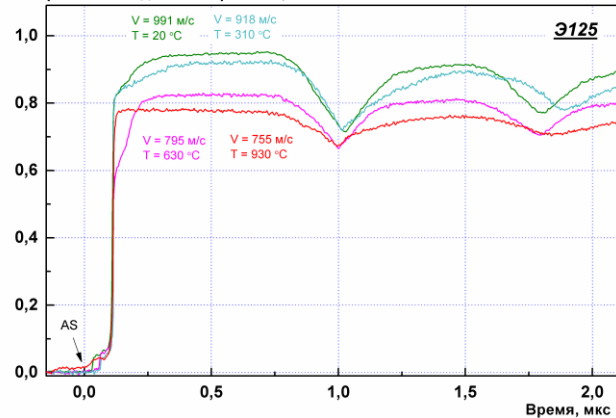
$V = 0,3 \text{ км/с};$



$V = 0,5 \text{ км/с};$



Скорость свободной поверхности, км/с



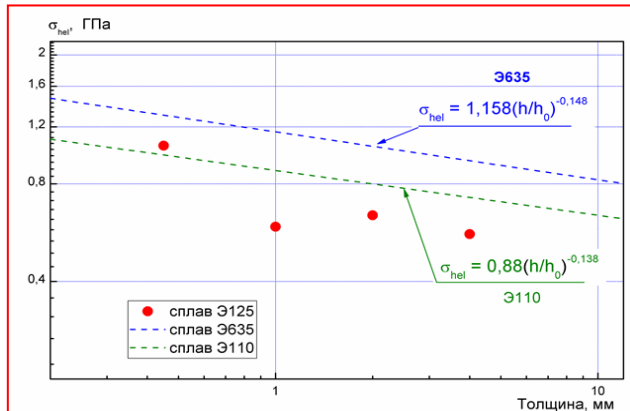
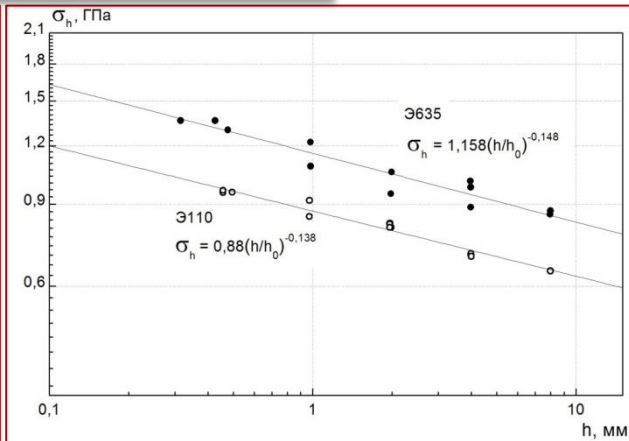
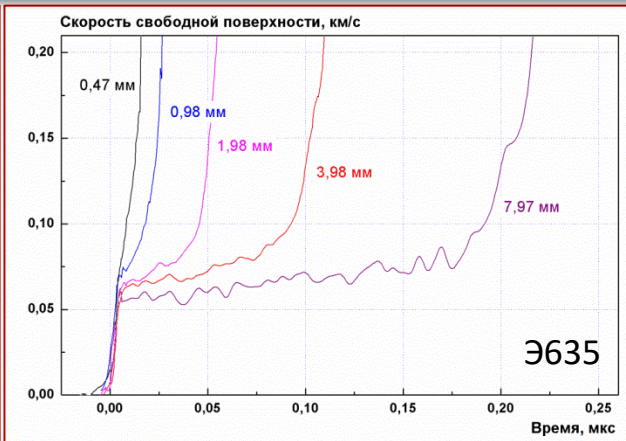
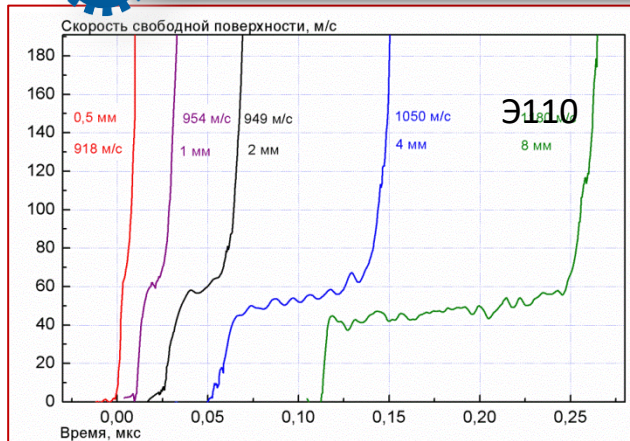




# Цирконий, циркониевые сплавы, затухание упругого предвестника



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



$$\frac{d\sigma_x}{dh} \Big|_{HEL} = -\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{c_1} \frac{\partial \sigma_x}{\partial t}$$

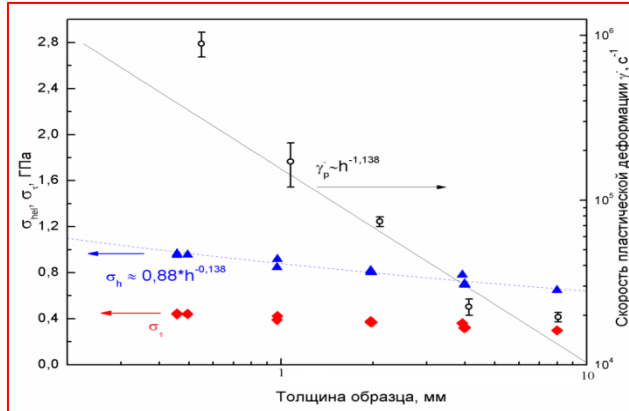
$$\frac{du}{dt} \Big|_{HEL} = \rho_0 \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{c_1} \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$\frac{d\sigma_x}{dh} \Big|_{HEL} = -\frac{4}{3} \frac{G \dot{\gamma}_p}{c_1}$$

$$\frac{d\sigma_x}{dh} \Big|_{HEL} = -\frac{S\alpha}{h_0} \left(\frac{h}{h_0}\right)^{-(\alpha+1)}$$

$$\sigma_h = S(h/h_0)^{-\alpha}$$

$$\dot{\gamma}_p = \frac{3S\alpha c_1 (h/h_0)^{-(\alpha+1)}}{4h_0 G}$$



- G.E. Duvall. In: Stress Waves in Inelastic Solids, edited by H. Kolsky and W. Prager, 1964
- Ahrens T.J. and Duvall G.E. *J. Geophys. Res.*, **71**(18), 4349-4360 (1966).

- J. R. Asay, G. R. Fowles, and Y. Gupta, *J. Appl. Phys.* 43, 744 (1972).
- Г.В. Гаркушин, Г.И. Канель, С.В. Разоренов. ФТТ, 2012. Т. 54, № 5.



# Цирконий, циркониевые сплавы, откольная прочность



РФЯЦ-ВНИИФ  
РОСАТОМ

Откольная прочность ( $\sigma_{sp}$ ), ГПа

$$\sigma_{sp} = 0.402 \left( \frac{\dot{V}}{V} \right)^{0.164}$$

$$\sigma_{sp} = 0.96 \left( \frac{\dot{V}}{V} \right)^{0.095}$$

Скорость деформирования,  $10^6 \text{ c}^{-1}$

## Цирконий Э100

Откольная прочность, ГПа

$$\sigma_{отк} = 0,96 (V/V_0)^{0,095}$$

$$\sigma_{отк} = 0,402 (V/V_0)^{0,164}$$

Э100

●  $\alpha$ -Zr  
●  $\alpha \leftrightarrow \omega$ -Zr

Скорость деформирования,  $\text{c}^{-1}$

## Сплавы Zr – 1% Nb

Откольная прочность, ГПа

$$\sigma_{отк} = 0,96 (V/V_0)^{0,095}$$

$$\sigma_{отк} = 0,402 (V/V_0)^{0,164}$$

Э125

◆  $\alpha$ -Zr  
●  $\alpha \leftrightarrow \omega$ -Zr

Скорость деформирования,  $\text{c}^{-1}$

## Сплав Zr – 2,5 % Nb



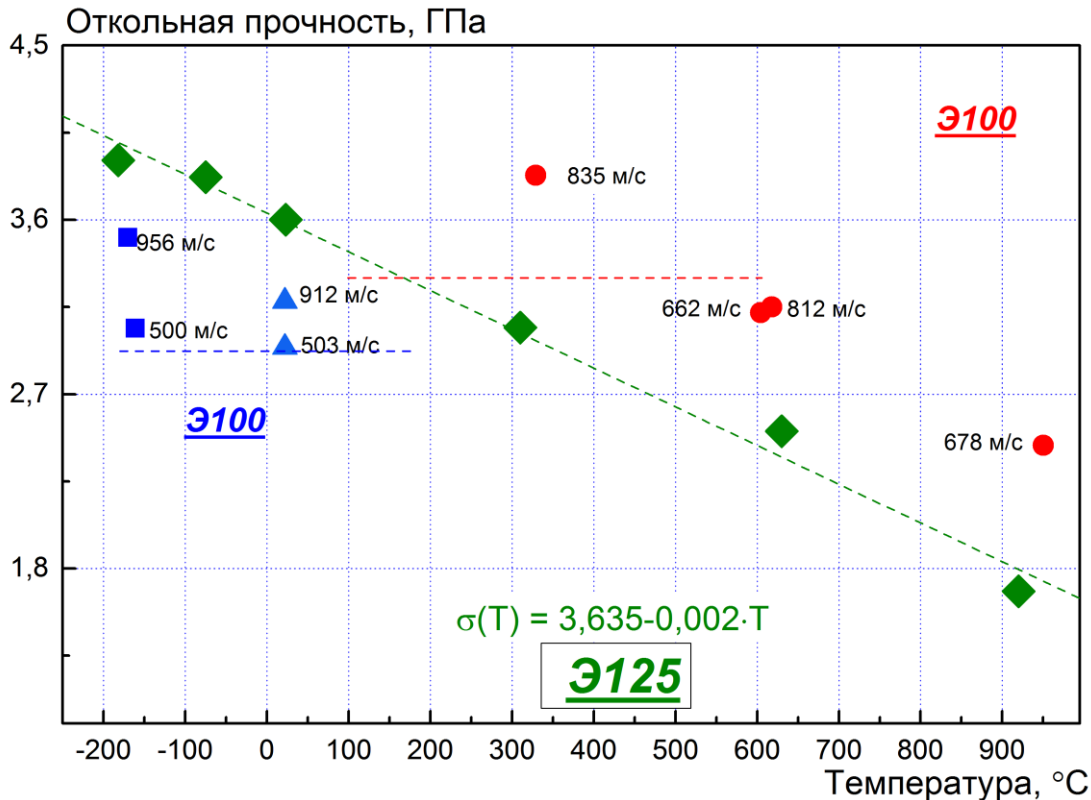
# Цирконий Э100, циркониевый сплав Э125



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

Сплав  
Zr – 2,5 % Nb

Цирконий  
Э100



Сплав  
Zr – 2,5 % Nb

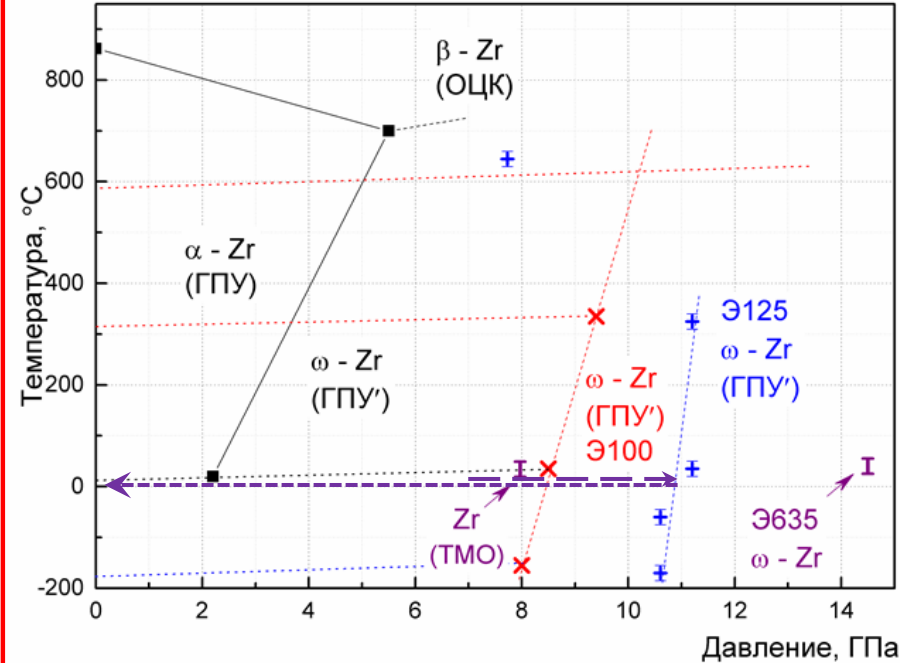
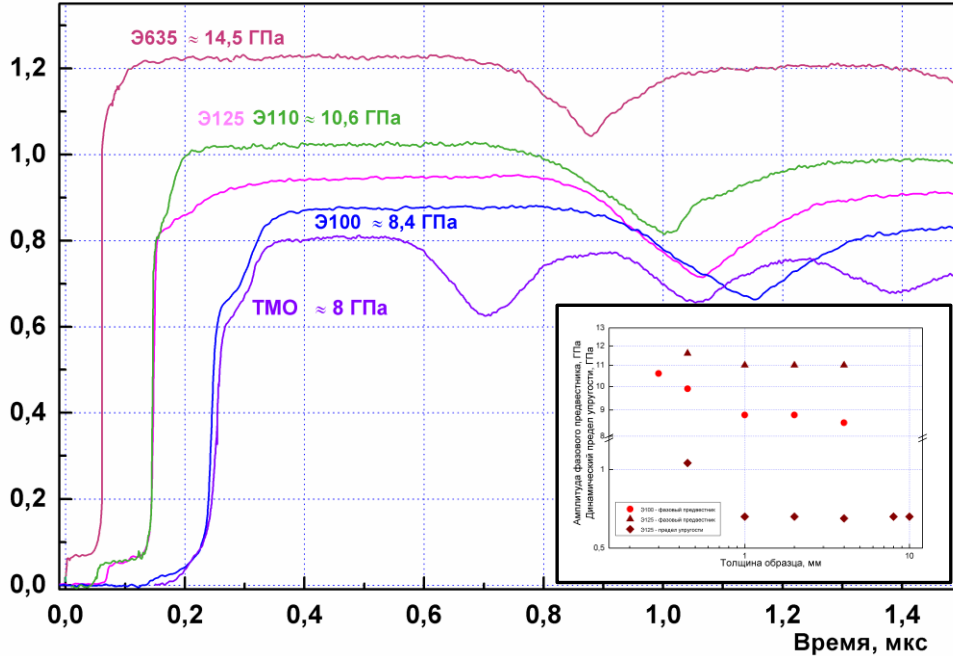


# Цирконий, циркониевые сплавы, фазовые превращения



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

Скорость свободной поверхности, км/с



Zr (ТМО)  $\alpha \rightarrow \omega$ : 1 мм - 8,1 ГПа; 2 мм - 7,7 ГПа; 6 мм - 7,4 ГПа. Э110 - 8,4 ГПа;  
Сплавы: Э110  $\alpha \rightarrow \omega$ : 0,46 мм - 11,2 ГПа; 4 мм - 10,6 ГПа;  
Э635  $\alpha \rightarrow \omega$ : 4 мм - 14,5 ГПа; Э125  $\alpha \rightarrow \omega$ : 4 мм - 10,6 ГПа.

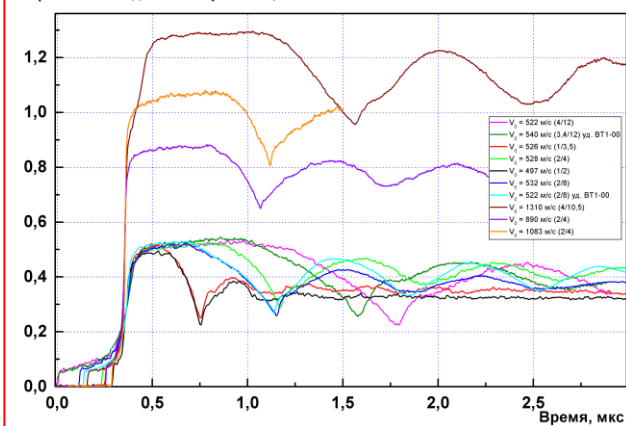


# Титан ВТ1-00, ВТ1-0, титановые сплавы ВТ8, ВТ20, ОТ4

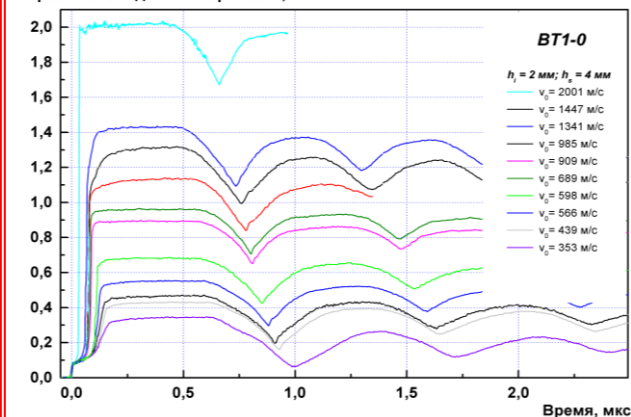


РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

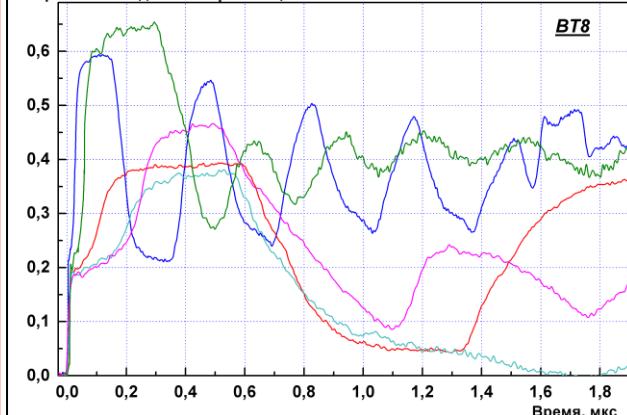
Скорость свободной поверхности, км/с



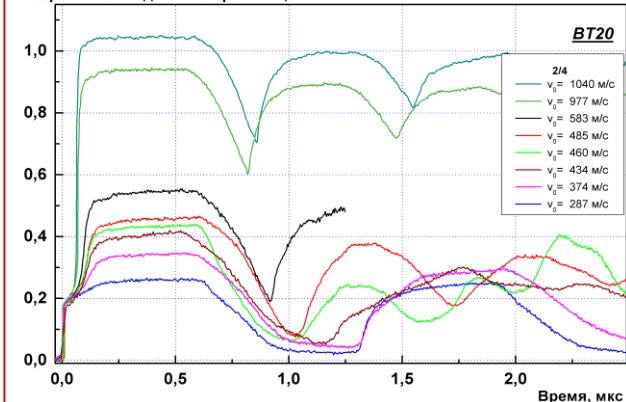
Скорость свободной поверхности, км/с



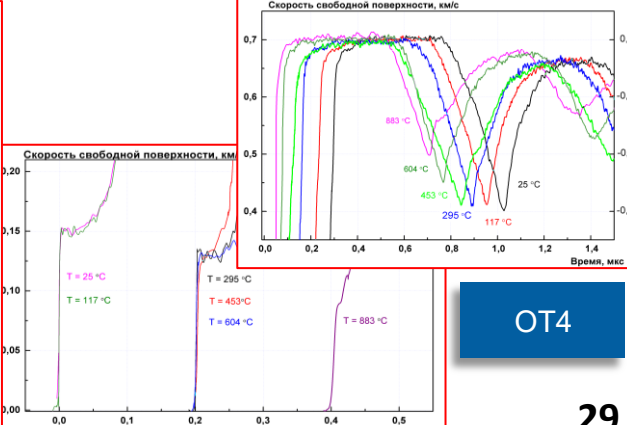
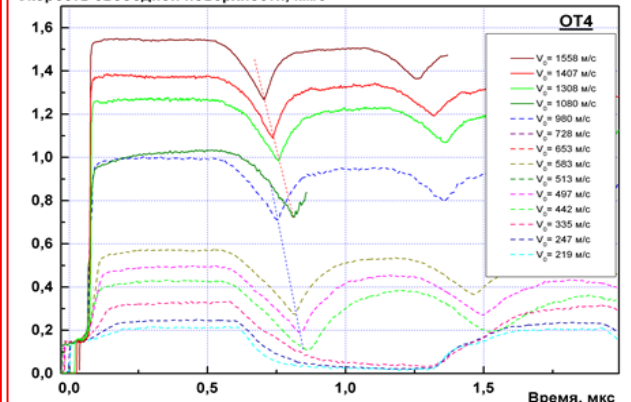
Скорость свободной поверхности, км/с



Скорость свободной поверхности, км/с



Скорость свободной поверхности, км/с



ОТ4





# Динамические свойства титана, титановых сплавов



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

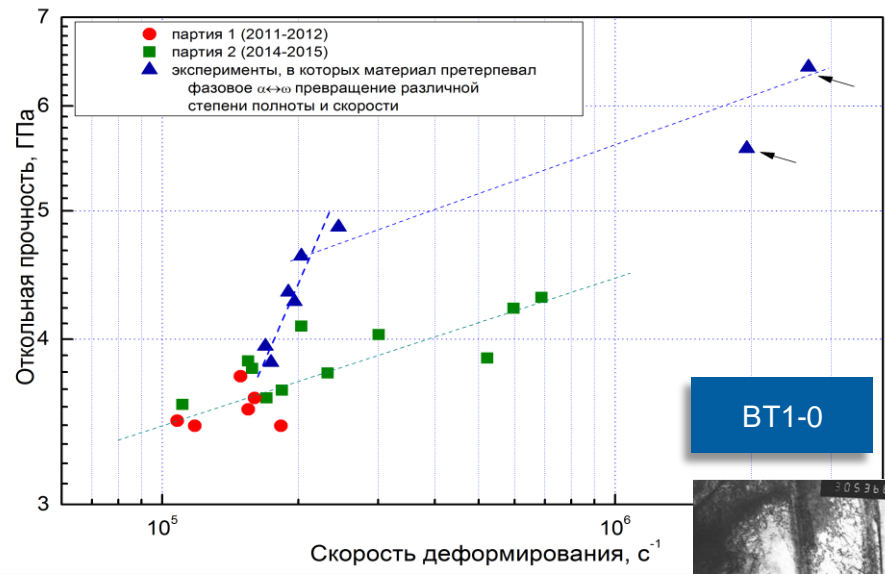
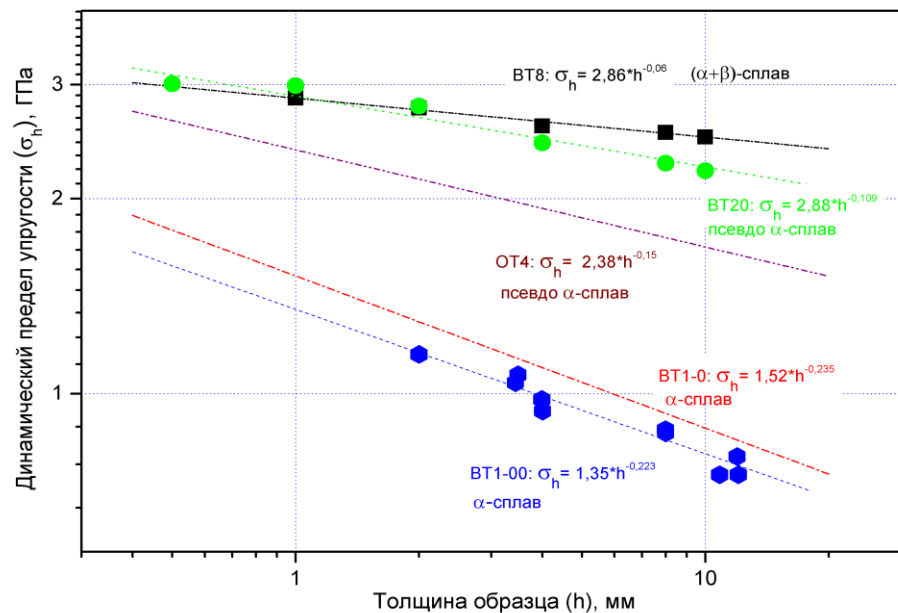
BT1-00

BT1-0

BT8

BT20

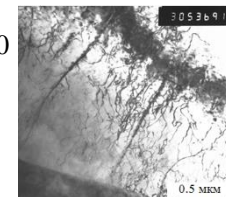
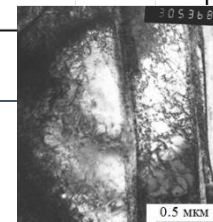
OT4



А.В.Павленко, А.В.Добромыслов, Н.И.Талуц, и др.  
*Ударно-волновы свойства и деформационная структура технически чистого титана. ФММ, том 122, №8, 2021*

## Механизмы деформирования:

Высокоскоростная пластическая деформация BT1-0 осуществляется скольжением (снизу) и двойникованием (сверху), скольжение в основном протекает в базисной плоскости дислокациями типа  $b = a/2 \langle 1120 \rangle$



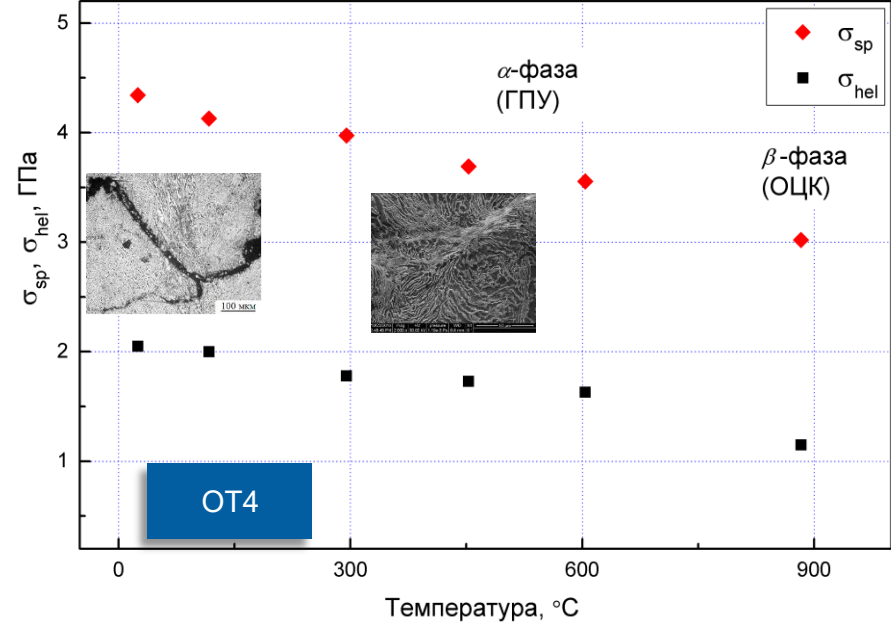
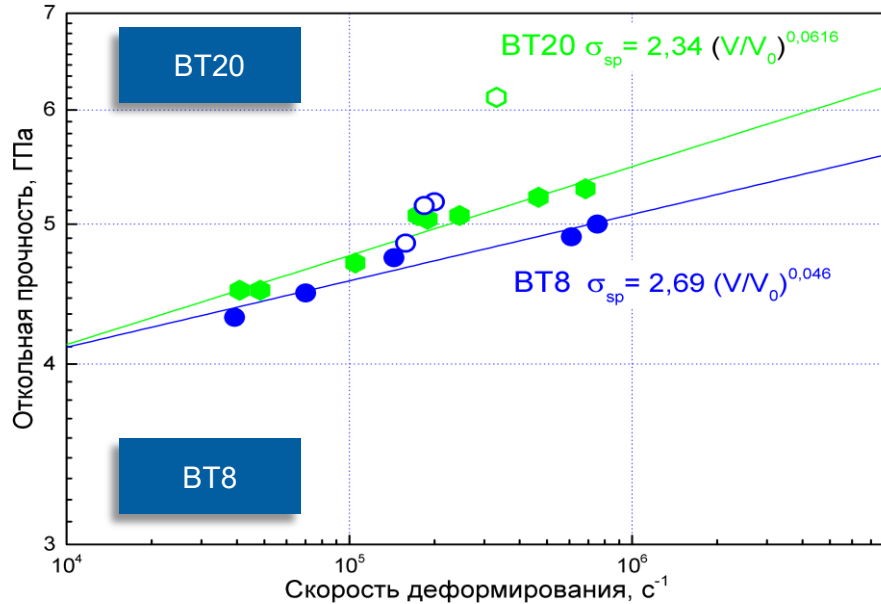
## Затухание упругих предвестников



# Динамические свойства титановых сплавов



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



BT20

Скольжение – основной механизм пластической деформации; не наблюдается микродвойников и полос локализации деформации; Откольные трещины проходят в нескольких уровнях, преимущественно по границам первичной  $\alpha$ -фазы. При нагреве большое количество полос локализации деформации, приобретающих анизотропную форму.

OT4

Вязкое разрушение; локализация деформации, добавляется сдвиговой характер разрушения. При повышении температуры большое количество полос локализации деформации, в том числе между откольными трещинами; прослойки  $\beta$ -фазы имеют зубчатый вид, что свидетельствует о массопереносе материала в процессе деформации

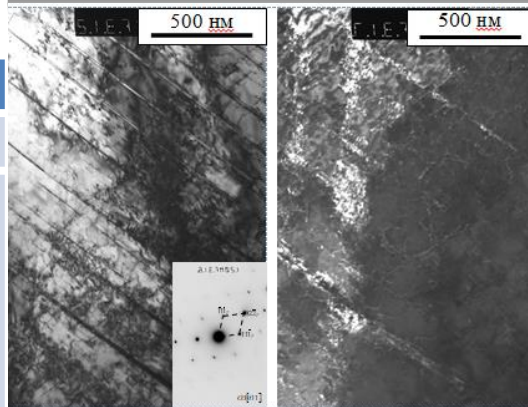
Состав X16H15M3T1 в % по массе:

<sup>24</sup> Cr	<sup>28</sup> Ni	<sup>42</sup> Mo	<sup>22</sup> Ti	<sup>12</sup> C
15.9	15	2.5	1.02	0.03

Физико-механические свойства:

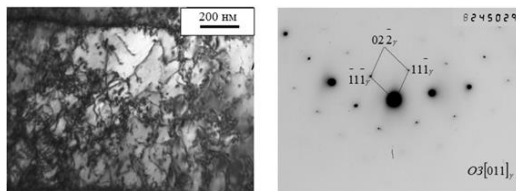
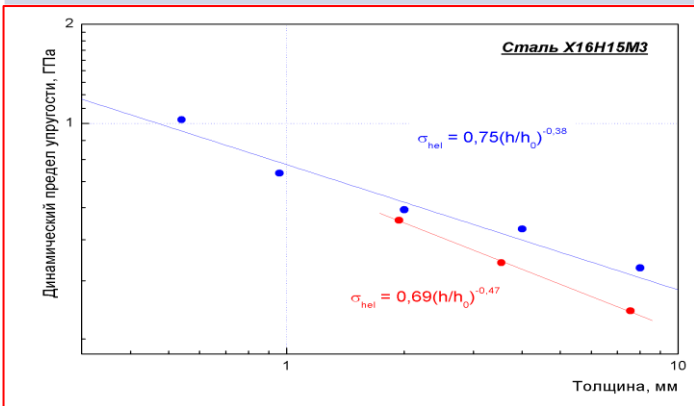
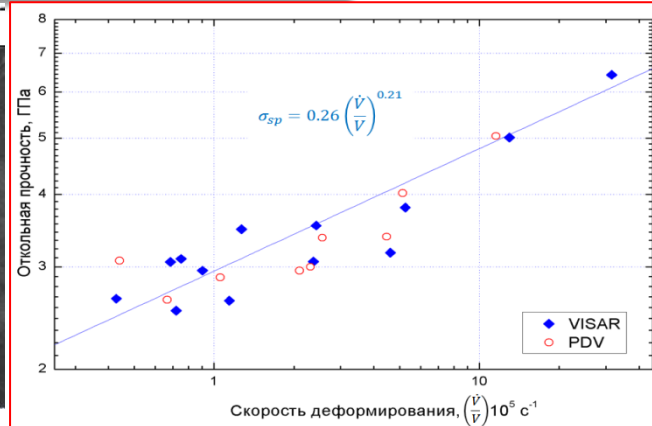
- плотность - 7.95 г/см<sup>3</sup>
- продольная скорость звука -  $c_l = 5731 \pm 10$  м/с
- поперечная скорость звука -  $c_s = 3037 \pm 5$  м/с
- объемная скорость звука  $c_b = 4,53$  км/с

Сталь X16H15M3T1 – аустенитная сталь, в закаленном от 1100°C состоянии ее структура представляет собой полиэдрические зерна аустенита размером от 20 до 40 мкм. Зерна имеют стабильную ГЦК решетку.



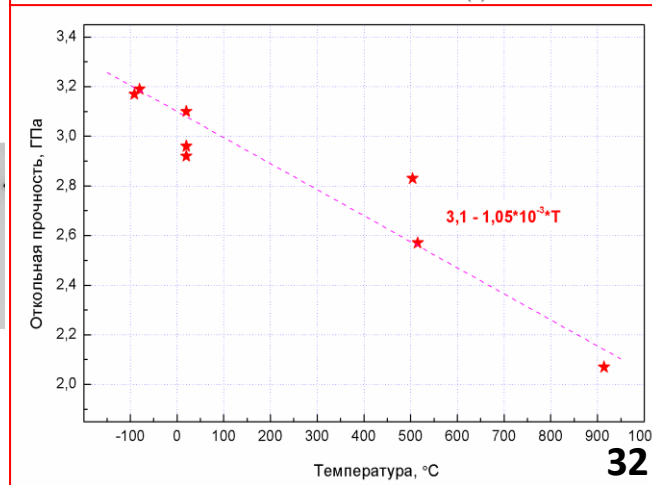
T= -90, 20°C

большое количество дислокаций и тонких двойников деформации



T= 500°C

двойники практически не образуются, зарождение и перемещение дислокаций





# Реакторные стали - X13B2



РФАЭЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

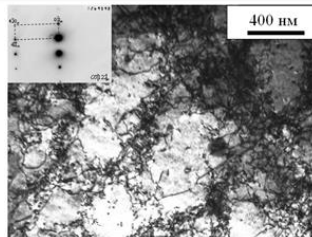
Состав X13B2 в % по массе:

$^{12}\text{C}$	$^{24}\text{Cr}$	$^{74}\text{W}$	$^{25}\text{Mn}$	$^{14}\text{Si}$	$^{23}\text{V}$	$^{41}\text{Nb}$	$^{22}\text{Ti}$	$^{39}\text{Y}$
0,08	12,1	2,15	0,27	0,43	0,01	0,19	0,65	0,33

Физико-механические свойства:

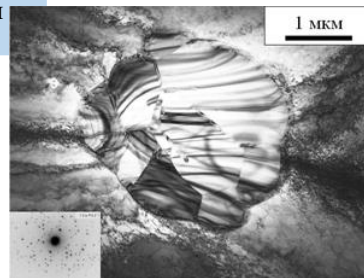
- плотность -  $7.65 \text{ г/см}^3$
- продольная скорость звука -  $c_l = 5972 \pm 10 \text{ м/с}$
- поперечная скорость звука -  $c_s = 3140 \pm 5 \text{ м/с}$
- рассчитанная объемная скорость звука  $c_b = 4,57 \text{ км/с}$

Структура стали X13B2 состоит из зерен феррита размером 100-150 мкм, имеющих криволинейные границы (наличие ферритных зерен с ОЦК решеткой подтверждено микродифракцией электронов). Внутри зерен и по их границам располагаются дисперсные частицы вторых фаз.



T = 20°C

повышенная плотность дислокаций ячеистой сетчатой структуры



T = 500°C

двойники практически не образуются, зарождение и перемещение дислокаций, двойное измельчение ячеек, сохраняются карбиды

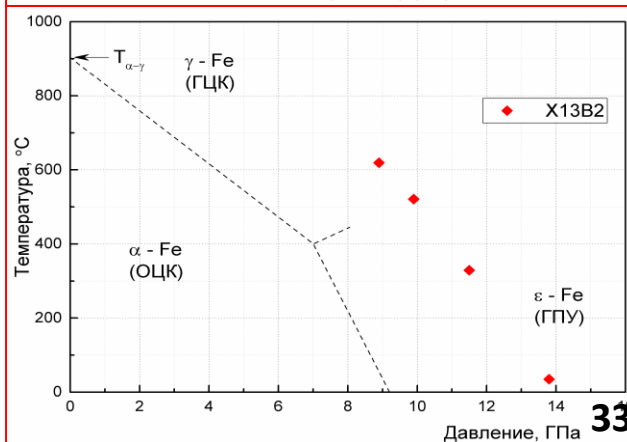
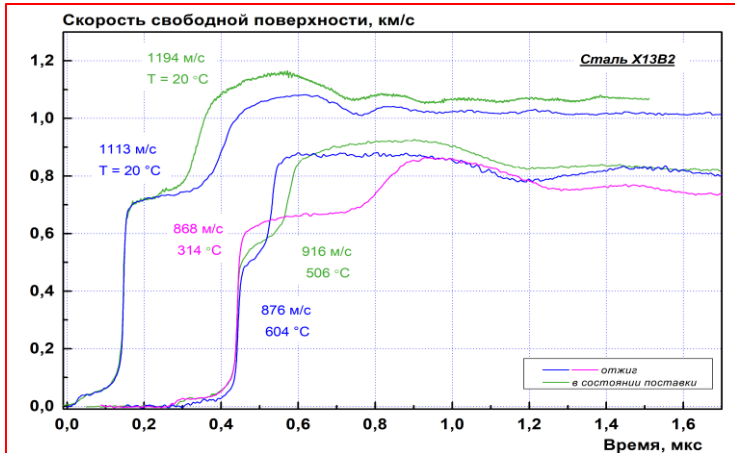
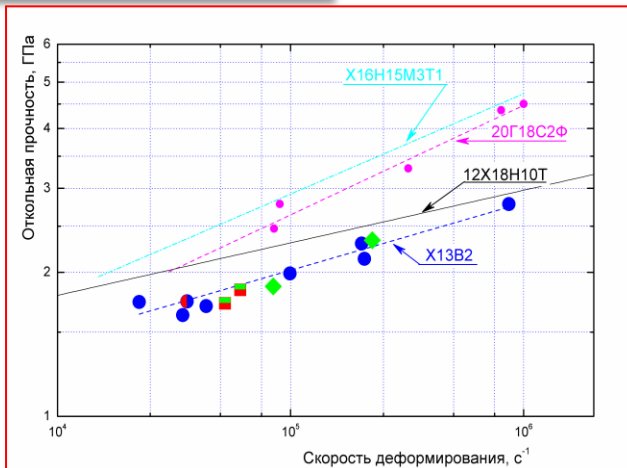


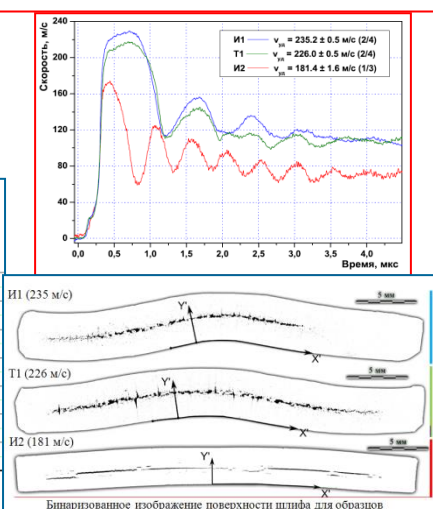
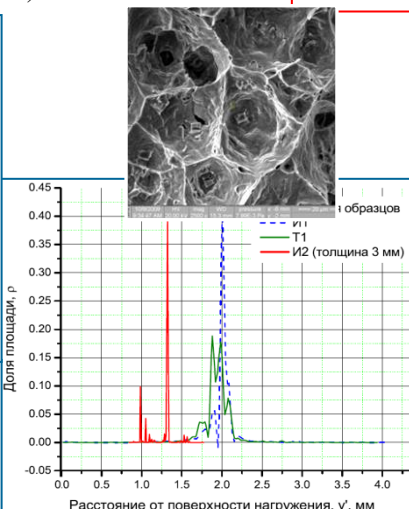
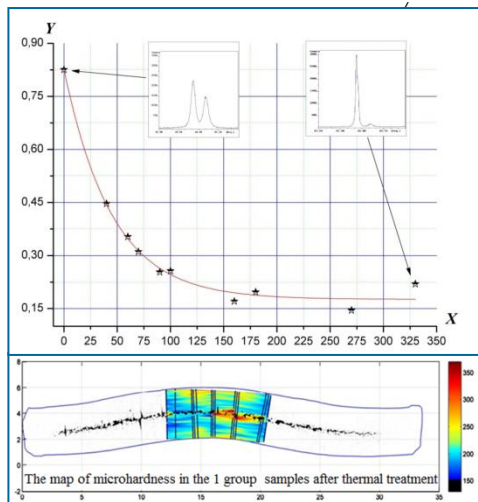
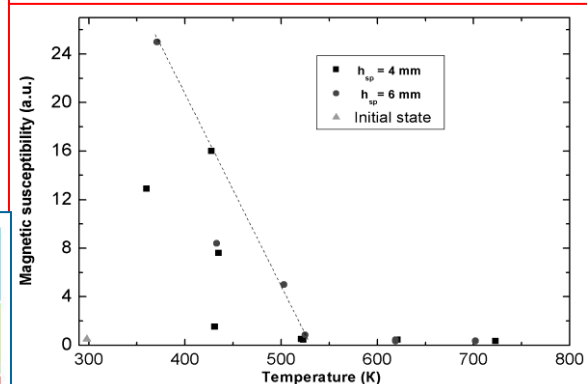
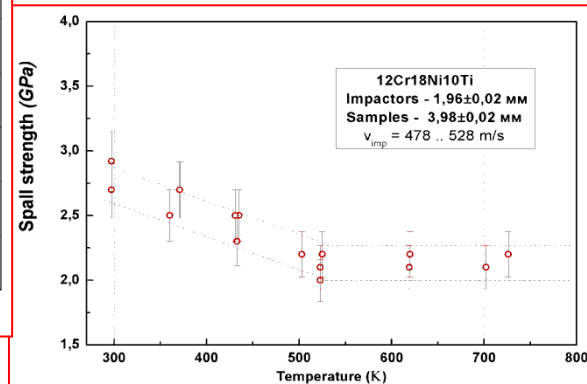
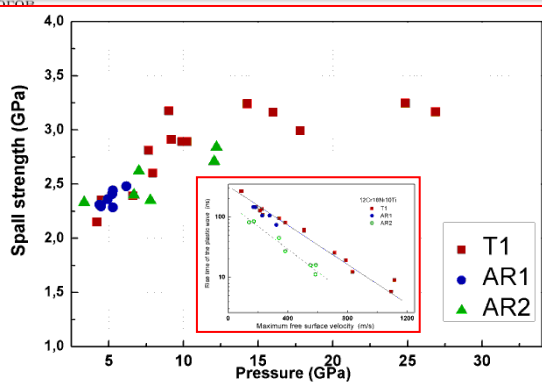
Таблица 1. Химический состав нержавеющей стали 12X18Н10Т, импортных аналогов 304 и 316, % масс.

C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	S	P	Cu	Mo
12X18Н10Т [52]									
<0.12	<0.8	<2.0	17.0-19.0	9.0-11.0	0.6-0.8	0.020	0.035	0.3	-
SS304									
<0.08	<1	<2	17.5-20	8-11	-	<0.03	<0.045	-	-
SS316									
~0.08	~1	~1	16-18	10-14	-	-	-	-	2-3

Таблица 2. Химический состав нержавеющей стали 12X18Н10Т плавки 1Т1583, % масс

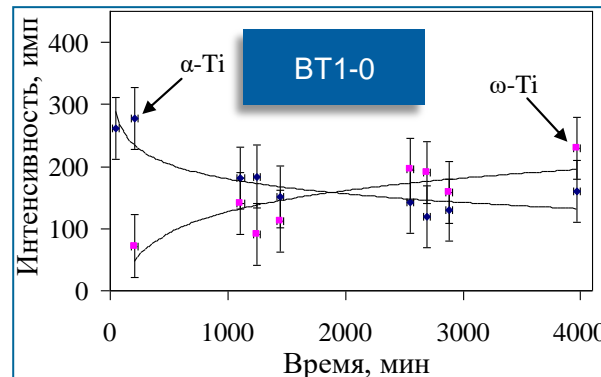
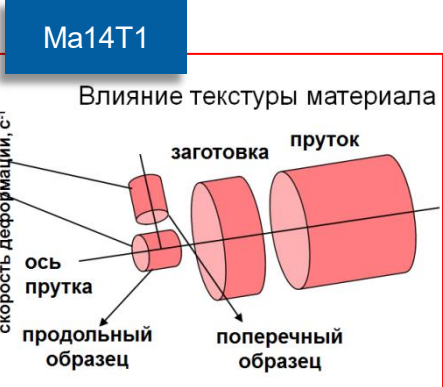
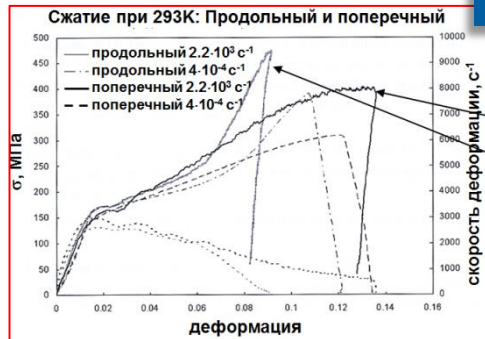
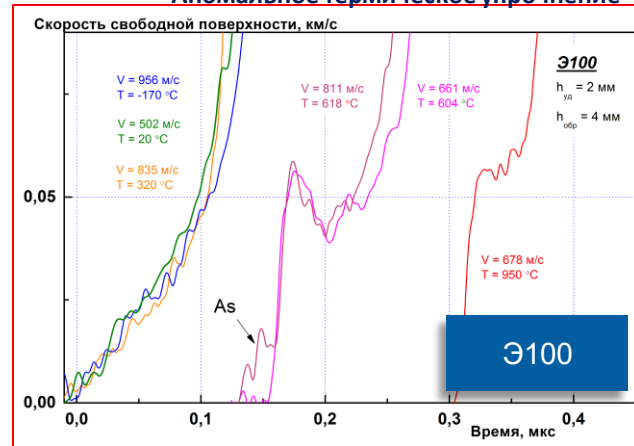
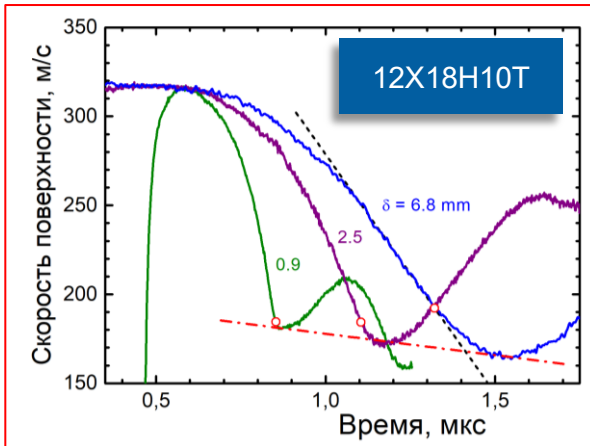
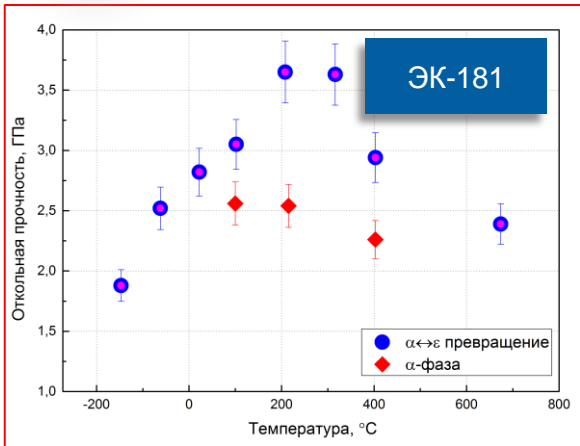
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	W	Ti	Fe
0.033	0.43	0.45	0.027	0.010	17.28	9.23	0.16	0.15	0.04	отс	0.36	осн

$$C_l(III) = 5781,4 \pm 3,6 \text{ м/с}, C_l(TI) = 5755,3 \pm 4,6$$





## Аномальное термическое упрочнение

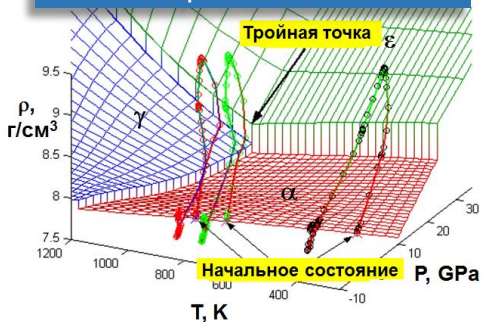




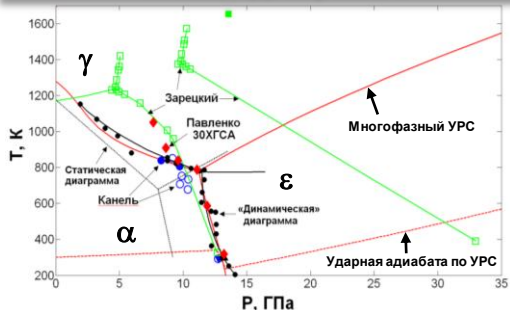
# Фазовые превращения, сталь 30ХГСА

## Уточнение границ и кинетики превращений

### Многофазный УРС Fe

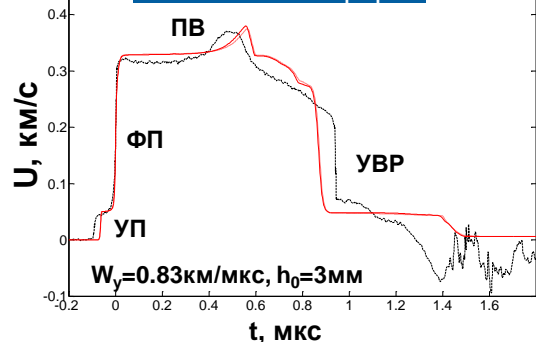


### Фазовая диаграмма

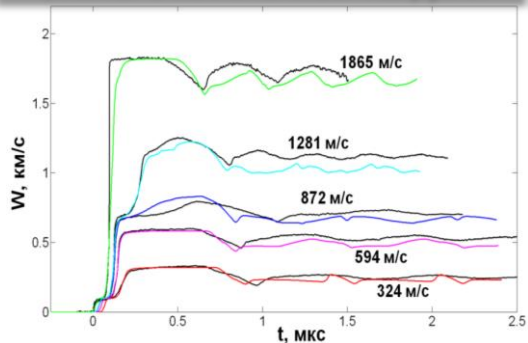


## Исследование профилей разгрузки

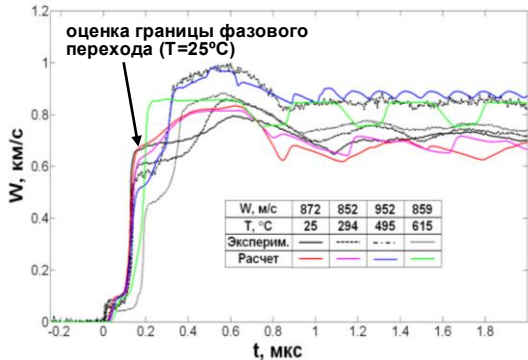
### 30ХГСА/сапфир



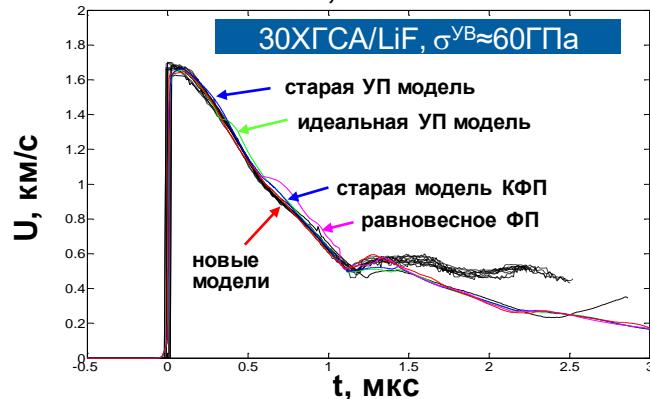
## Опыты с изменением нагрузки



## Опыты с нагретыми образцами



### 30ХГСА/LiF, $\sigma^{УВ} \approx 60 \text{ ГПа}$



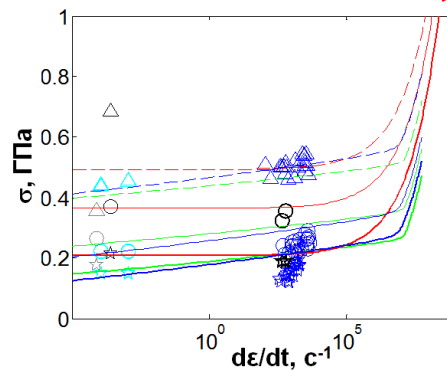
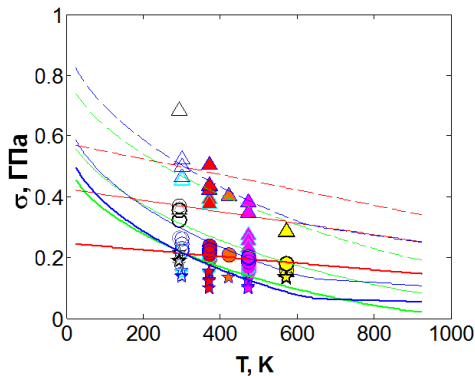
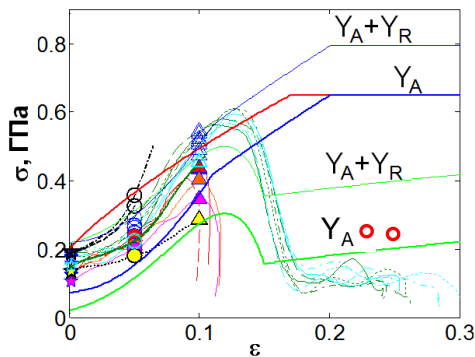
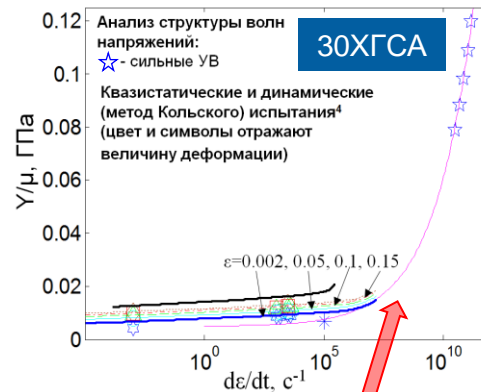
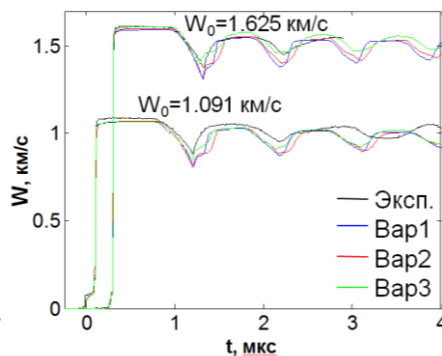
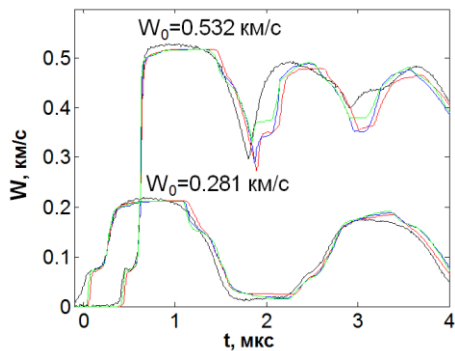


# Сдвиговая прочность $Y(\varepsilon, d\varepsilon/dt, T, P, \xi)$



РФЯЦ-ВНИИФ  
РОСАТОМ

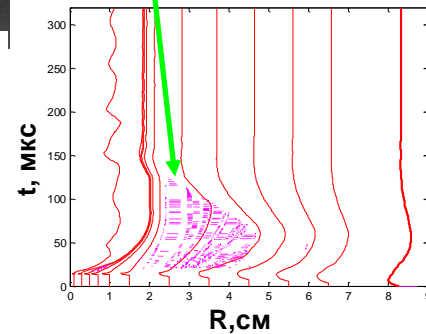
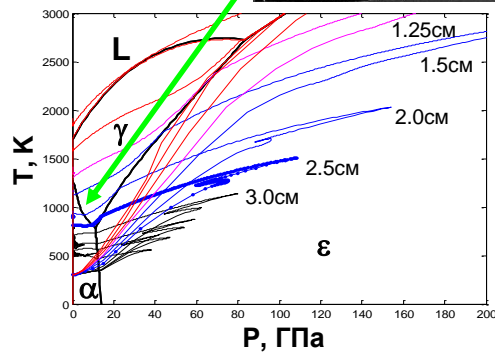
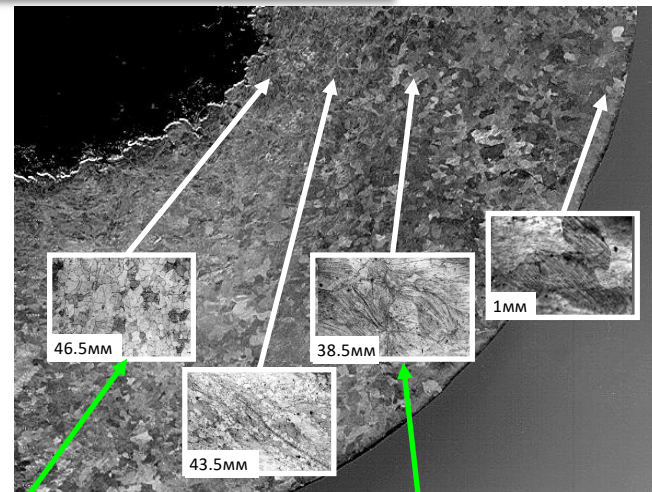
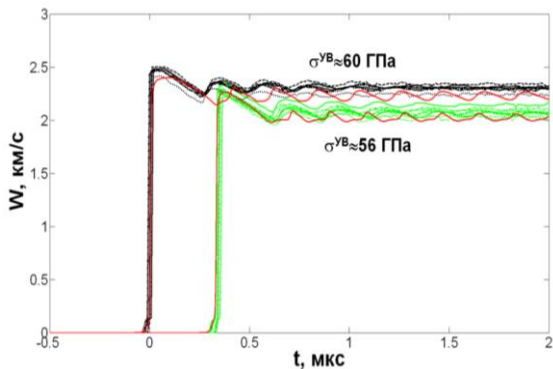
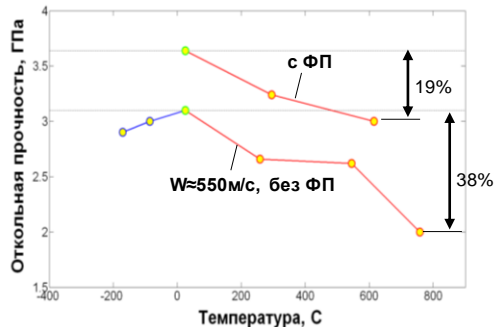
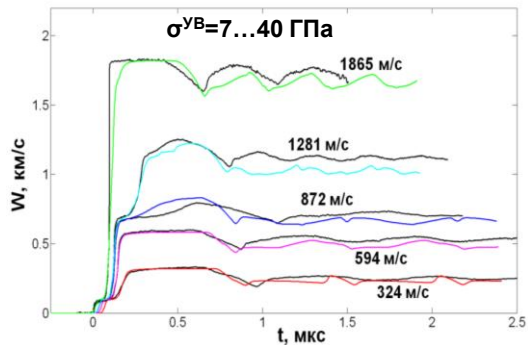
Ma14T1

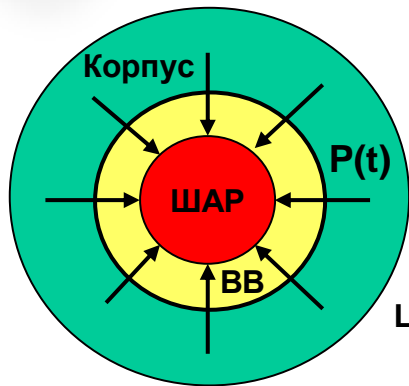




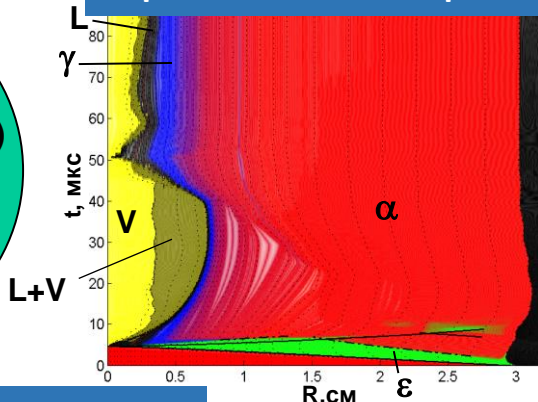
# Разрушение и залечивание повреждений $\sigma_*(d\varepsilon/dt, T, \xi)$

30ХГСА





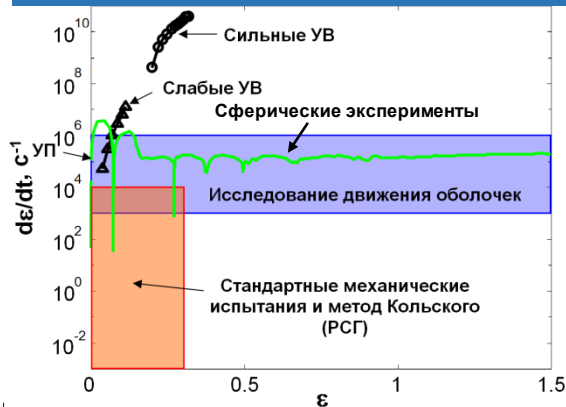
Взрывное сжатие шара Fe



Влияние прочности и фазовых превращений на характеристики сжатия

Материал	Переданная энергия, кДж		Конечный радиус, мм			
	Эксперим.	Расчет	Эксперимент		Расчет	
Cu	100	0.98	0.98	32.91	1.0285	1.030
12X18H10T	102	1.00	1.00	32.46	1.0144	1.021
Fe(Ст3)	115	1.14	1.14	32.34	1.0064	1.014
30ХГСА	129	1.27	1.29	32.26	1.0081	1.007

Изменение скорости деформации



Модели должны учитывать:

- Протекание полиморфных превращений с учетом неравновесности
- Изменение прочностных свойств в условиях высокоскоростного деформирования при ударно-волновом нагружении и сжатии системы
- Зарождение и развитие разрушения с учетом изменения скорости деформации, температуры и происходящих в материале фазовых превращений
- Залечивание образовавшихся повреждений



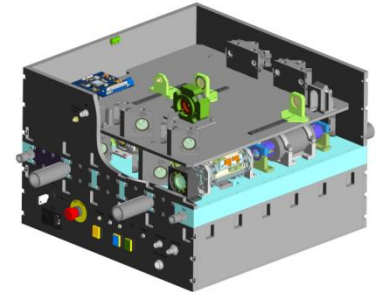


## Заключение



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

- В РФЯЦ-ВНИИТФ созданы и эксплуатируются все типы лазерных интерферометрических комплексов, предназначенных для диагностики ударно-волновых процессов в газодинамических исследованиях.
- С использованием комплексов VISAR и PDV/NET-V исследуются динамические свойства конструкционных материалов в диапазоне давлений до нескольких мегабар, в диапазоне температур от минус 180 до 1000°C, диапазоне скоростей деформирования от  $10^2$  до  $10^8$  с<sup>-1</sup>. На основе новой экспериментальной информации уточняются физико-математические модели, предназначенные для прогнозирования поведения материалов. По результатам численного моделирования всей совокупности экспериментов к настоящему времени выполнены калибровки усовершенствованной модели разрушения ряда материалов, сделаны выводы о характеристиках их фазовых превращений.
- В РФЯЦ-ВНИИТФ ([dep5@vniitf.ru](mailto:dep5@vniitf.ru)) осуществляется постанковка на серийное производство лазеров для интерферометрических комплексов PDV/MPDV, завершается разработка лазера для комплексов VISAR.





*Авторы доклада выражают благодарность коллегам, оказавшим неоценимый вклад в выполненные работы:*

*А.В. Бочков, Г.С. Софиенко, А.В. Загидулин, И.В. Касьянов,  
А.В. Петровцев, В.В. Дремов, Д.М. Шалковский, В.Н. Ногин,  
В.И. Таржанов, Е.Б. Смирнов, Д.П. Кучко, А.Ю. Гармашев,  
С.С. Мокрушин, Д.Н. Казаков, Д.А. Беляев, С.Н. Малюгина, Н.Б. Аникин,  
Е.С. Борисов, Д.С. Гаврилов, Н.Б. Титаренко, А.Г. Какшин, А.В. Потапов,  
Н.И. Талуц, А.В. Добромислов, С.В. Разоренов, А.В. Уткин, Д.А. Беляев,  
А.Е. Шестаков, А.В. Седов*