



РОСАТОМ



ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

**ЦИРКОНИЙ, КОММЕРЧЕСКИЕ ЦИРКОНИЕВЫЕ СПЛАВЫ Zr-1%Nb и Zr-2.5%Nb:  
 $\alpha \rightarrow \omega$  ПРЕВРАЩЕНИЕ,  
ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ,  
МЕХАНИЗМЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ**

Александр Валериевич Павленко

*Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский Научно-Исследовательский  
Институт Технической Физики им. академика Забабахина, Снежинск, Россия*

При поддержке ГК «РОСАТОМ»  
гос. контракт № Н.4х.44.90.13.1111  
гос. контракт № Н.4х.44.9Б.16.1012

\* - avpavlenko@vniitf.ru

Ударно-волновые исследования - **РФЯЦ-ВНИИТФ**:

С.Н. Малюгина, Д.Н. Казаков, С.С. Мокрушин, А.С. Майорова,  
О.Е. Козелков, С.Ю. Филатов

Металловедческие исследования проводились:

в **РФЯЦ-ВНИИТФ** – А.Е. Шестаковым, А.С. Седовым

в **ИФМ УрО РАН** – А.В. Добромысловым и Н.И. Талуц

Постановка задачи и полезные обсуждения – Г.И. Канель

(Заместитель директора ОИВТ РАН, ВНС ИПХФ)

Работы выполнены при поддержке ГК «РОСАТОМ» в рамках государственных контрактов

№№ Н.4х.44.90.13.1111 и Н.4х.44.9Б.16.1012

# Цирконий

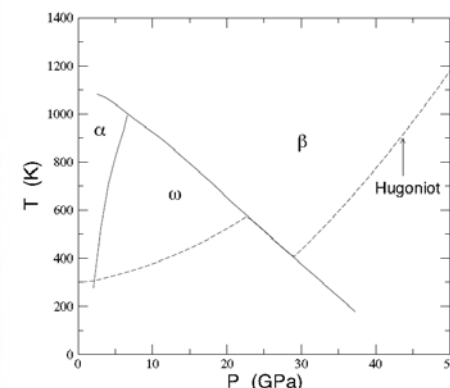
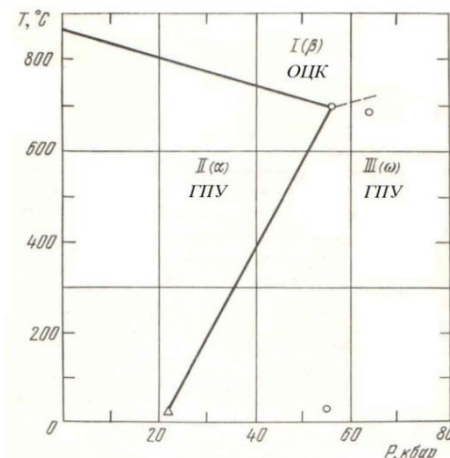
Цирконий – полиморфный металл. Его низкотемпературная модификация  $\alpha$  ( $\alpha$ -цирконий) существует при температуре до 862 °С, имеет ГПУ кристаллическую решетку ( $\alpha$ -фаза).

Высокотемпературная модификация  $\beta$  ( $\beta$ -цирконий) имеет ОЦК кристаллическую решетку. Превращение ( $\alpha \leftrightarrow \beta$ ) носит бездиффузионный мартенситный характер.



Наряду с полиморфным превращением ( $\alpha \leftrightarrow \beta$ ) при давлении более 6 ГПа возможно образование метастабильной  $\omega$ -фазы.

Фаза	Кристалл. структура	Параметры решетки, нм	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Условия существования
$\alpha$	ГПУ	$a=0,323118$ $c=0,514634$ $c/a=1,59271$	6,51 6,49	$T \leq 862 \text{ }^\circ\text{C}$
$\beta$	ОЦК	$a=0,359$	6,54 6,4	$T = 862\text{-}1855 \text{ }^\circ\text{C}$
$\omega$	ГПУ	$a=0,5036$ $c=0,3109$ $c/a=0,61736$	6,68	$P > 6 \text{ ГПа}$



Calculated zirconium Hugoniot and phase diagram.

# Исследования динамических свойств Циркония



- **G.C. Kaschner, G.T. Gray III, and S.R. Chen.**

*The Influence of Texture and Impurities On The Mechanical Behavior of Zirconium.* In Proc. Shock Compression of Condensed Matter – 1997.

- **G.T. Gray III, N.K. Bourne, M .A . Zocher, P.J. Maudlin, and J.C.F. Millett.**

*Influence of Crystallographic Anisotropy On The Hopkinson Fracture “Spallation” of Zirconium.* In Proc. Shock Compression of Condensed Matter – 1999.

- **E. Cerreta, G.T. Gray III, B.L. Henrie, D.W. Brown, R.S. Hixson and P.A. Rigg.**

*The Influence of Peak Stress on the Mechanical Behavior and the Substructural Evolution in Shockprestrained Zirconium.* In Proc. Shock Compression of Condensed Matter – 2003

- **E. Cerreta, G.T. Gray III, A.C. Lawson, C.E. Morris, R.S. Hixson, and P.A. Rigg.**

*The Influence of Interstitial Oxygen On The Alpha To Omega Phase Transition In Titanium And Zirconium.* In Proc. Shock Compression of Condensed Matter – 2005.

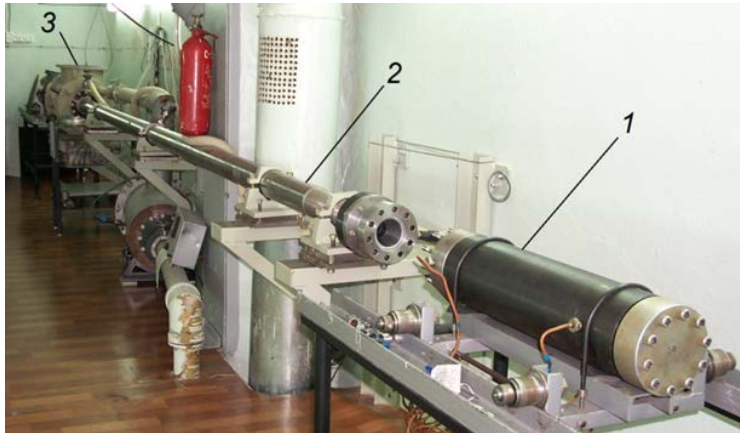
- **P.A. Rigg, C.W. Greeff, M.D. Knudson and G.T. Gray, III.**

*Influence of Impurities On The Solid-Solid Phase Transitions In Zirconium.* In Proc. Shock Compression of Condensed Matter – 2009.

# Экспериментальная аппаратура, схема эксперимента

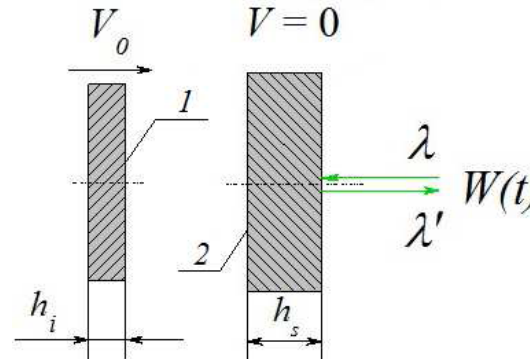


Одноступенчатые пушки калибра 44 мм



0,05...1 км/с и 0,5...2,5 км/с

Схема эксперимента

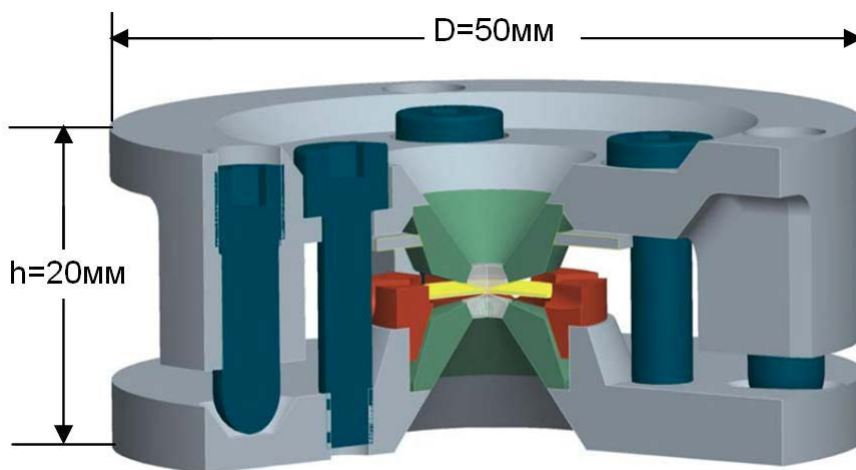


Регистрация

$W(t)$  - 1,4.. 0,5 % (1,4.. 2,2 нс) // VISAR

$W(t)$  - 1,2.. 0,7 % (2..4 нс) // PDV

Скорость ударника  $V_0$  - 0,2 % //ЭЖД



Структура - световой микроскоп Neophot-21,  
Микроструктура, фазовый и элементный составы в сканирующем электронном микроскопе Quanta-200;  
просвечивающий, трансмиссионном электронном микроскопе JEM-200CX;  
Рентгеновский структурный анализ ДРОНЗ ( $\text{CuK}\alpha$ );  
Микротвердость - ПМТ-3 при нагрузке 50 г;

Алмазные наковальни- ячейка типа Voehler-Almax.

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

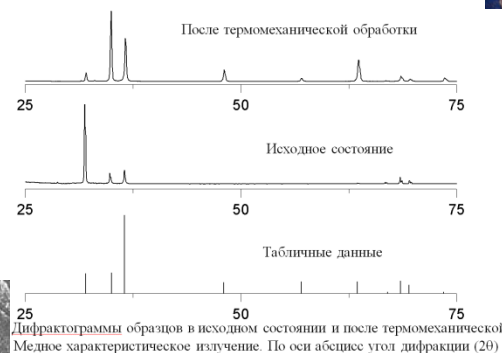
# Исходная структура образцов чистого циркония

Примеси – O, Fe ~ 470 ppm

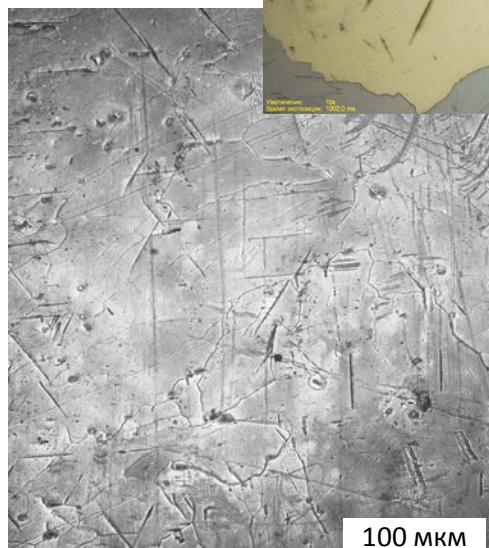
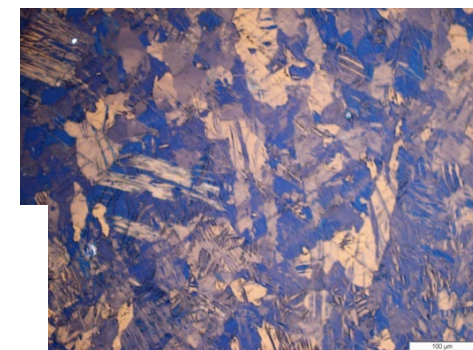
На дифрактограммах присутствуют только пики гексагональной плотноупакованной  $\alpha$ -фазы

ТМО

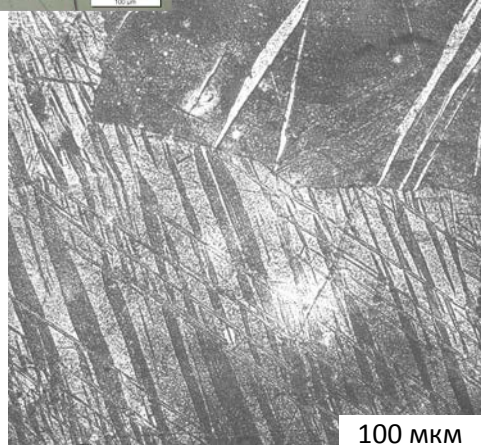
## Крупнокристаллический



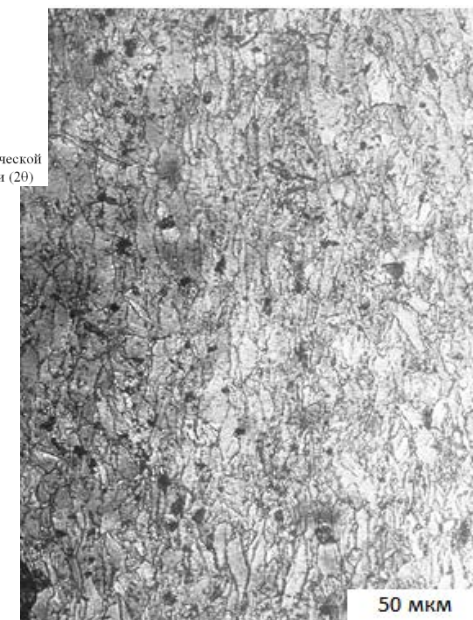
Дифрактограммы образцов в исходном состоянии и после термомеханической обработки. Медное характеристическое излучение. По оси абсцисс угол дифракции ( $2\theta$ )



Размер зерна – 3...7 мкм



Присутствие макровдвойников

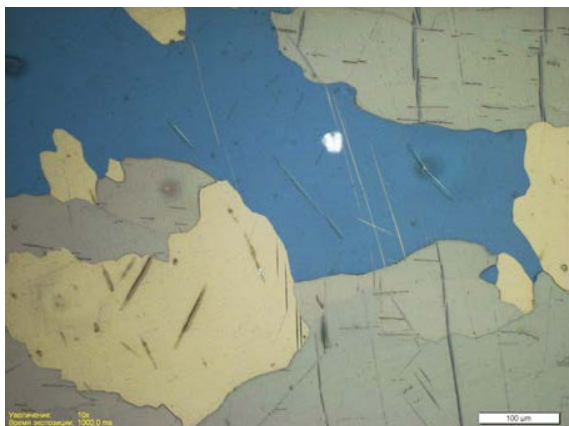


Размер зерна – 12..25 мкм

$H_{\mu} = 1049 \pm 40$  МПа

# Исходная структура образцов чистого циркония

Примеси – O, Fe ~ 470 ppm  
Крупнокристаллический 3..7 мм

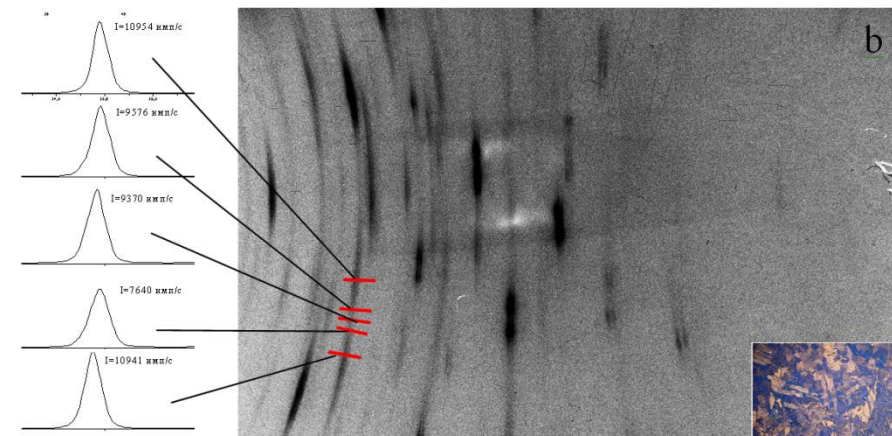
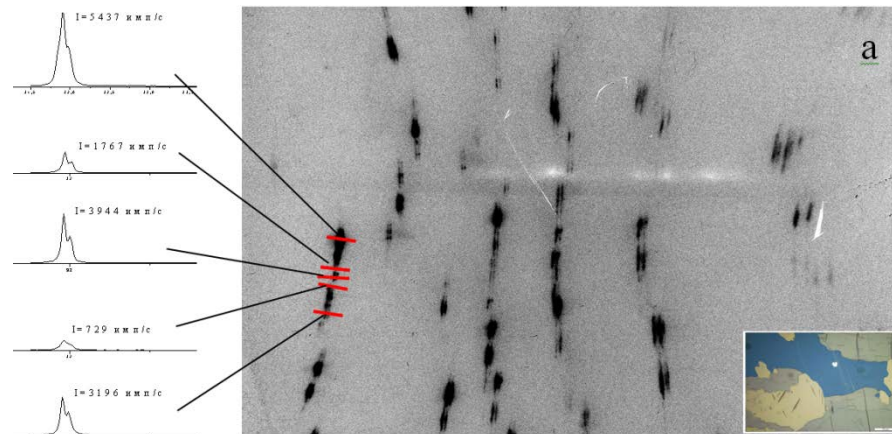


TMO



Размер зерна – 12..25 мкм

На дифрактограммах присутствуют только пики гексагональной плотноупакованной  $\alpha$ -фазы



# Цирконий марки Э100



## Состав:

- Основа – Zirconium ( ${}_{40}\text{Zr}$ )
- Примеси (O ~ 400 ppm, Fe, Hf, Si, Ca, Cr и т.д.) содержание не более 0.25%

## Свойства:

- Плотность –  $6.48 \text{ г/см}^3$
- $H_{\mu} = 1097 \pm 40 \text{ МПа}$
- Продольная скорость звука\* -  $c_l = 4684 \pm 6 \text{ м/с}$
- Поперечная скорость звука \* -  $c_s = 2331 \pm 3 \text{ м/с}$
- Объемная скорость звука -  $c_0 = 3.83 \text{ км/с}$

\*скорости звука по данным ультразвукового метода

Структура Э100 ( $\alpha\text{-Zr}$  – матрица (ГПУ решетка; размер зерен 3 мкм;  
Периоды решетки  $\alpha$ -фазы:  $a = (0,3231 \pm 0,0001) \text{ нм}$ ,  $c = (0,5147 \pm 0,0003) \text{ нм}$ ,  
 $c/a = 1,593$ ; расщепление  $K_{\alpha}$  на  $K_{\alpha 1}$  и  $K_{\alpha 2} \Rightarrow$  высокое совершенство структуры;  
выше  $610 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\alpha \rightarrow \alpha + \beta$ ), выше  $890 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\alpha + \beta \rightarrow \beta$ ).





# Циркониевый сплав Э110



## Состав:

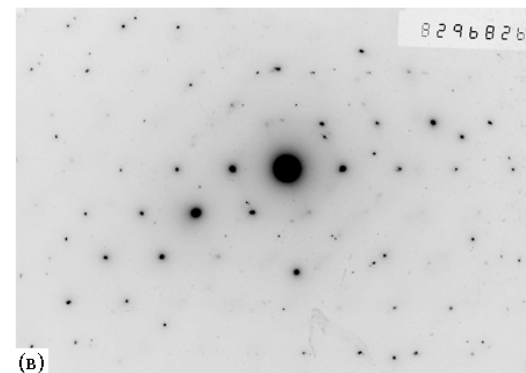
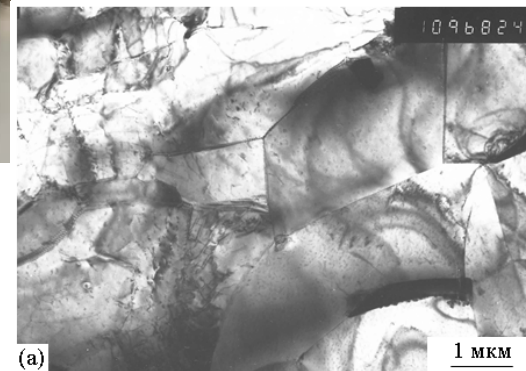
- Основа – Zirconium ( $_{40}\text{Zr}$ )
- Легирующая добавка – Niobium ( $_{41}\text{Nb}$ ) - 1%
- Примеси (O - 1300 ppm, Fe - 2400 ppm, Hf, Si, Ca, Cr и т.д.) содержание не более 0.25%

## Свойства:

- Плотность –  $6.5 \text{ г/см}^3$
- $H_{\mu} = 1649 \pm 55 \text{ МПа}$  ( $Zr - H_{\mu} = 1097 \pm 40 \text{ МПа}$ )
- Продольная скорость звука\* -  $c_l = 4703 \pm 15 \text{ м/с}$
- Поперечная скорость звука \* -  $c_s = 2262 \pm 5 \text{ м/с}$
- Объемная скорость звука -  $c_0 = 3.91 \text{ км/с}$

\*скорости звука по данным ультразвукового метода

Структура Э110 ( $\alpha\text{-Zr}$  – пики  $\alpha$ -фазы, слабые пики  $\beta$ -фазы цирконий+ниобий  $\Rightarrow$  матрица ГПУ решетка; обогащение ниобием:  $\alpha$  – фаза  $\sim 0,5 \%$ ;  $\beta$  – фаза - 17-18%; размер зерна  $\sim 2 \text{ мкм}$ ; дислокации практически отсутствуют) выше  $610 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\alpha \rightarrow \alpha+\beta$ ), выше  $890 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\alpha+\beta \rightarrow \beta$ ).



# Циркониевый сплав Э635



## Состав:

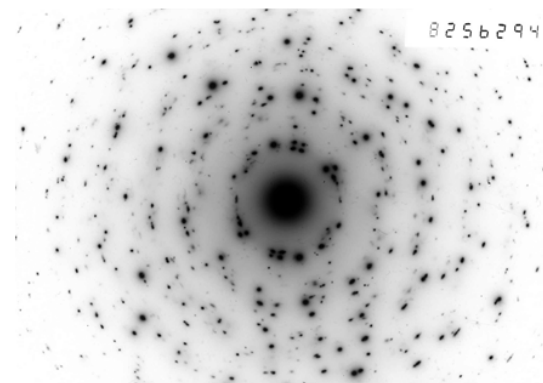
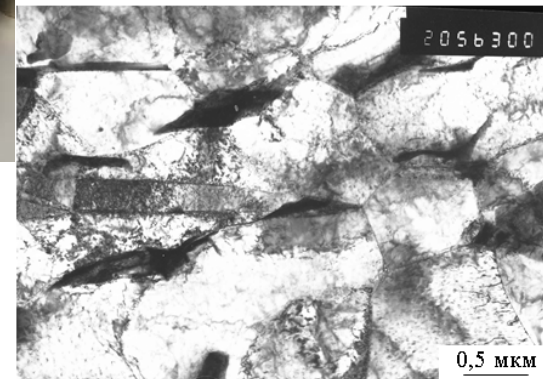
- Основа – Zirconium ( $_{40}\text{Zr}$ )
- Легирование – Nb - 1%, Sn – (1,1-1,42) %, Fe – (0,3-0,47) %, O – (0,05-0,12) %
- Примеси – содержание не более 0.25%



## Свойства:

- Плотность –  $6.5 \text{ г/см}^3$
- $H_{\mu} = 1755 \pm 49 \text{ МПа}$
- Продольная скорость звука\* -  $c_l = 4711 \pm 12 \text{ м/с}$
- Поперечная скорость звука \* -  $c_s = 2274 \pm 2 \text{ м/с}$
- Объемная скорость звука -  $c_0 = 3.91 \text{ км/с}$

\*скорости звука по данным ультразвукового метода



Измерение методом рентгеновской дифракции показало, что исследуемый материал гетерофазный. Структура:  $\alpha$ -Zr – матрица (ГПУ решетка), незначительное присутствие  $\beta$  – фазы (ОЦК решетка) слоями по границам  $\alpha$  – фазы; небольшое количество микродвойников и отдельных дислокаций;

+ <sup>[1]</sup>интерметаллиды Zr (Nb,Fe)<sub>2</sub> (ГПУ) и (Zr,Nb)<sub>2</sub>Fe (ГЦК)

1. Nikulina A.V., Markelov V.A., Peregud M.M. et al. 11<sup>th</sup> International Symposium. ASTM STP 1295. 1996. P. 785-804.

# Циркониевый сплав Э125



## Состав:

- Основа – Zirconium ( ${}_{40}\text{Zr}$ )
- Легирующая добавка – Niobium ( ${}_{41}\text{Nb}$ ) – 2,5 %
- Примеси (O - 2400 ppm, Fe, Hf, Si, Ca, Cr и т.д.) содержание не более 0,27%

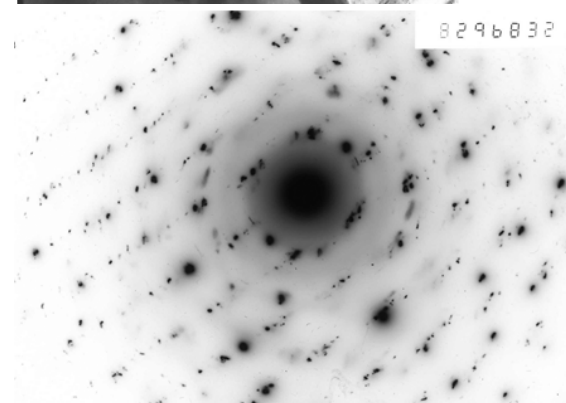


## Свойства:

- Плотность – 6.54 г/см<sup>3</sup>
- $H_{\mu} = 1649 \pm 55$  МПа ( $Zr - H_{\mu} = 1097 \pm 40$  МПа)
- Продольная скорость звука\* -  $c_l = 4636 \pm 3$  м/с
- Поперечная скорость звука \* -  $c_s = 2221 \pm 1$  м/с
- Объемная скорость звука -  $c_0 = 3.86$  км/с

\*скорости звука по данным ультразвукового метода

Структура Э125 ( $\alpha$ -Zr – матрица ГПУ решетка; размер зерен составляет 1 мкм; малые количества  $\beta$  – фазы, обогащенной до 18 ат.% ниобия: дифракционные пики  $\alpha$ -фазы, слабые пики  $\beta$ -фазы цирконий+ ниобий выше 610 °C ( $\alpha \rightarrow \alpha + \beta$ ), выше 890 °C ( $\alpha + \beta \rightarrow \beta$ ).

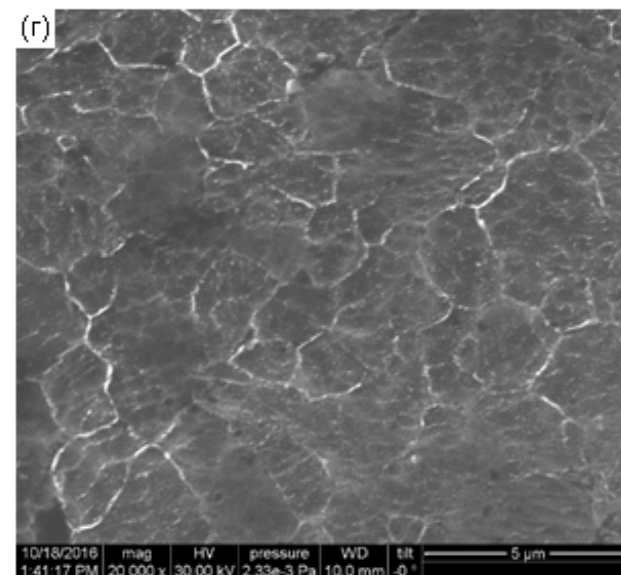
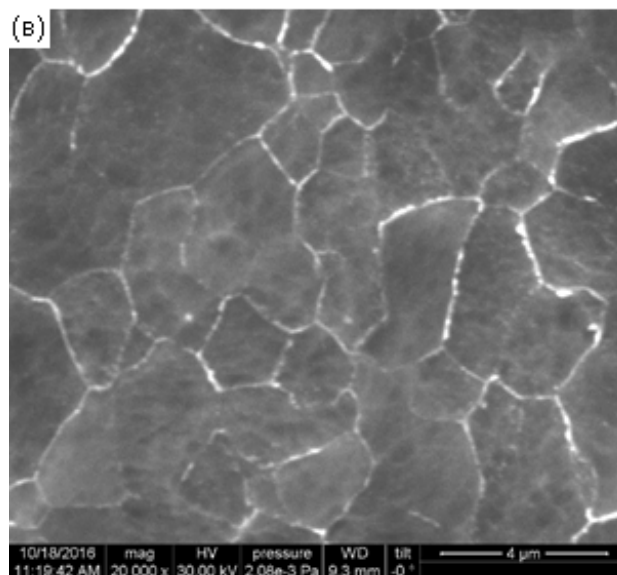
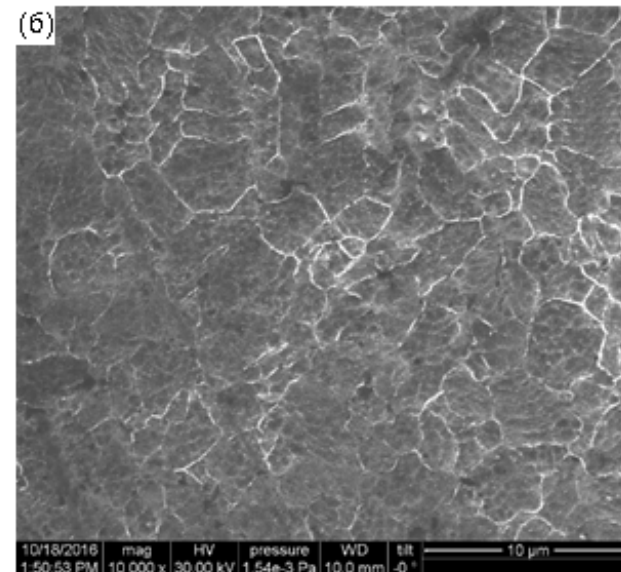
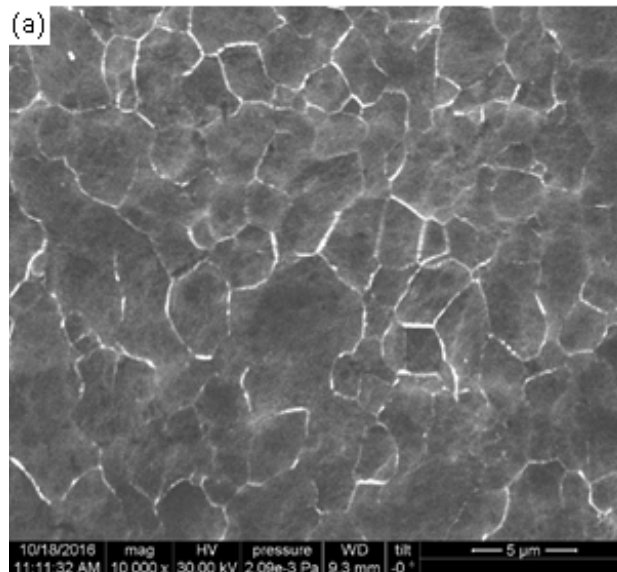


# Исходная структура Э100 (пруток Ø40)



(а), (в) – продольное сечение;

(б), (г) – поперечное сечение



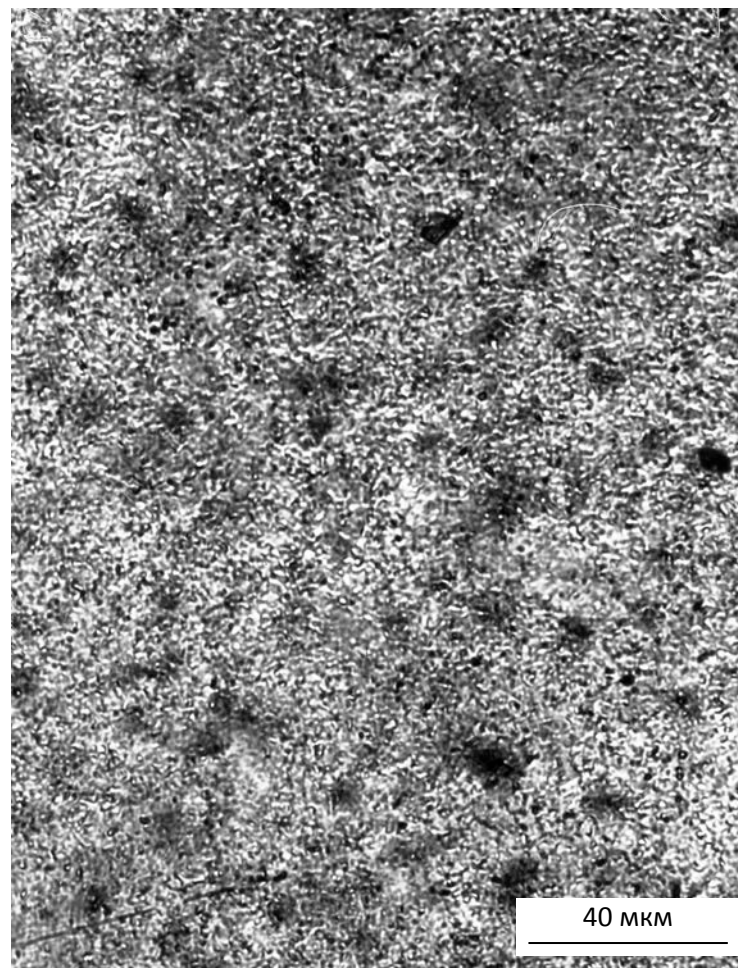
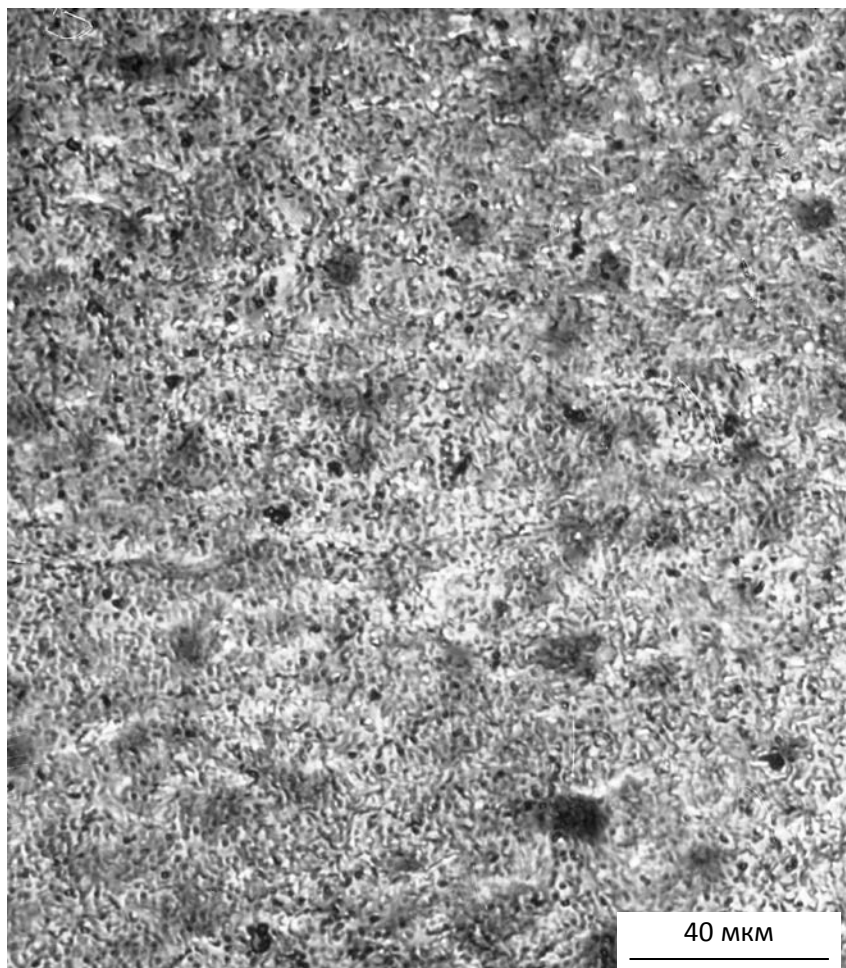
# Исходная структура сплавов Zr-1%Nb



Э110

поперечные сечения

Э635



$H_{\mu} = 1649 \pm 55$  МПа

Пруток  $\varnothing 35$

$H_{\mu} = 1755 \pm 49$  МПа

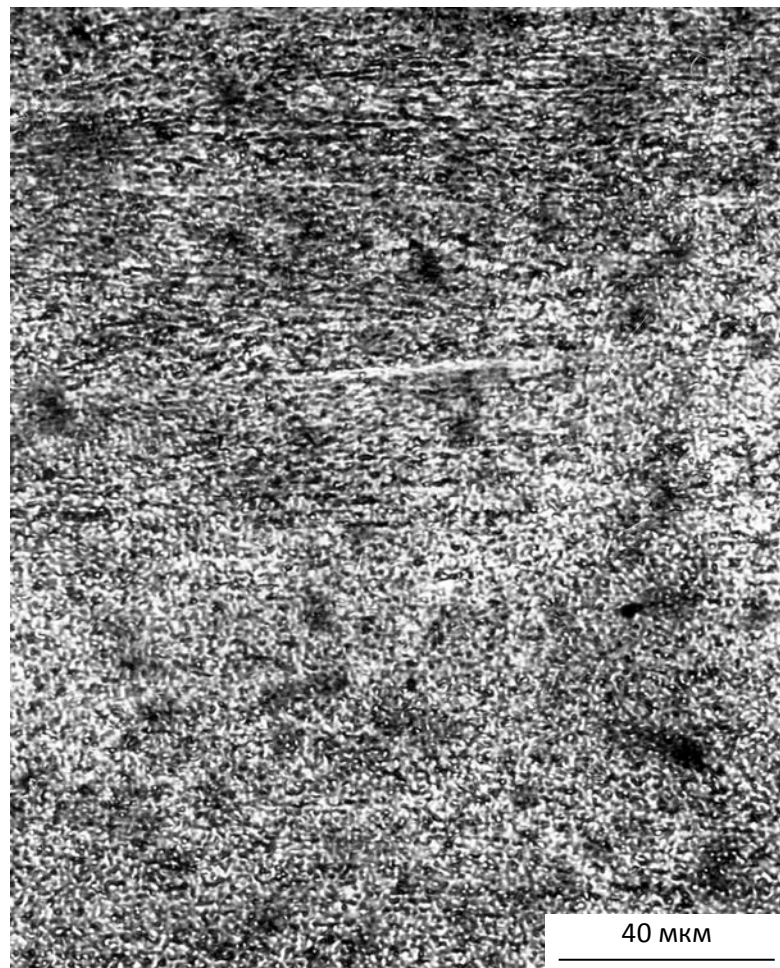
# Исходная структура сплавов Zr-1%Nb



Э110

продольные сечения

Э635



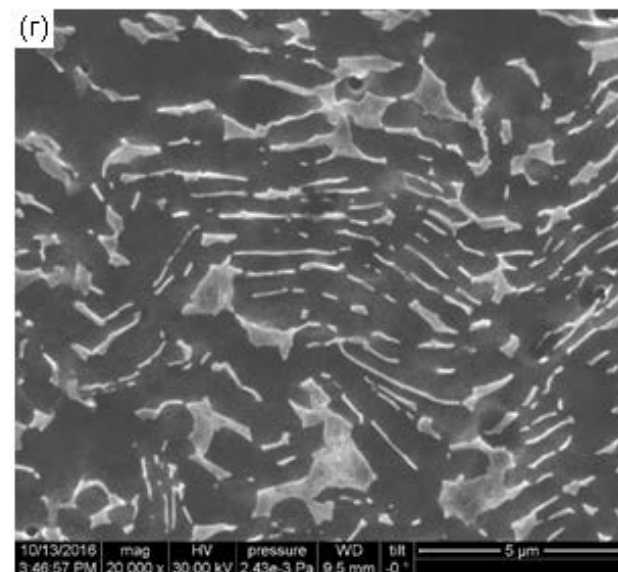
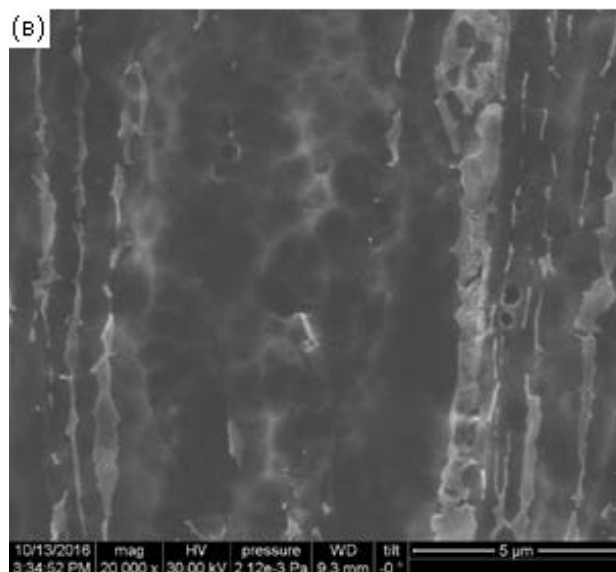
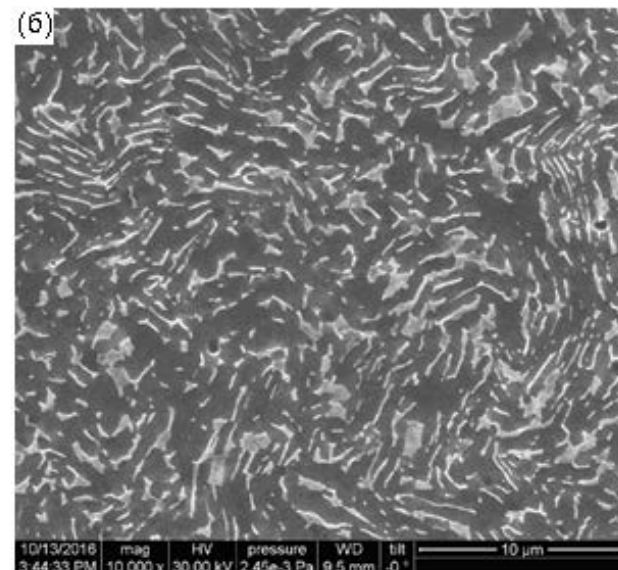
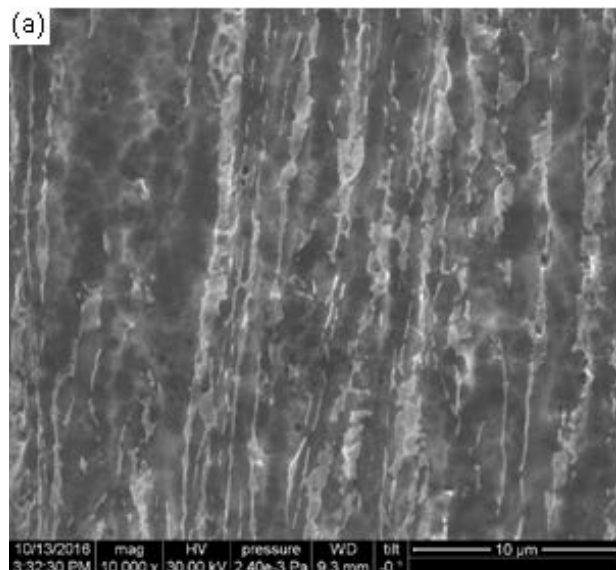
На дифрактограммах наряду с дифракционными пиками от  $\alpha$ -фазы присутствуют слабые пики от  $\beta$ -фазы циркония, обогащенной ниобием

# Исходная структура сплава Э125 (пруток Ø34)



(а), (в) – продольное сечение;

(б), (г) – поперечное сечение

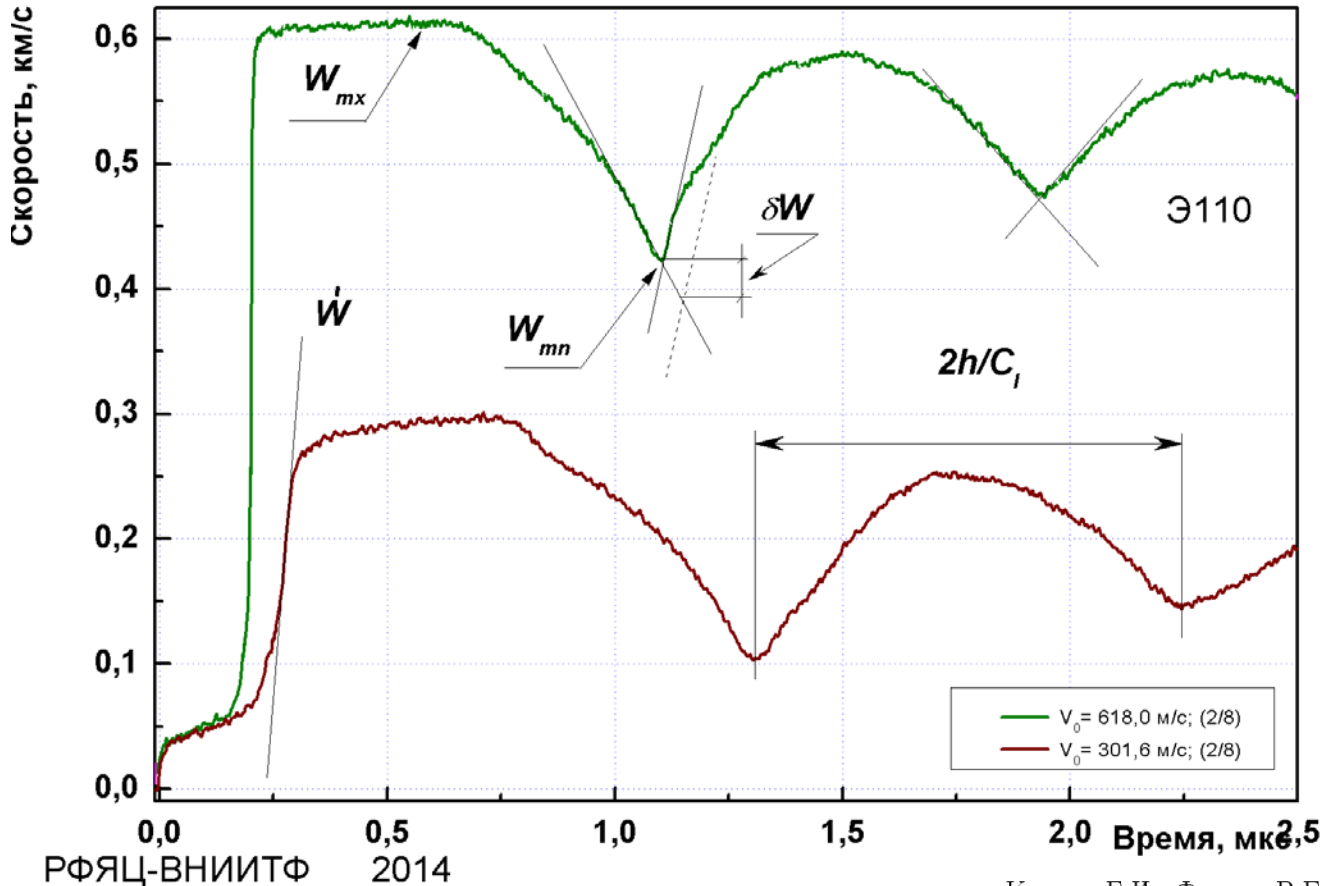


На дифрактограммах наряду с дифракционными пиками от  $\alpha$ -фазы присутствуют слабые пики от  $\beta$ -фазы циркония до 18 % ниобия;  $\beta$ -фаза располагается по границам зерен  $\alpha$ -фазы и в тройных стыках

# Профили ударных волн

Канель Г.И.

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



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

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

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

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

РФЯЦ-ВНИИТФ 2014

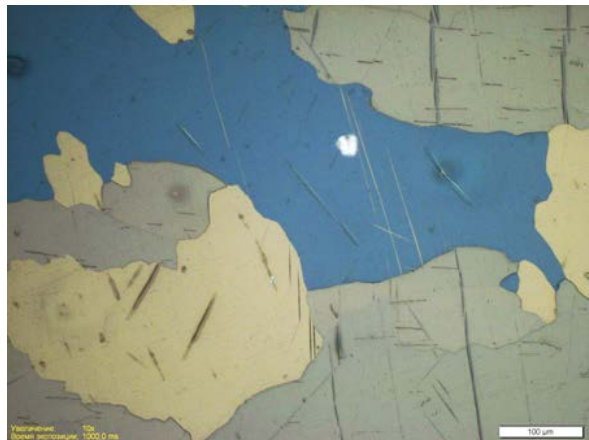
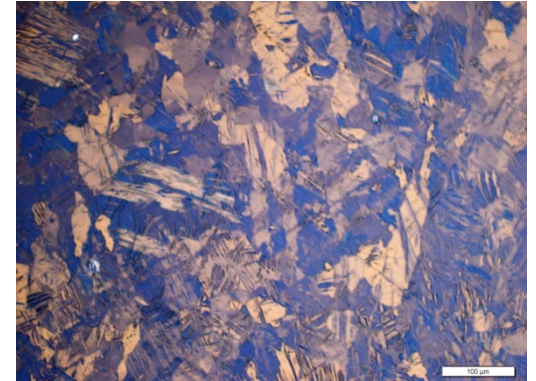
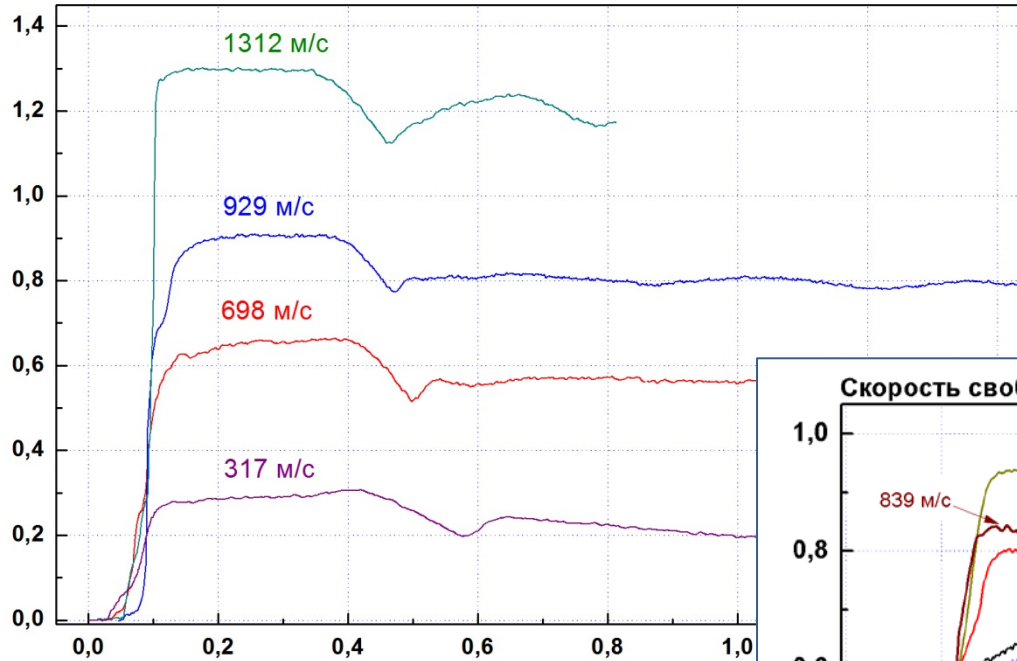
Забабихин Е.И.  
*Некоторые вопросы газодинамики взрыва.* Снежинск, 1997.

Канель Г.И., Фортов В.Е., Разоренов С.В., Уткин А.В.  
*Ударно-волновые явления в конденсированных средах.* Москва, М: Янус-К, 1996.

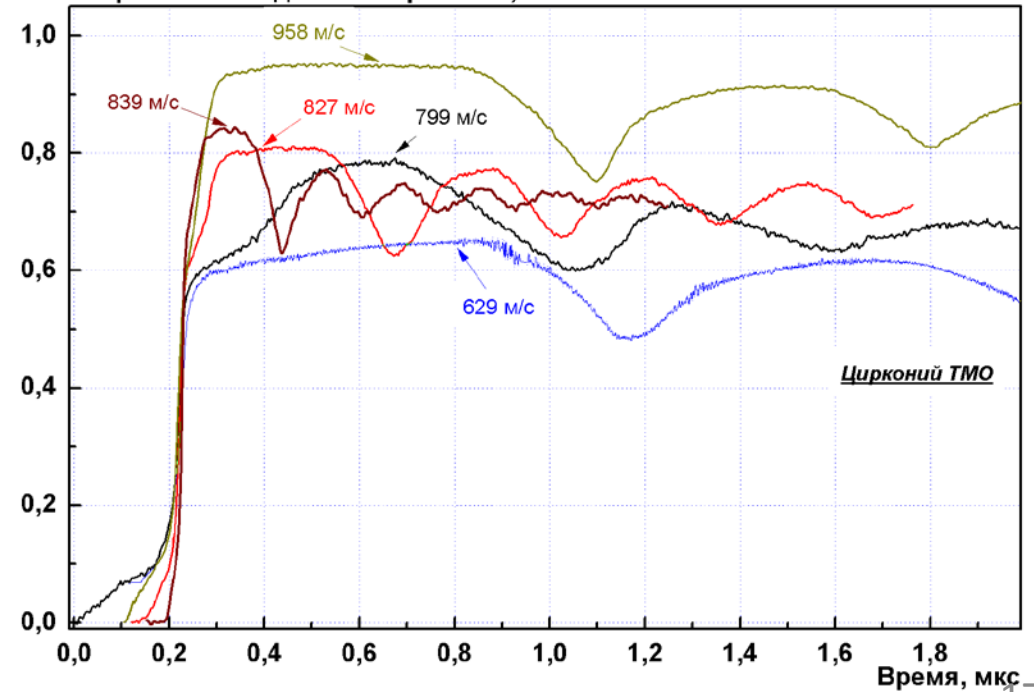


# Результаты эксперимента Цирконий (йодидный)

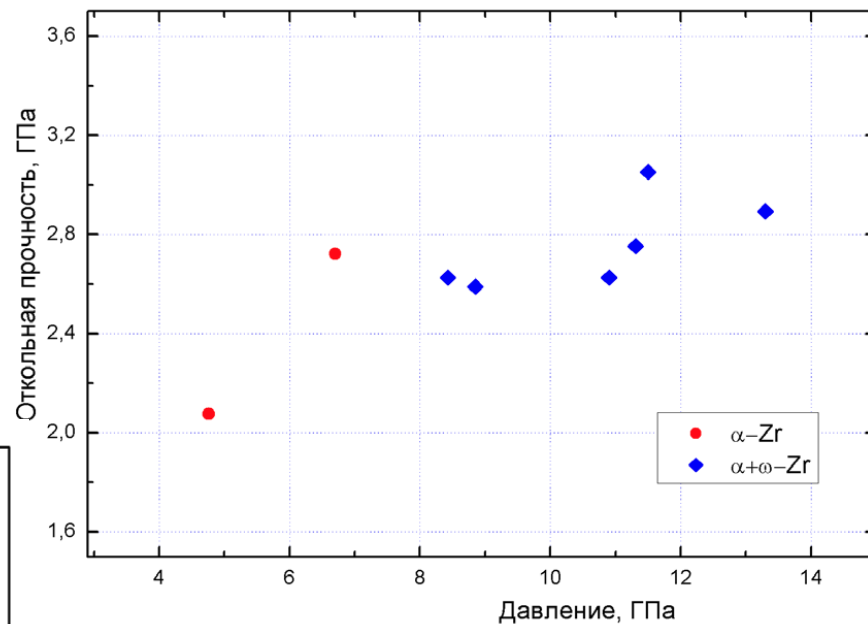
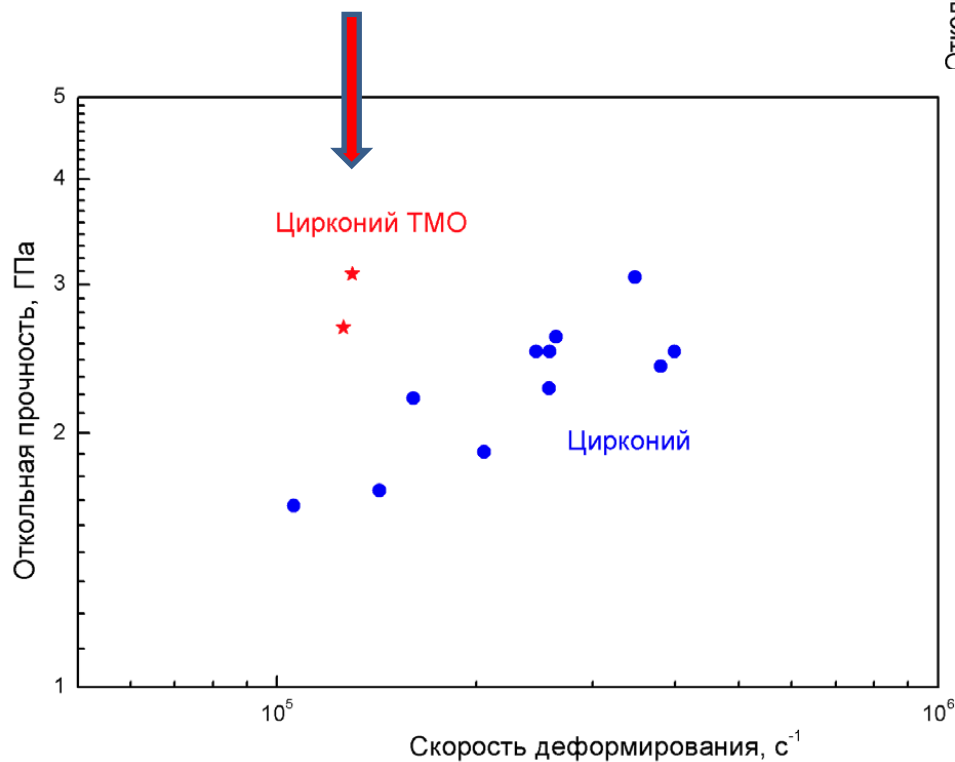
Скорость свободной поверхности, км/с



Скорость свободной поверхности, км/с



# Результаты эксперимента Цирконий (йодидный)

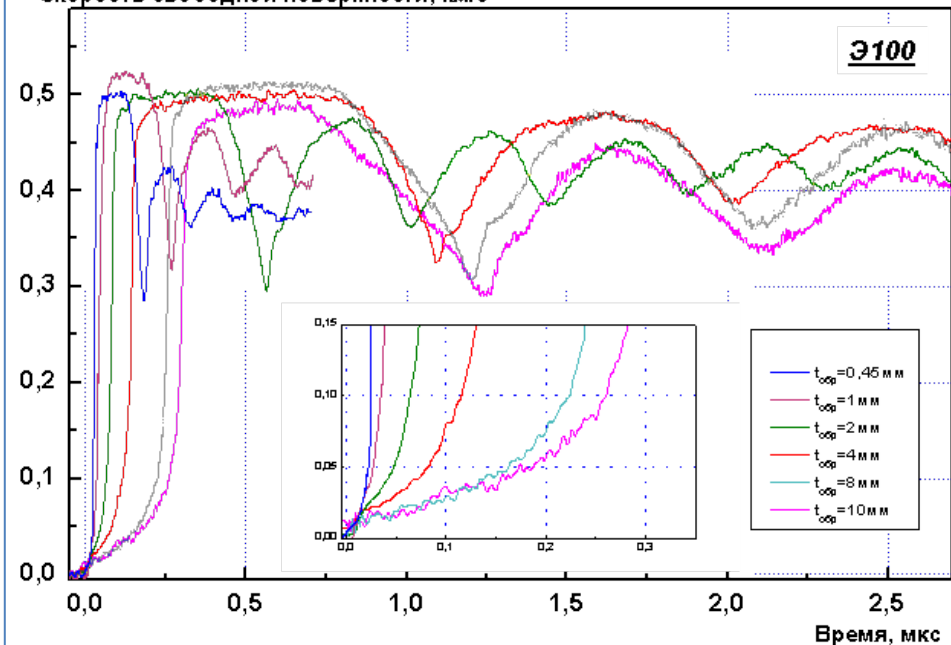


Длительность УВ:  
от ~0,05 до 1 мкс

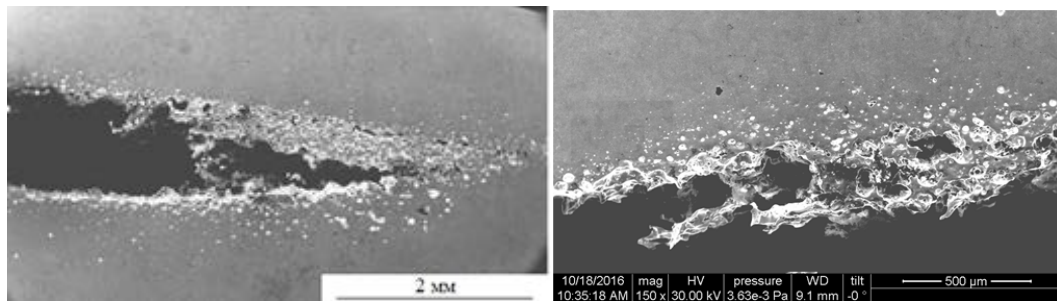
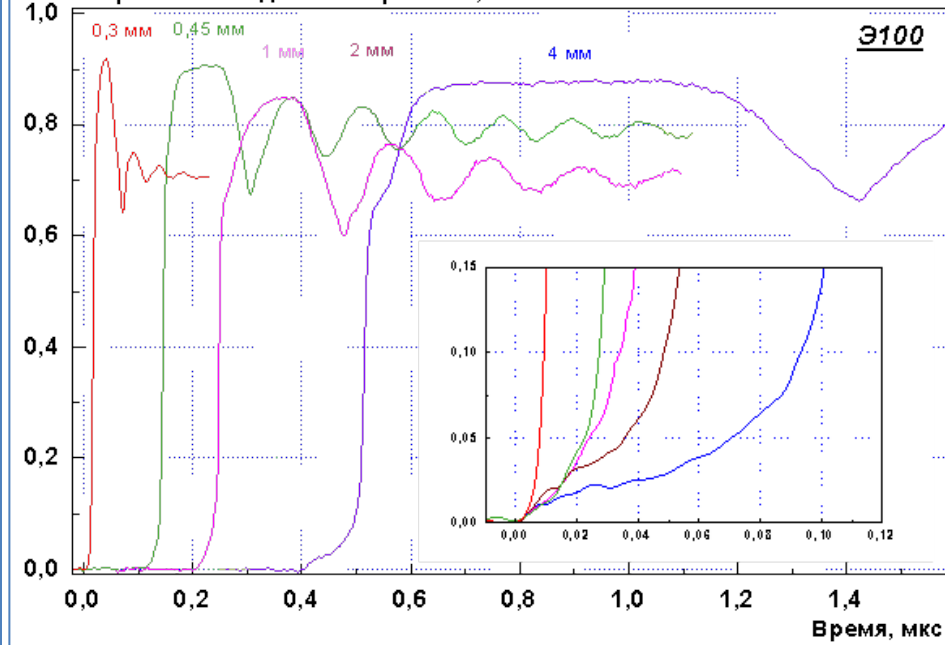
# Результаты измерений Цирконий марки Э100



Скорость свободной поверхности, км/с

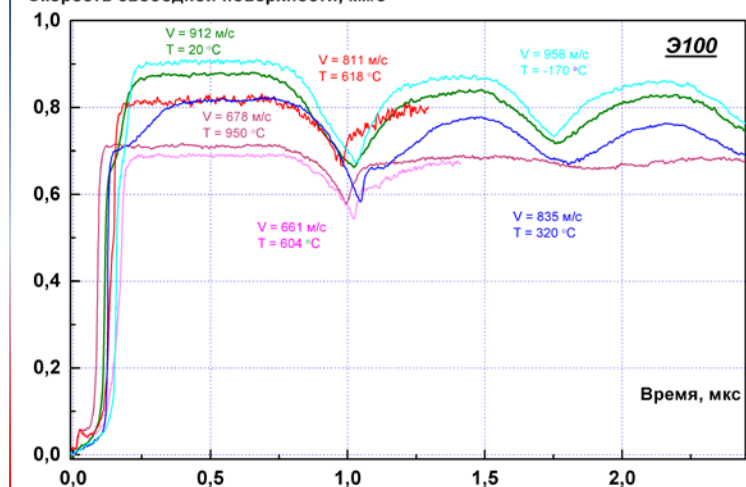


Скорость свободной поверхности, км/с



$$D = 3.83 + 0.91u$$

Скорость свободной поверхности, км/с

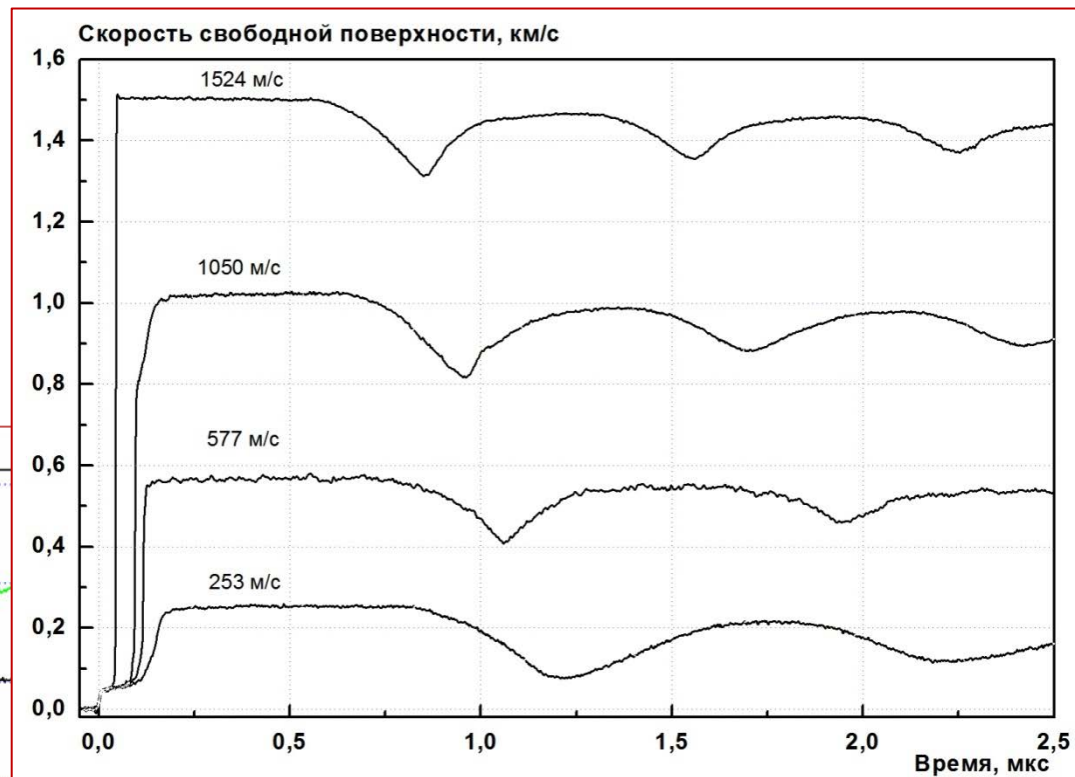
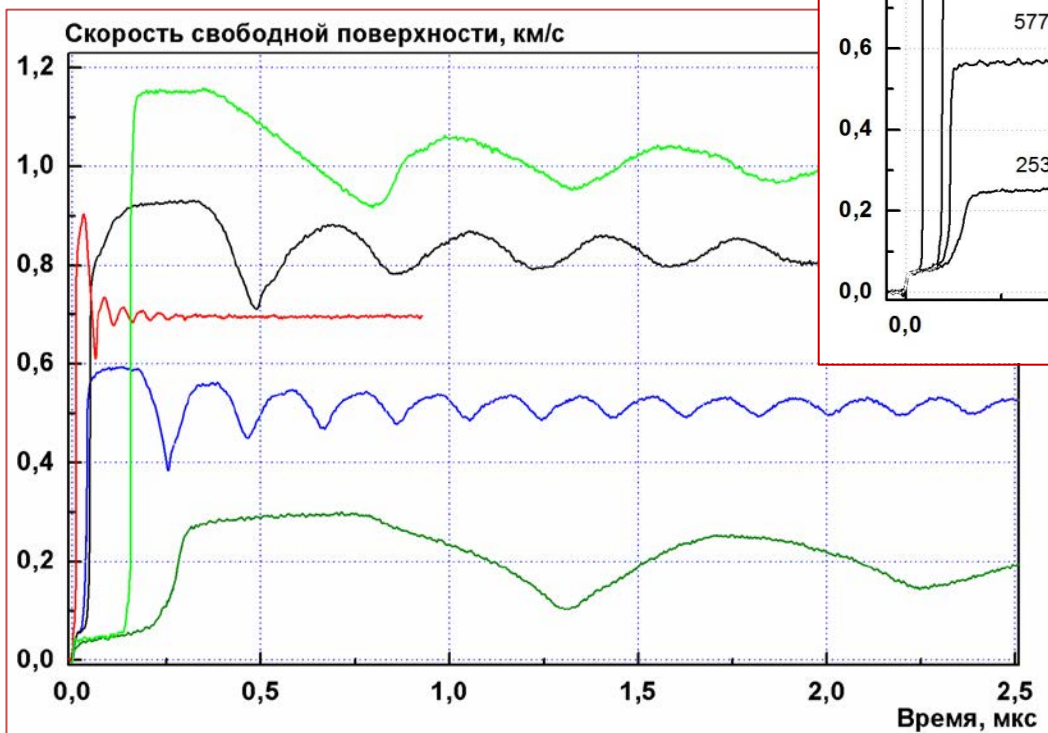


# Результаты измерений Zr-1%Nb Циркониевый сплав Э110



$$D = 3.91 + 0.91u$$

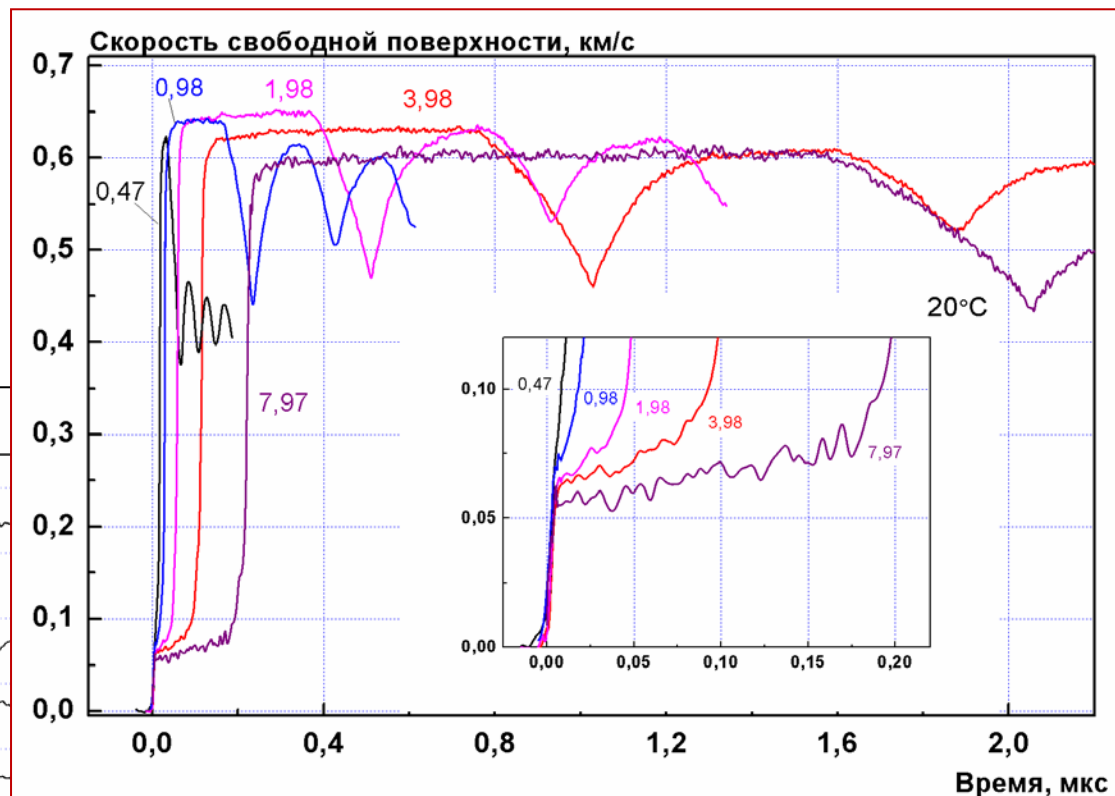
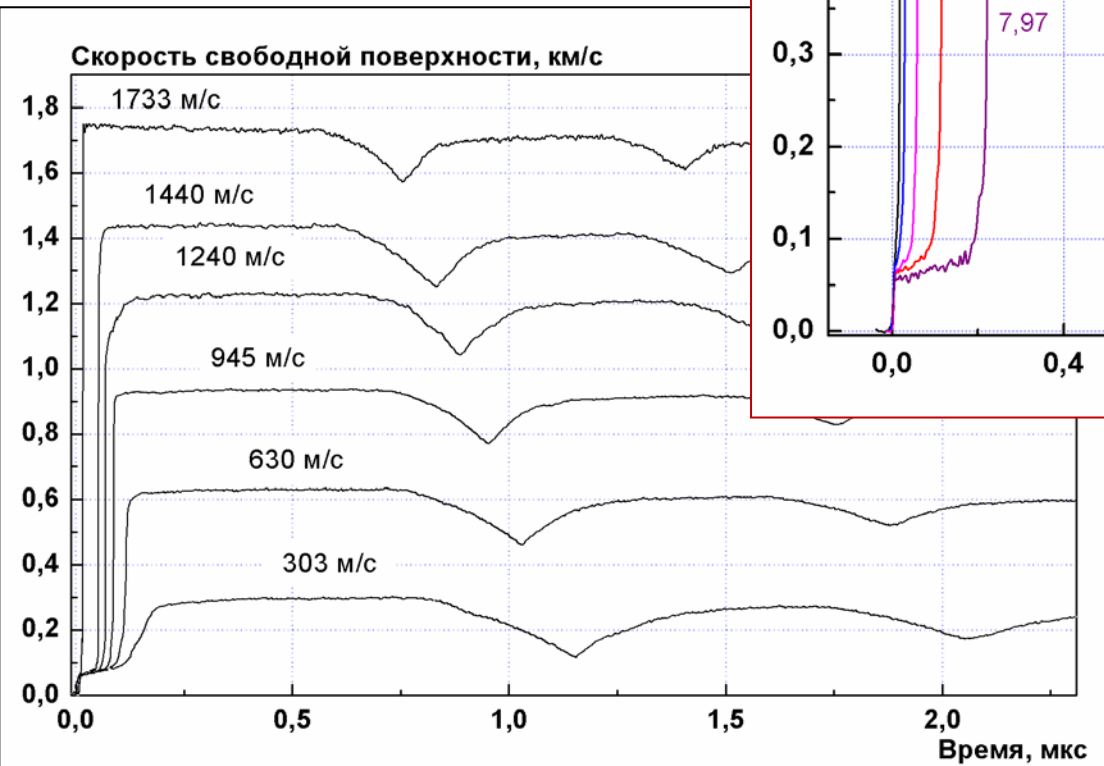
Амплитуда нагружения:  
от 3,4 до 23 ГПа



Длительность ударной нагрузки:  
от ~0,05 до 1 мкс

# Результаты измерений Zr-1%Nb Циркониевый сплав Э635

Длительность ударной нагрузки:  
от ~0,05 до ~2 мкс



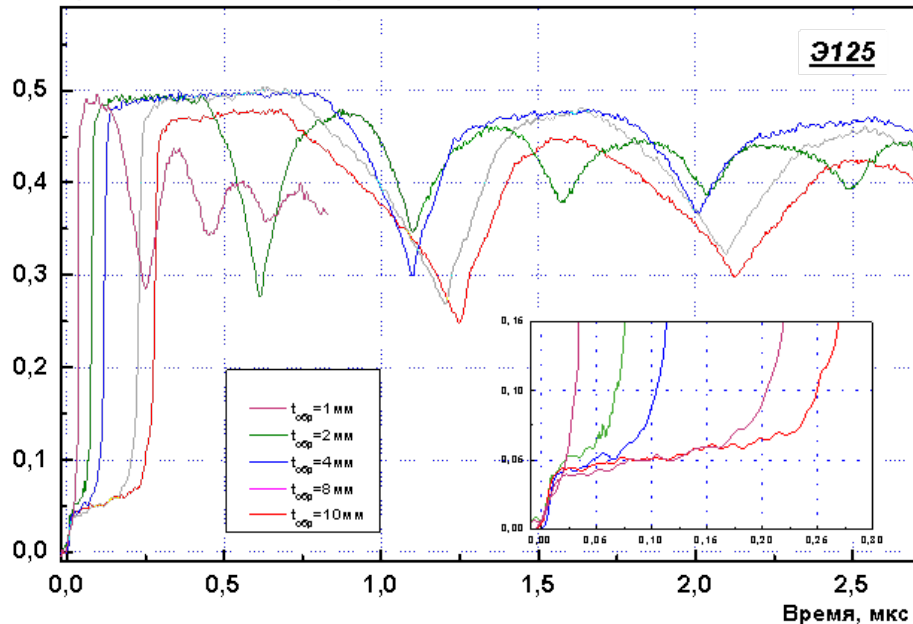
$$D = 3.91 + 0.91u$$

Амплитуда нагружения:  
от 4 до 26 ГПа

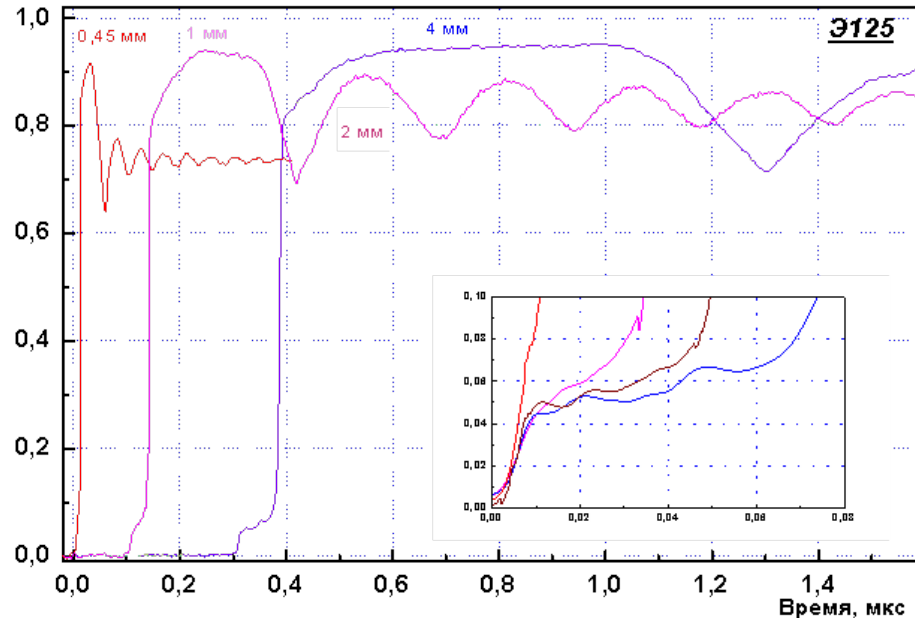
# Результаты измерений Zr-2,5%Nb Циркониевый сплав Э125



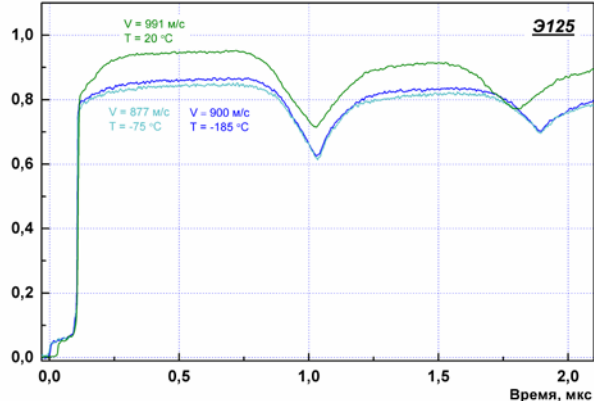
Скорость свободной поверхности, км/с



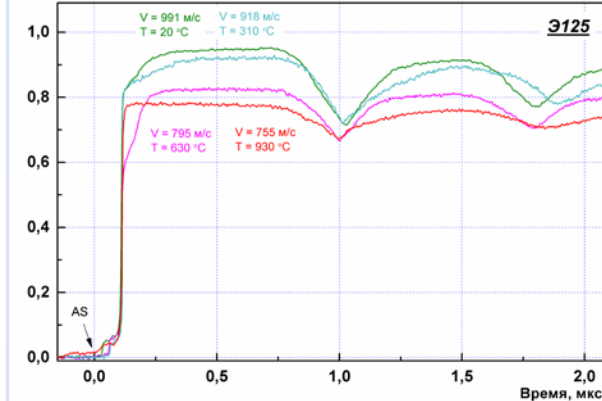
Скорость свободной поверхности, км/с



Скорость свободной поверхности, км/с



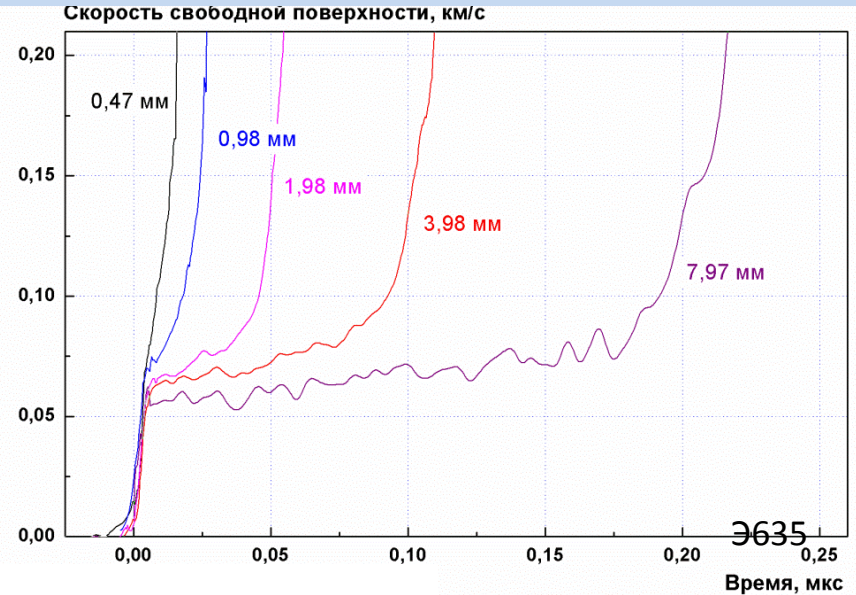
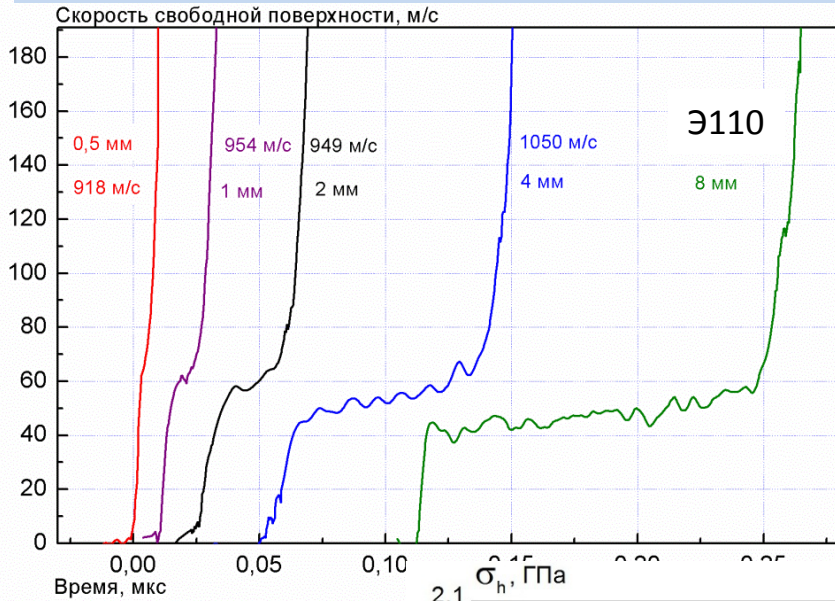
Скорость свободной поверхности, км/с



$$D = 3.86 + 0.91u$$

Длительность УВ:  
от ~0,05 до 1 мкс

# Релаксация упругого предвестника

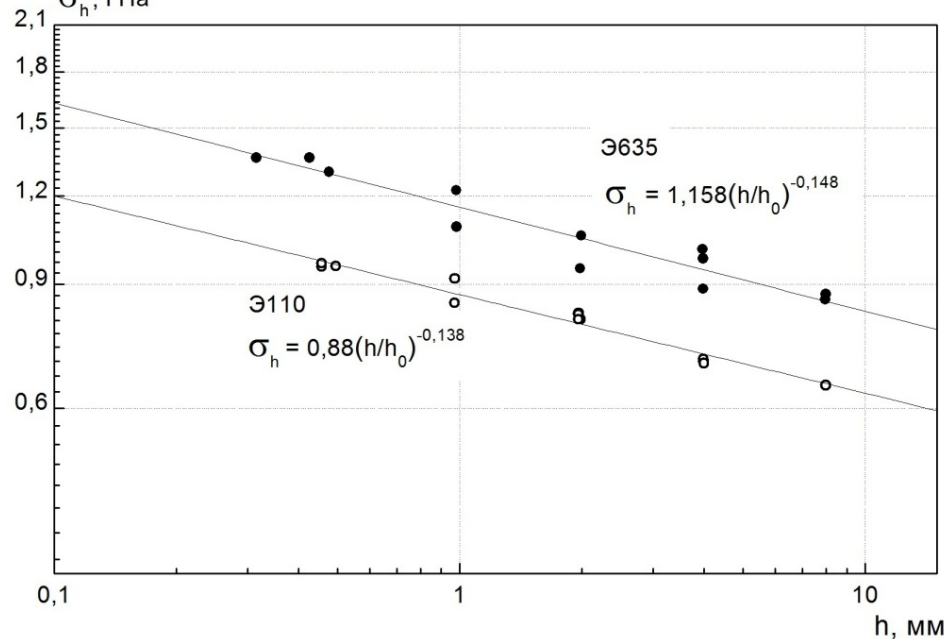


$$\sigma_h = \rho_0 c_l W_h / 2$$

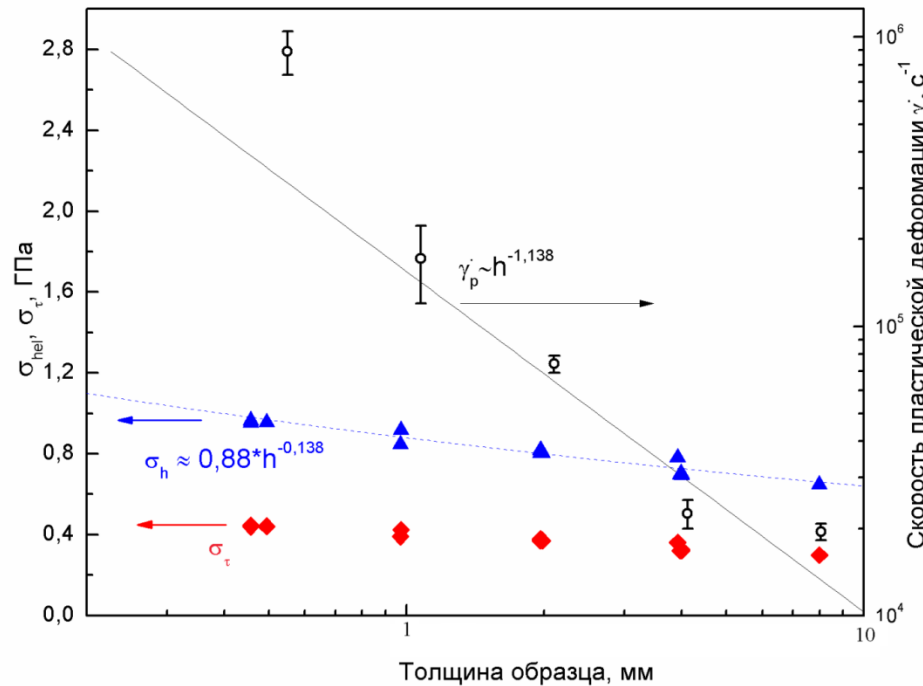
$$\sigma_h = S(h/h_0)^{-\alpha}$$

$$h_0 = 1 \text{ мм}$$

	Э635	Э110
$S$	1.158	0.88
$\alpha$	0.148	0.138



# Релаксация упругих предвестников и скорость пластической деформации (Э110)



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

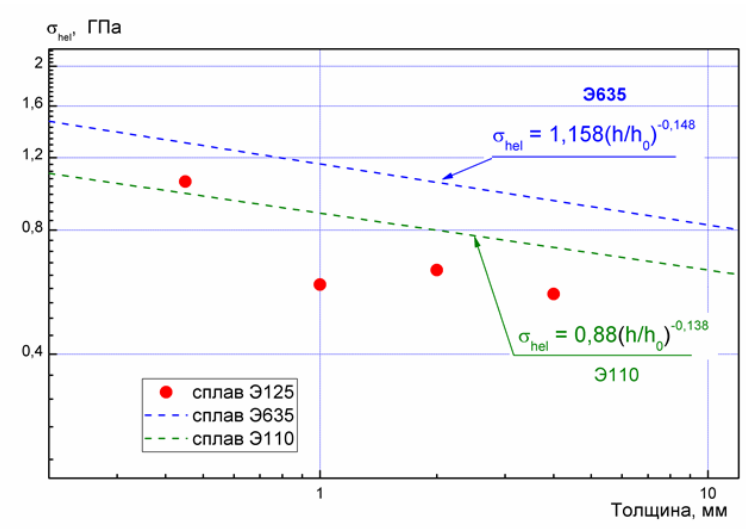
$$\dot{\gamma}_p = \frac{3}{4} \frac{S\alpha c_l (h/h_0)^{-(\alpha+1)}}{h_0 G}$$

$$\left. \frac{d\sigma_x}{dh} \right|_{\text{HEL}} = -\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{c_l} \frac{\partial \sigma_x}{\partial t}$$

$$\left. \frac{du}{dt} \right|_{\text{HEL}} = \rho_0 \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{c_l} \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$\left. \frac{d\sigma_x}{dh} \right|_{\text{HEL}} = -\frac{4 G \dot{\gamma}_p}{3 c_l}$$

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



- G.E. Duvall. In: Stress Waves in Inelastic Solids, edited by H. Kolsky and W. Prager, 1964
- J. R. Asay, G. R. Fowles, and Y. Gupta, J. Appl. Phys. 43, 744 (1972).
- Ahrens T.J. and Duvall G.E. J. Geophys. Res., 71(18), 4349-4360 (1966).
- Г.В. Гаркушин, Г.И. Канель, С.В. Разоренов. ФТТ, 2012. Т. 54, №5.

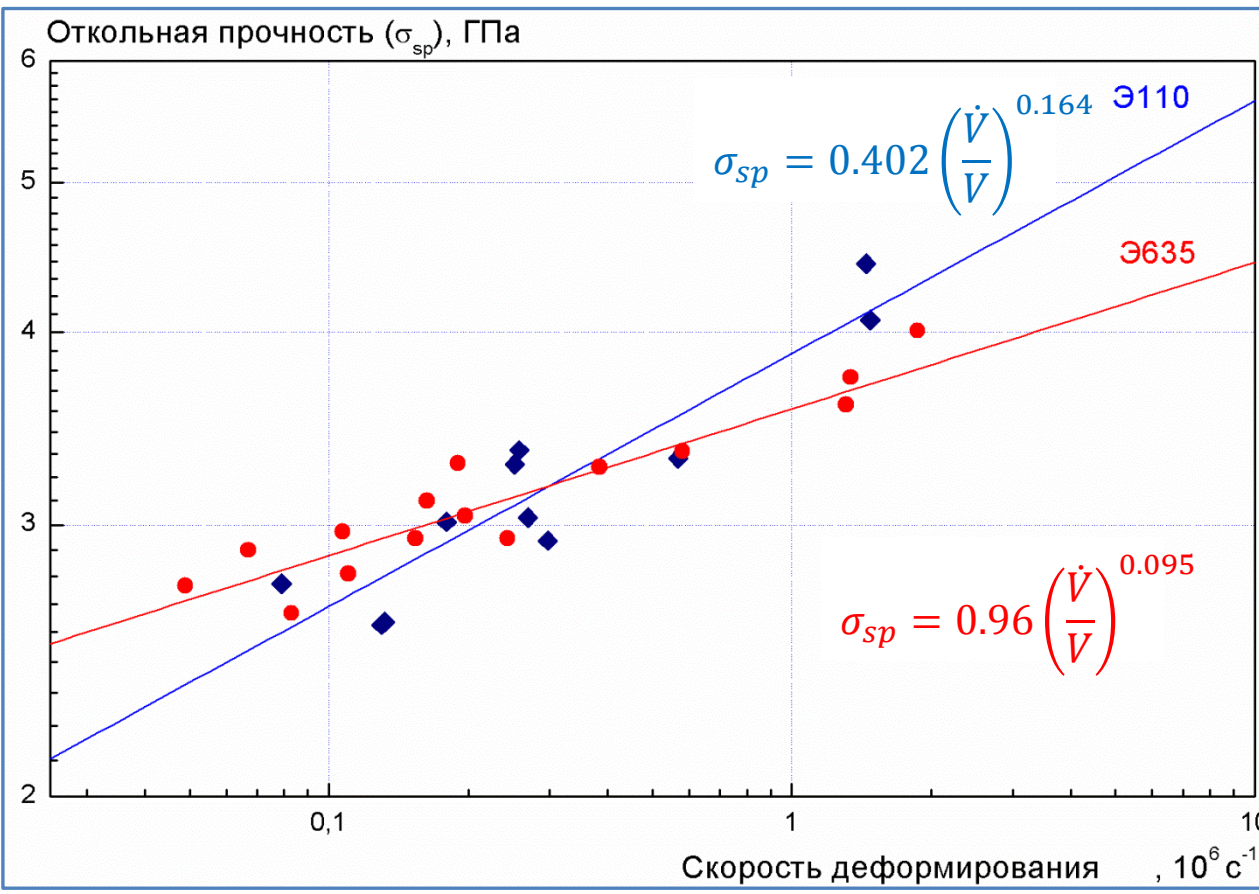


# Откольная прочность



## Сплавы Zr – 1% Nb

## Цирконий (Э100)



## Сплав Zr – 2,5 % Nb

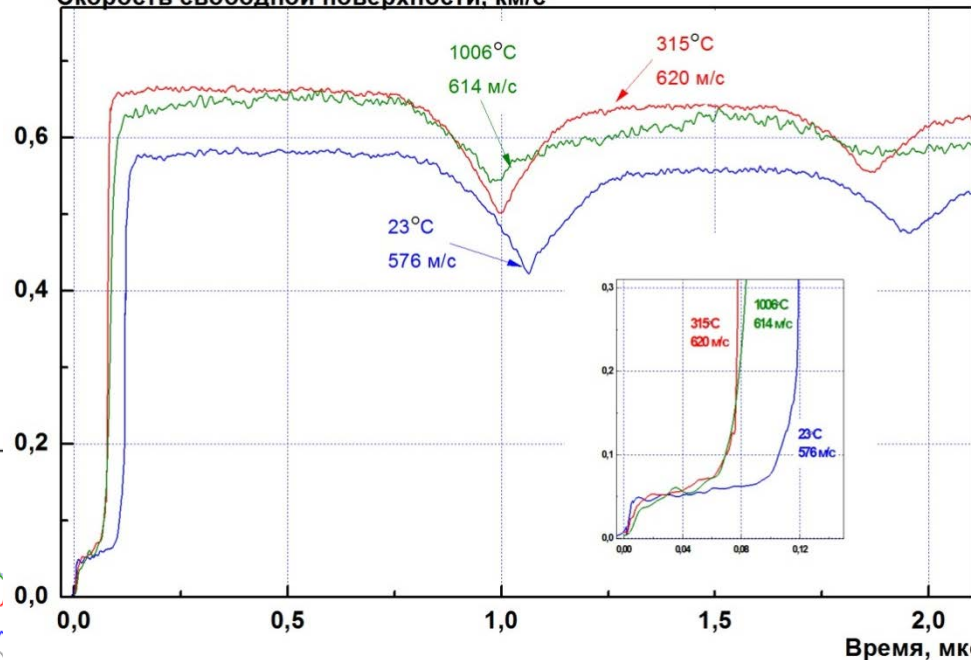


# Повышенные температуры. Сплавы Э635 и Э110

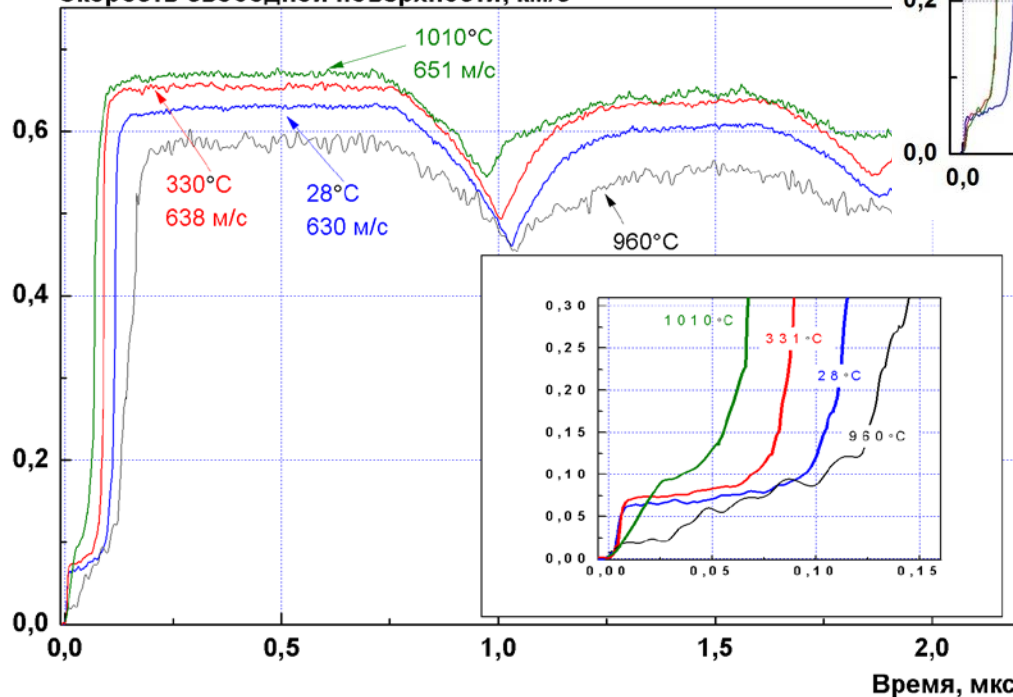


Э635	28°C	330°C	960°C	1010°C
$\sigma_h, \text{МПа}$	980	1090	-	1420
$\sigma, \text{ГПа}$	2.8	2.7	2,3	2,0

Скорость свободной поверхности, км/с

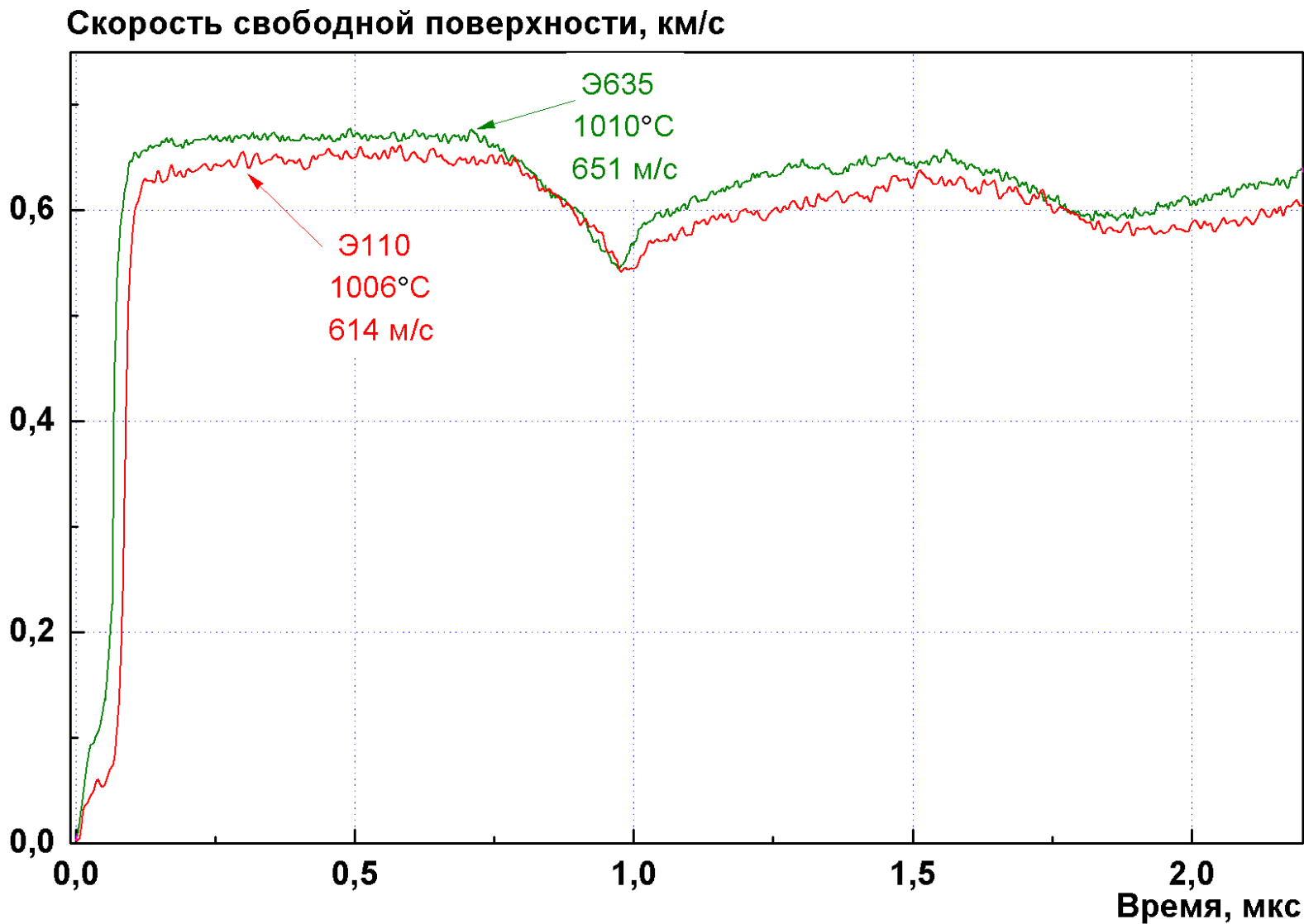


Скорость свободной поверхности, км/с



Э110	23°C	315°C	1006°C
$\sigma_h, \text{МПа}$	640	710	703
$\sigma, \text{ГПа}$	2.7	2.6	1,8

# Сплавы Э635 и Э110



# Температурная зависимость откольной прочности

Цирконий (Э100)

Сплав Zr – 2,5 % Nb (Э125)

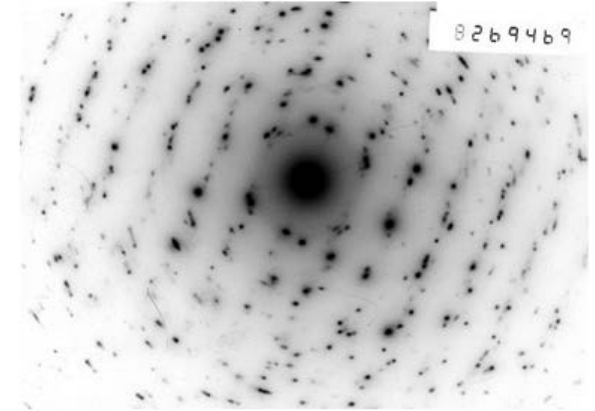
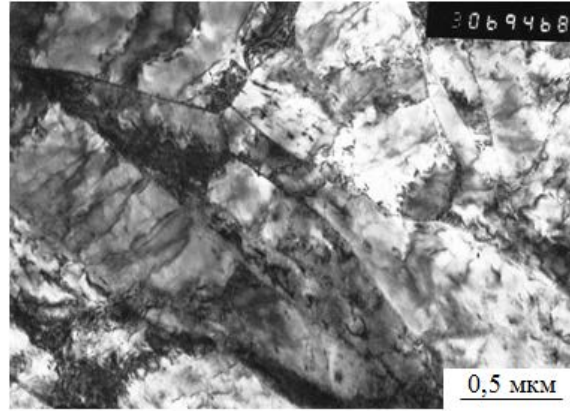
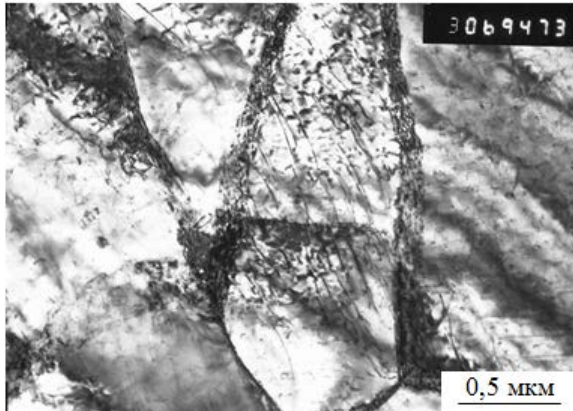


# Цирконий Э100 (сохраненные образцы)

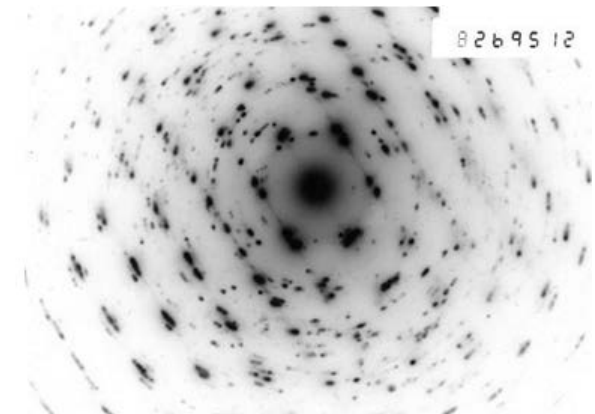
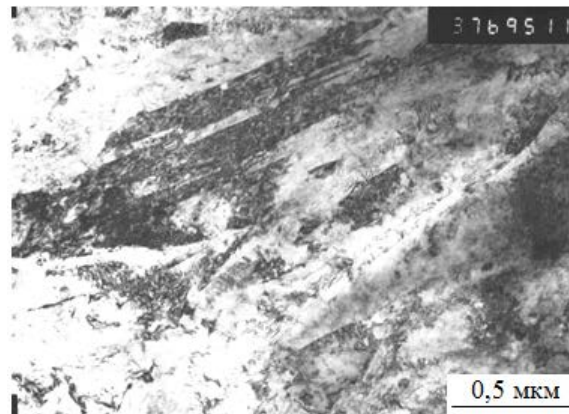
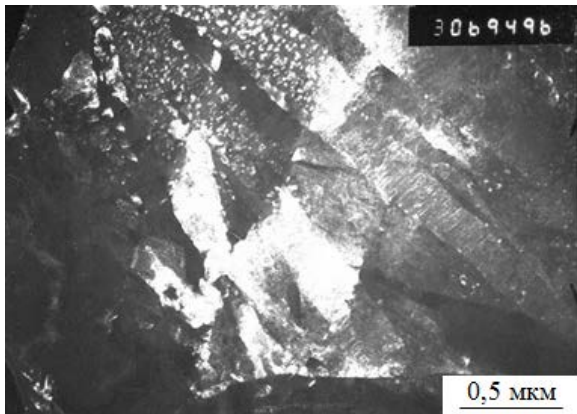


$V = 0,5 \text{ км/с}$

в деформационной структуре имеется большое количество дислокаций (одиночные, дислокационные границы)



$V = 0,9 \text{ км/с}$

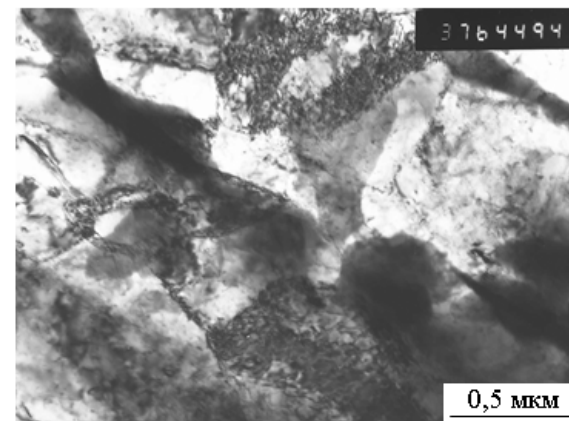
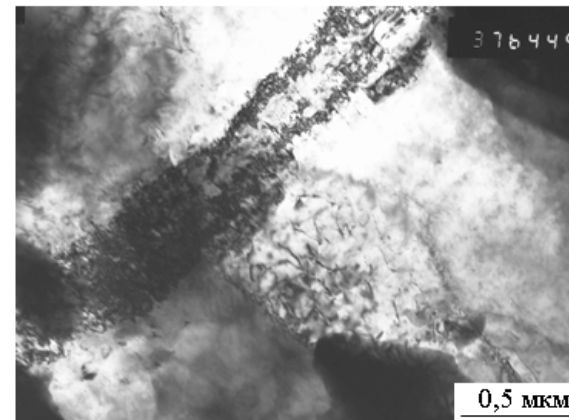
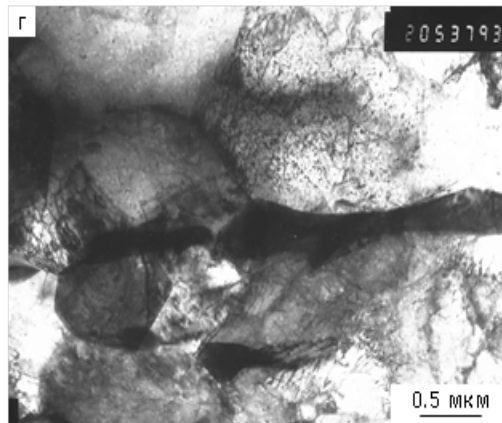
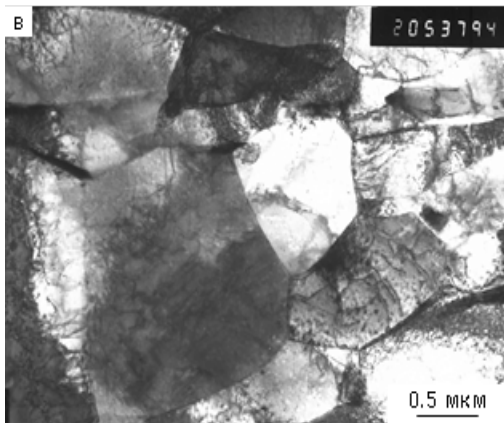
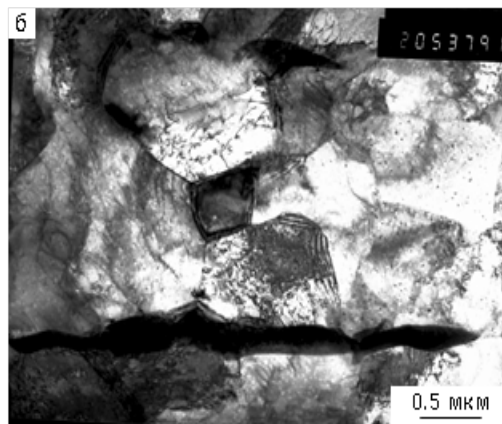
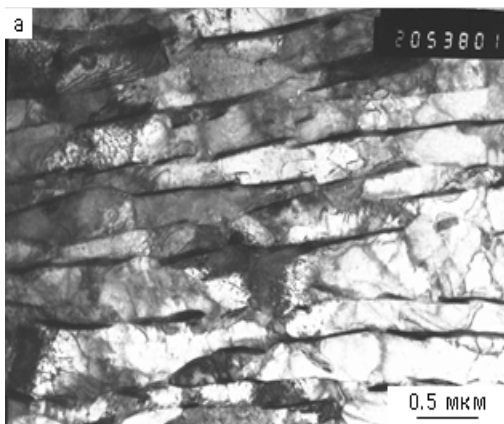


протекает фазовое  $\alpha \leftrightarrow \omega$  превращение,  $\omega$ -фаза сохраняется в метастабильном состоянии; наличие рефлексов  $\omega$ -фазы и тяжелой диффузного рассеяния, специфический полосчатый контраст

# Микроструктура сплава Э110 (сохраненные после нагружения образцы)

Отсутствие микродвойников, присутствие  $\beta$  - фазы по границам зерен  $\alpha$  - фазы, исходное зерно дробится с образованием равноосных зерен и зерен в виде реек (пластин), малая плотность дислокаций

$V = 0,58$  км/с



$V = 0,21$  км/с;  $T = 600$  °С

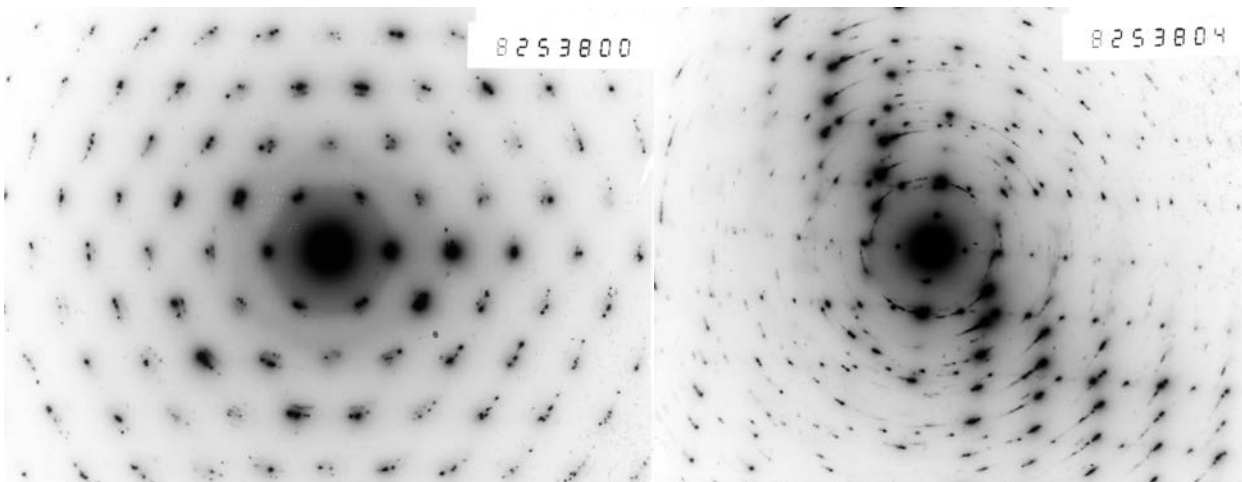
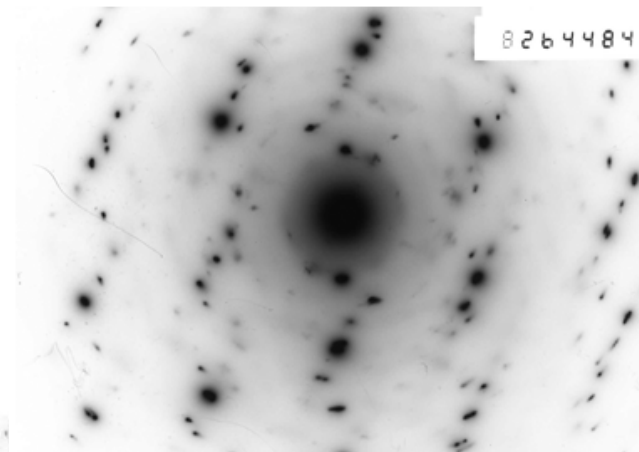
границы  $\alpha$ -фазы содержат большое количество неравновесных дислокаций; присутствие микродвойников

# Микроструктура сплава Э110 (после нагружения)



микроэлектроннограммы

$V = 0,21$  км/с;  $T = 600$  °C



большое количество дислокационных  
вакансионных петель

$V = 0,58$  км/с

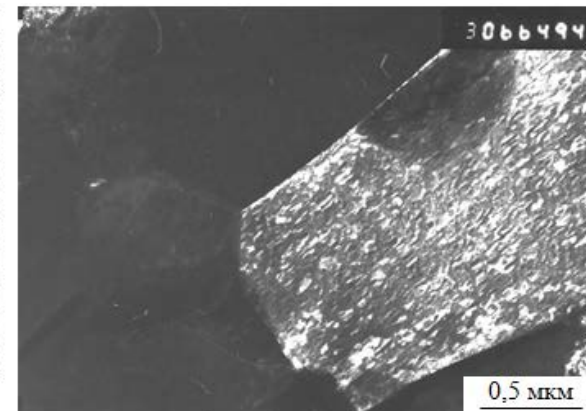
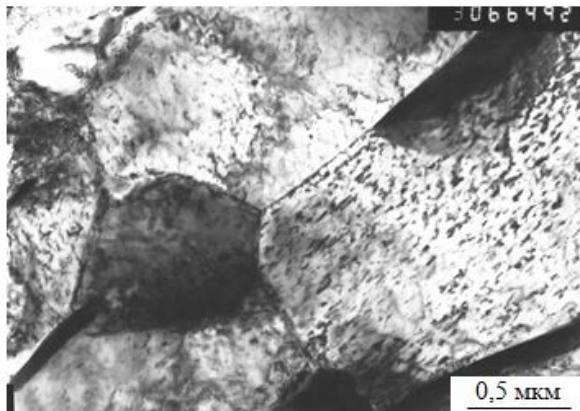
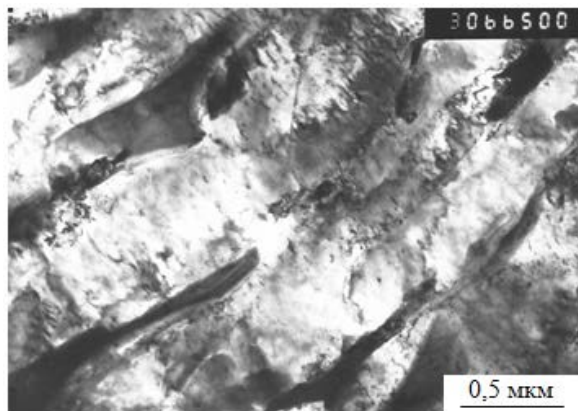
В процессе импульсного нагружения сохраняется исходная  $\alpha$ -фаза. Зерно разбилось на 3–4 зерна близкой ориентации. Однако в некоторых случаях исходные зерна при деформации сильно фрагментировались на большое количество мелких фрагментов.

В результате деформации разориентация между фрагментами достигала 5–10°. Средний размер зерна  $\alpha$ -фазы в сплаве составил  $\sim 1$  мкм.

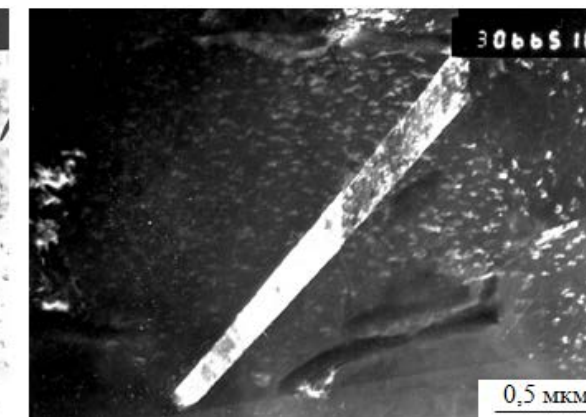
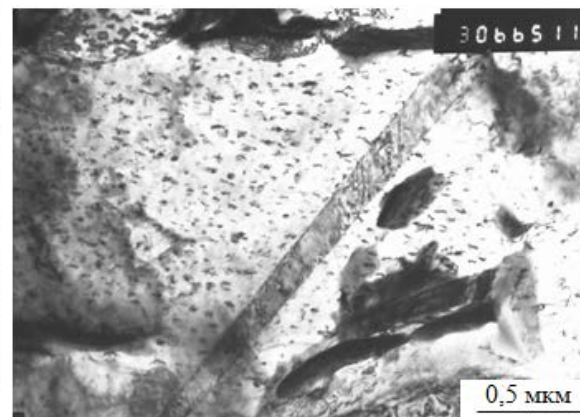
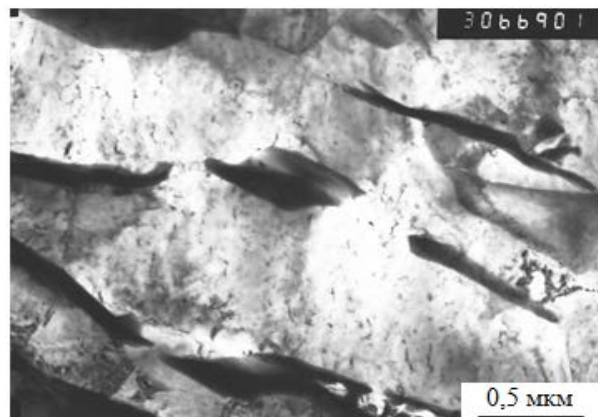
# Микроструктура сплава Э635 (после нагружения)

$V = 0,3$  км/с

полностью отсутствуют деформационные микровойники; много дислокационных вакансионных петель, что свидетельствует о протекании деформации скольжением; форма  $\beta$ -фазы сохраняется



$V = 0,22$  км/с;  $T = 210$  °С



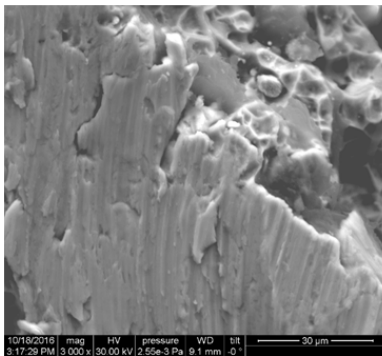
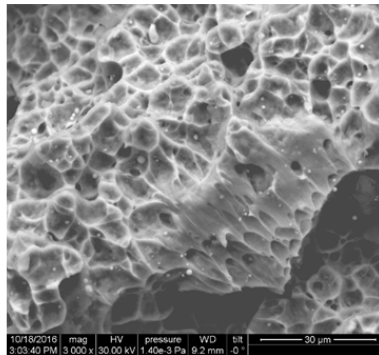
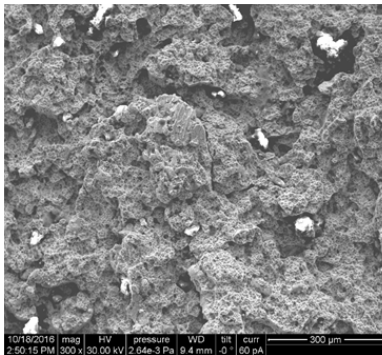
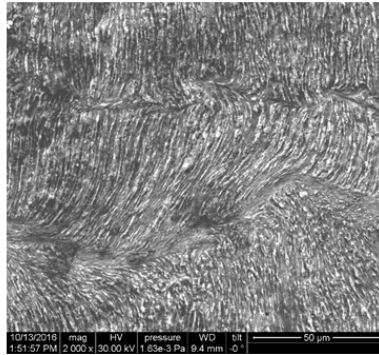
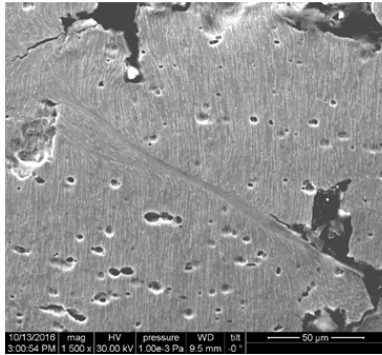
сплава наблюдаются в большом количестве дислокационные вакансионные петли; присутствуют микровойники, как и в исходном состоянии; вид зерен  $\beta$ -фазы существенно отличается; сильное искажение кристаллической решетки



# Сплав Э125 (Zr-2,5Nb) (после нагружения)



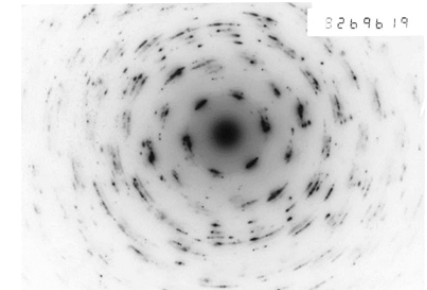
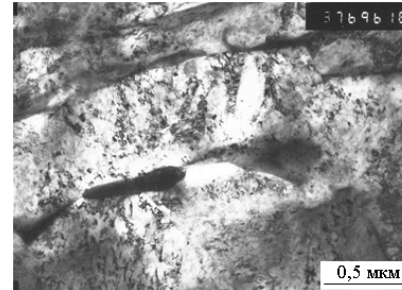
V = 0,99 км/с



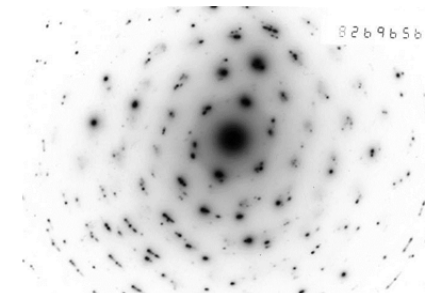
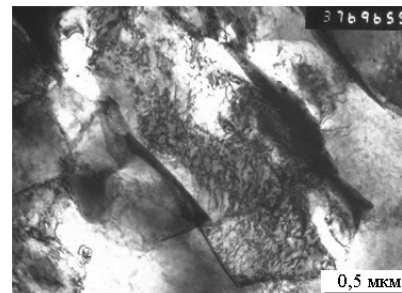
образование большого количества полос локализации деформации; разрушение в основном протекало пластически, рост и слияние пор

V = 0,99 км/с

структура сплава в основном состоит из  $\alpha$ -фазы, количество сохранившейся  $\omega$ -фазы меньше, чем в нелегированном цирконии; деформация скольжением и зернограницным проскальзыванием; сильное измельчение структуры за счет деформации скольжением и  $\alpha \leftrightarrow \omega$  превращения;



V = 0,3 км/с



в структуре появляются мелкие зерна; пластическая деформация скольжением; имеет место двойникование, микродвойники редки

# Механизмы деформации



## Цирконий Э100

основные механизмы деформации являются скольжение и двойникование, причем с увеличением интенсивности нагружения роль двойникования увеличивается; после высокоинтенсивного режима нагружения ( $V = 911,7$  м/с) в цирконии сохраняется  $\omega$ -фаза

## Zr-1%Nb Э110

основные механизмы деформации:

при  $20^\circ\text{C}$  – скольжение и двойникование; при  $600^\circ\text{C}$  – только скольжение;

характерная особенность – локализации пластического течения независимо от температуры;

## Э635

основные механизмы деформации – скольжение и зернограничное проскальзывание, в том числе при повышенной (до  $210^\circ\text{C}$ ) температуре;

высокоинтенсивная деформация – только скольжение, сильная локализация пластического течения и образование  $\omega$ -фазы;

## Zr-2,5%Nb Э125

основные механизмы деформации:

пластическая деформация скольжением и двойникованием, микродвойники редки;

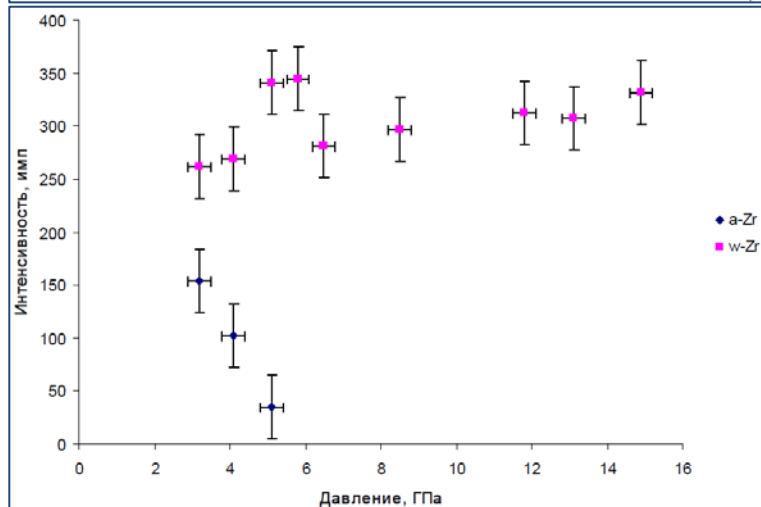
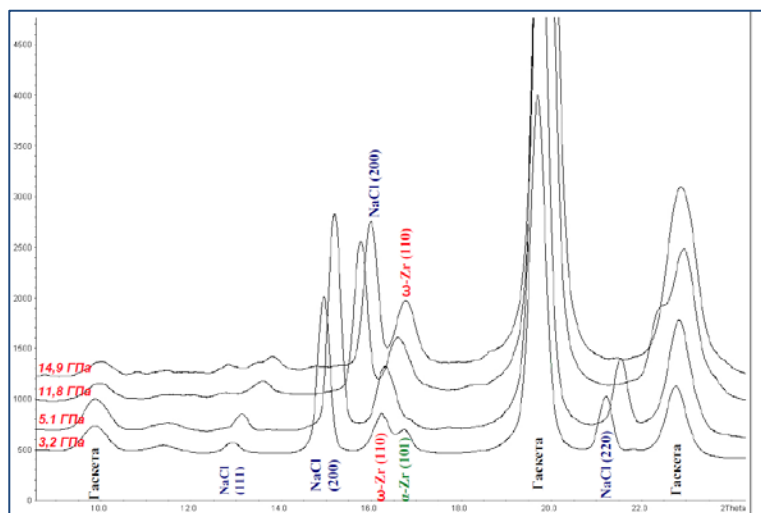
высокоинтенсивная деформация – скольжением и зернограничным проскальзыванием;

сильное измельчение структуры за счет деформации скольжением и  $\alpha \leftrightarrow \omega$  превращения

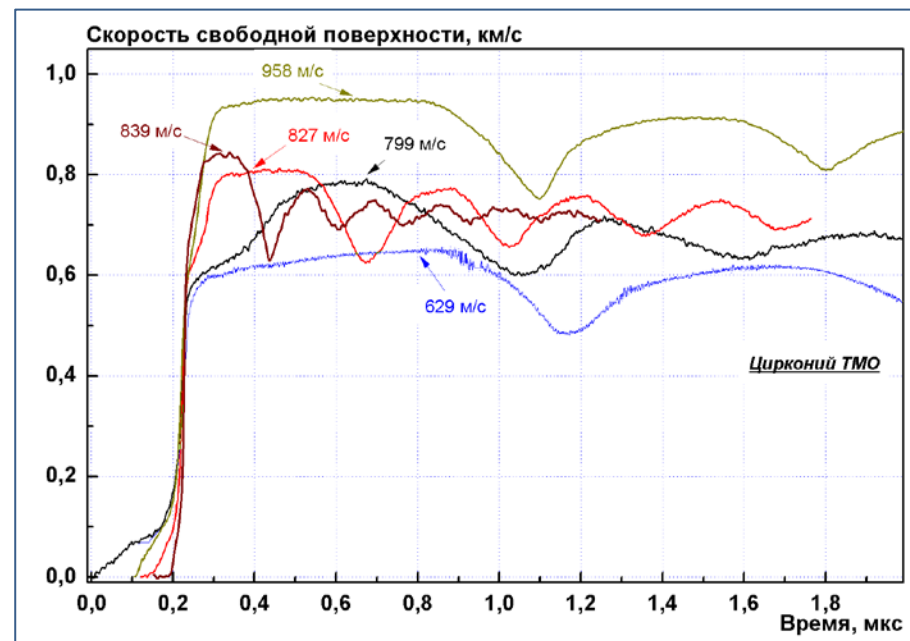
**Увеличение микротвердости** материалов зависит от интенсивности воздействия, определяется деформационным упрочнением в результате измельчения зерна и появления большого количества деформационных дефектов – дислокаций, субгрануц и микродвойников, а также образованием фазы высокого давления после  $\alpha \leftrightarrow \omega$  превращения.

# Zr $\alpha \rightarrow \omega$ превращение

## Статика



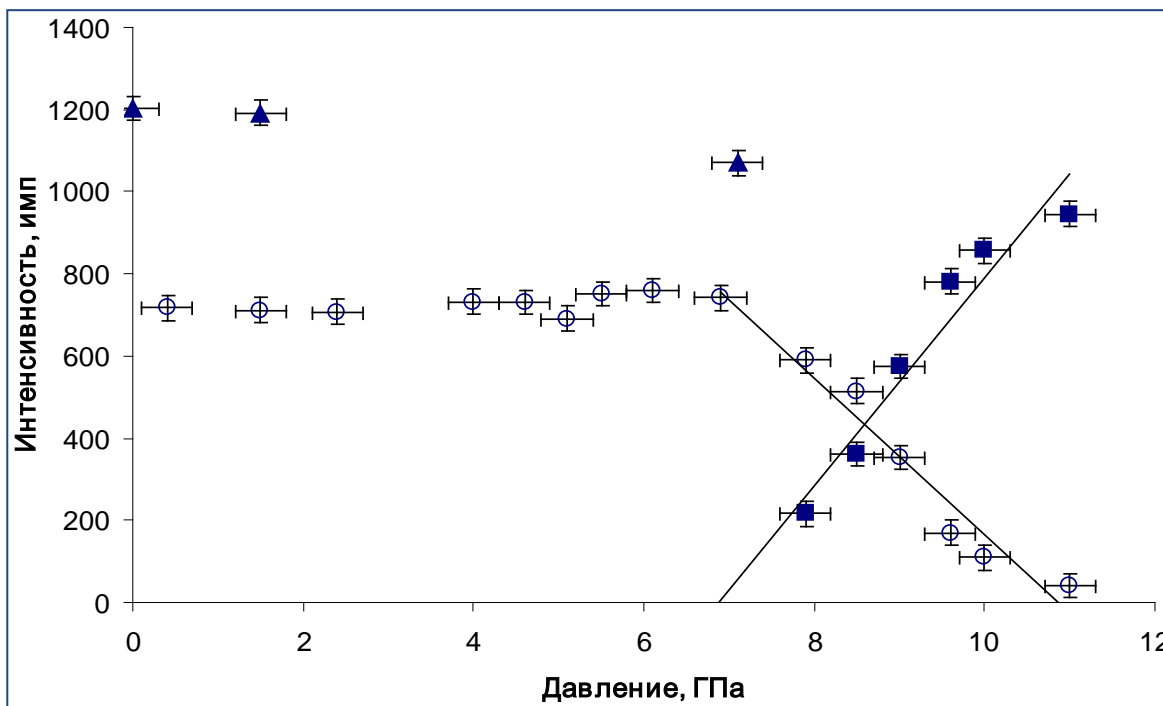
## Динамика



$\alpha \rightarrow \omega$

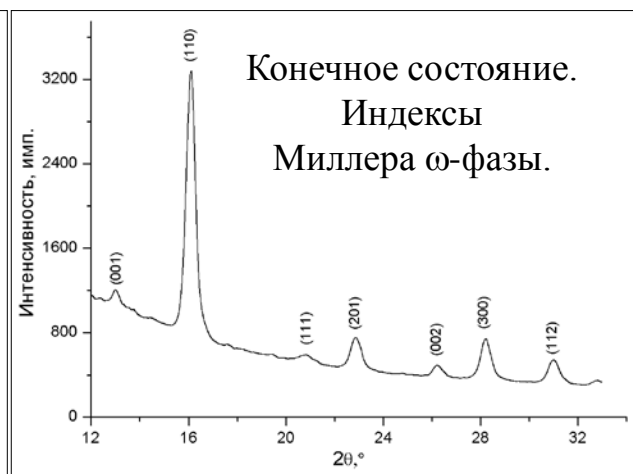
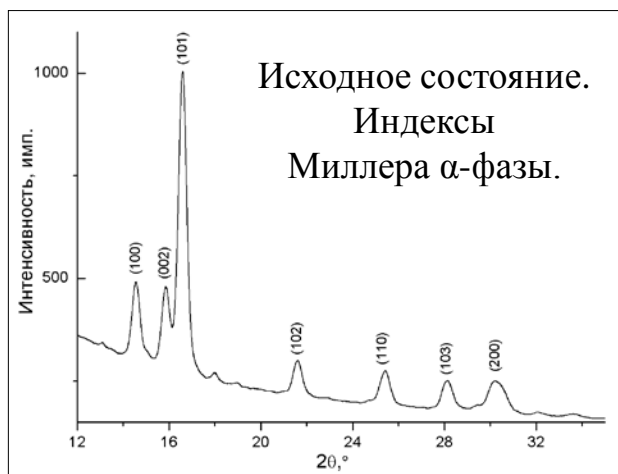
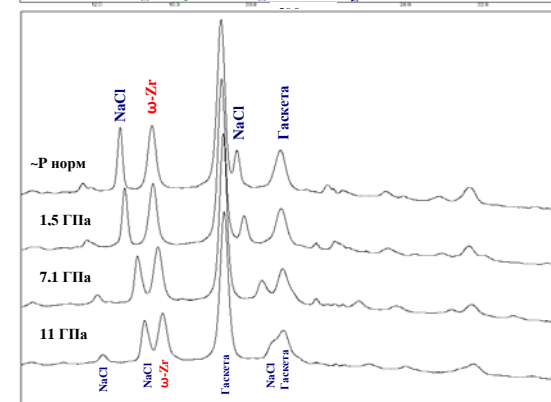
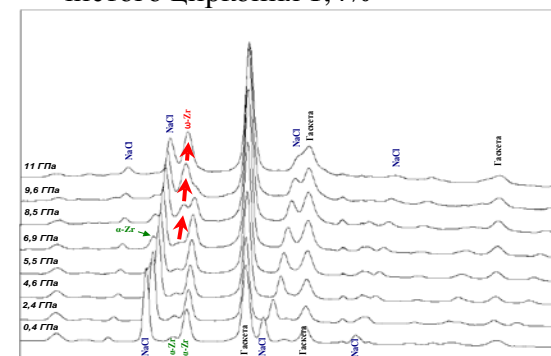
- 0,98 мм - при 8,1 ГПа;
- 1,99 мм - ~7,7 ГПа;
- 4 и 6 мм - ~7,4 ГПа.

# Zr-1%Nb (Э635). $\alpha \rightarrow \omega$ превращение



$V_{\omega} = 23,07 \pm 0,06 \text{ \AA}^3$  меньше  
 объёма, приходящегося на один  
 атом в альфа фазе  
 $V_{\alpha} = 23,29 \pm 0,04 \text{ \AA}^3$  при  $P_{\text{норм}}$ .

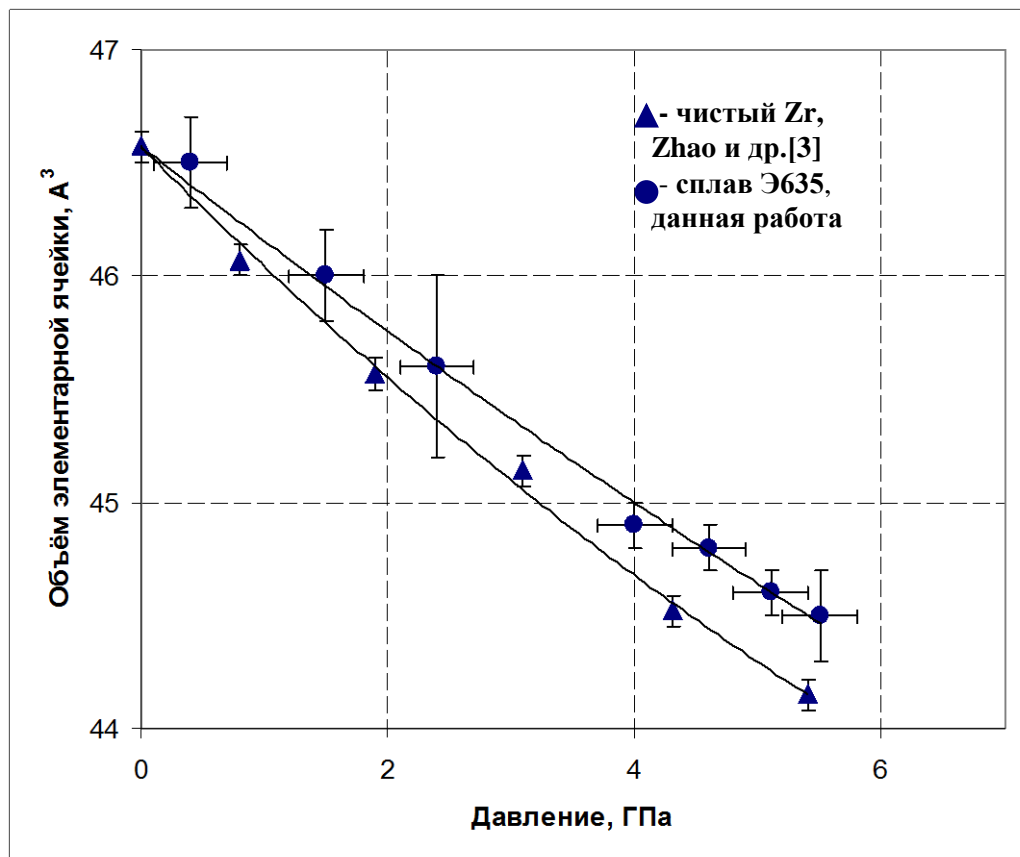
Уменьшение объёма  $\sim 1\%$ . Для  
 чистого циркония 1,4%



**А.В.Седов, А.Е.Шестаков.**

*Сжимаемость и фазовый переход в циркониевом сплаве Э635 при статическом нагружении. В трудах 12<sup>й</sup> РФМС, 2017.*

# Zr-1%Nb (Э635). $\alpha \rightarrow \omega$ превращение



Зависимость объёма элементарной ячейки  $\alpha$ -фазы в сплаве Э635 от давления (круги). Треугольниками показаны экспериментальные данные для  $\alpha$ -фазы чистого циркония из работы Zhao и др.[\*].

А.В.Седов, А.Е.Шестаков.

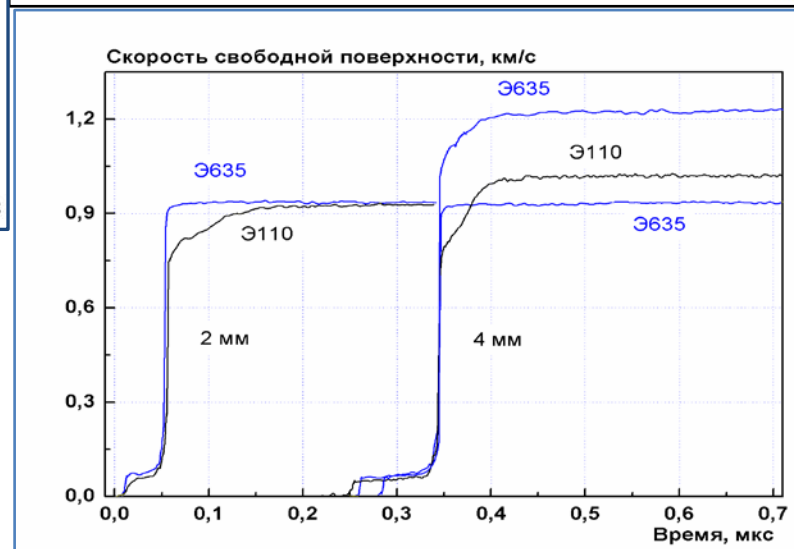
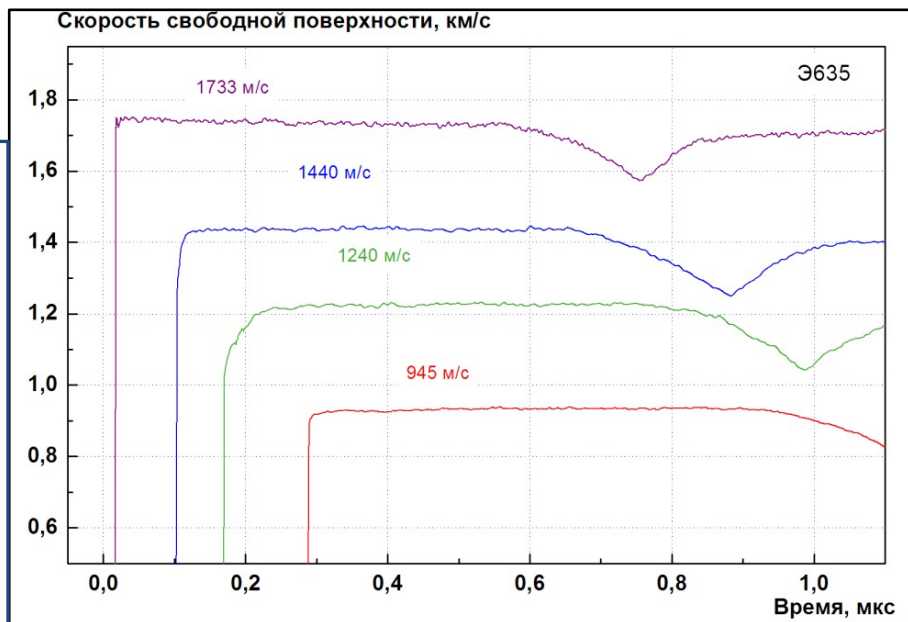
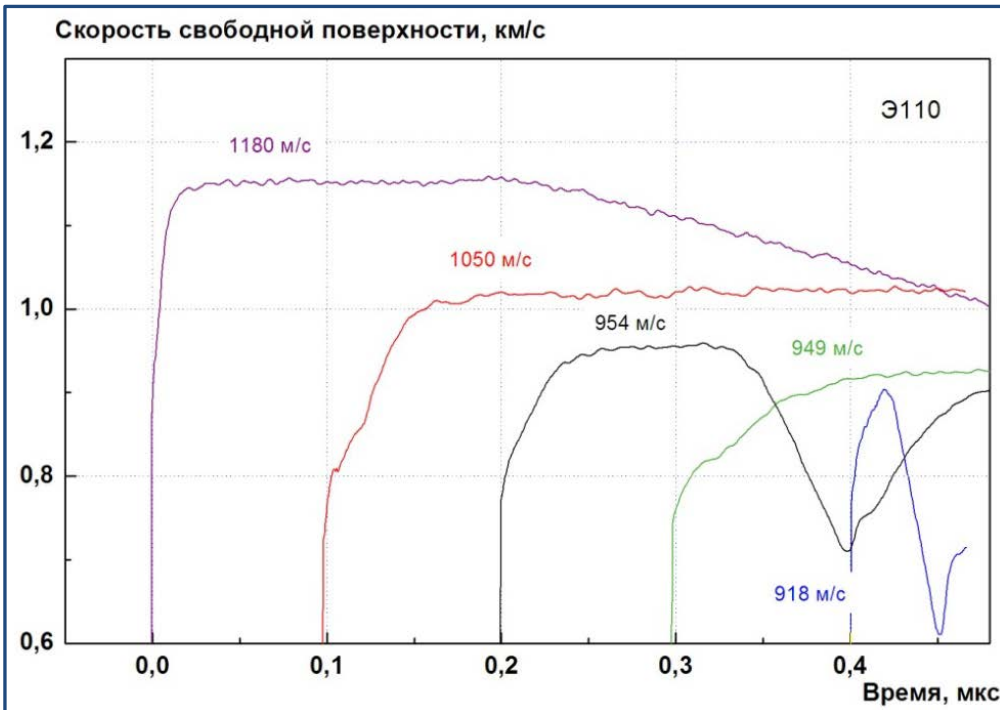
Сжимаемость и фазовый переход в циркониевом сплаве Э635 при статическом нагружении. В трудах 12<sup>й</sup> РФМС, 2017.

## Сжимаемость $\alpha$ -фазы в сплаве Э635

оценка величины  
изотермического модуля  
объёмной упругости  
при нормальных  
условиях  
 $K_0^{\text{Э635}} \approx 100$  ГПа

\*. Zhao, Zhang, Pantea, Qian, Daemen, Rigg, Hixson, Greeff, Gray III, Yang, L. Wang, Y. Wang, Uchida. «Thermal Equations of State of the  $\alpha$ -,  $\beta$ -, and  $\omega$ - Phases of Zirconium».

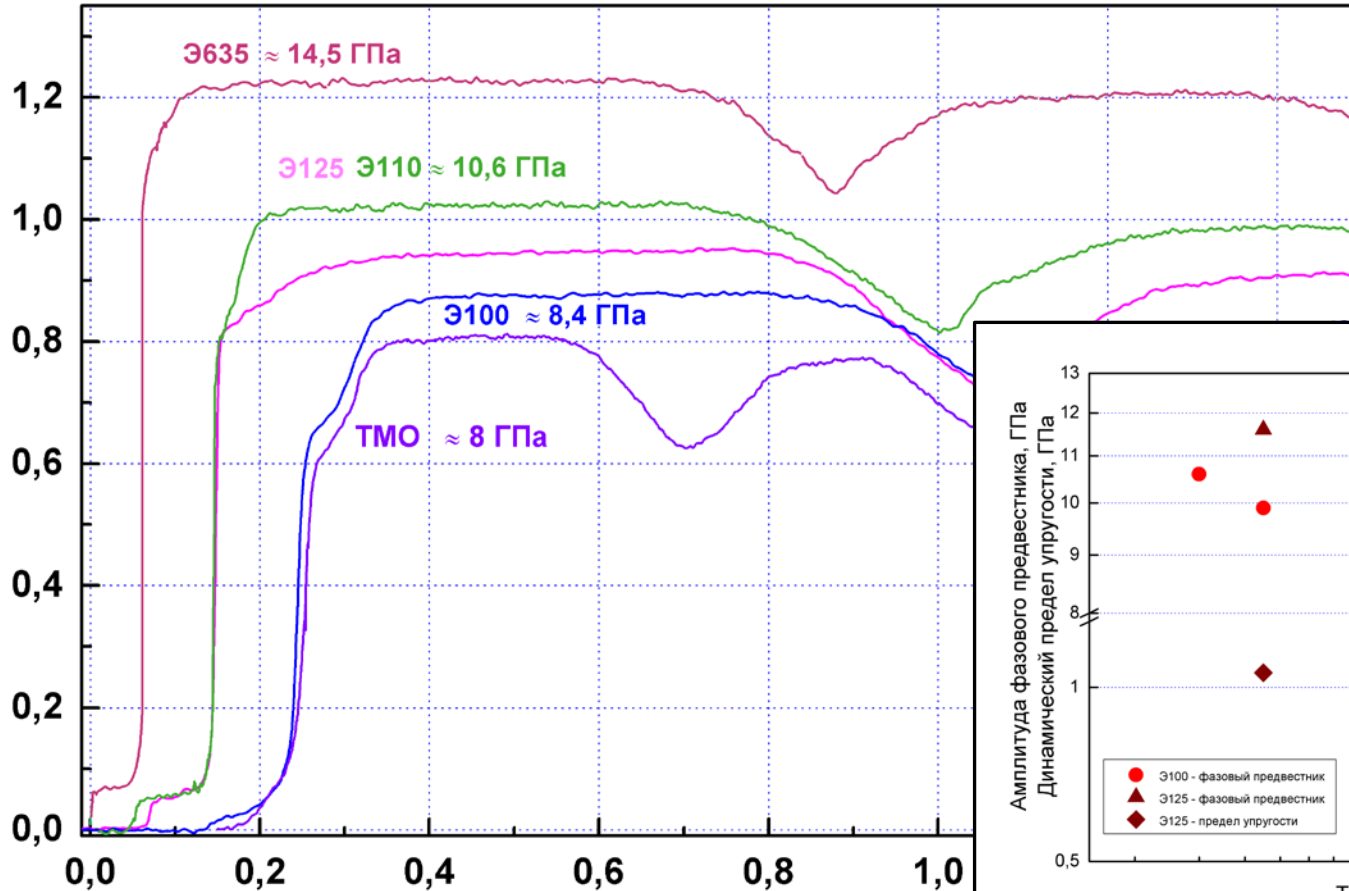
# Zr-1%Nb (Э110/Э635). $\alpha \rightarrow \omega$ превращение



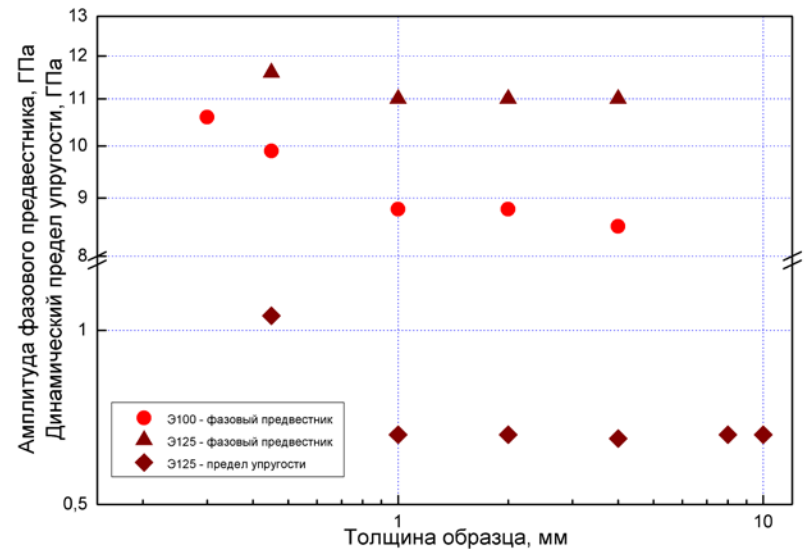
$\alpha \rightarrow \omega$ : 0,46 мм - 11,2 ГПа; 4 мм - 10,6 ГПа.

# $\alpha \rightarrow \omega$ превращение

Скорость свободной поверхности, км/с

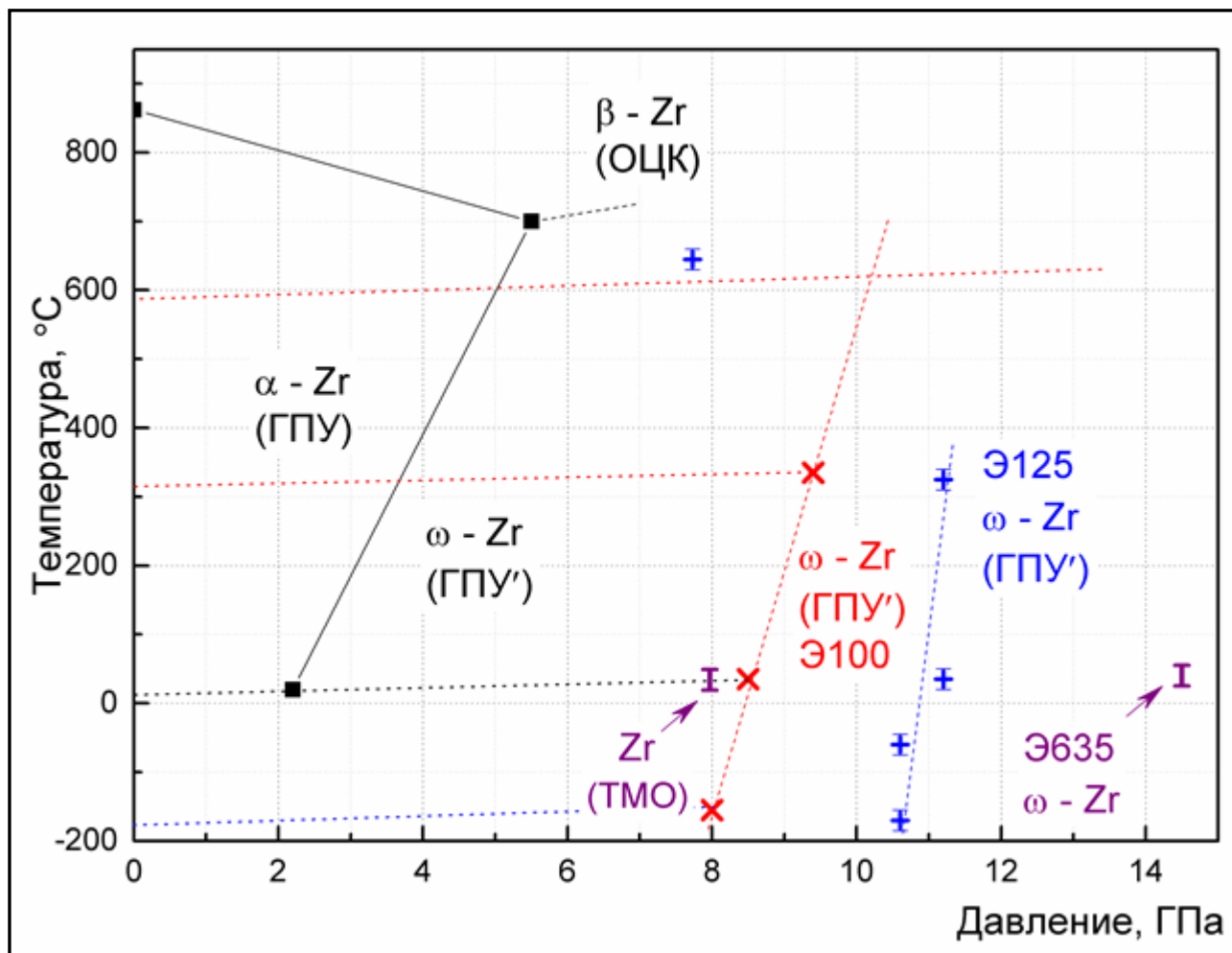


ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ Zr И СПЛАВА Zr-2,5%Nb  
Светлана Николаевна Малогуина, А. В. Павленко, С. С. Мокрушин, А. С. Майорова и др. ЗНЧ- 2017



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.

# Температурная зависимость $\alpha \rightarrow \omega$ превращения





# Заключение



- Исследован отклик образцов из циркониевых сплавов Э110, Э635 и Э125 на ударно-волновое воздействие в диапазоне амплитуд нагружения от 3 до 26 ГПа длительностью от 0,05 до 2 мкс.
- В широком диапазоне времен деформирования (толщин образцов) определены величины динамических пределов упругости и текучести, подобраны параметры эмпирического соотношения  $\sigma_h = S(h/h_0)^{-\alpha}$ , описывающего релаксацию упругих предвестников циркониевого сплава Э635 и Э110. Для сплава Э635 параметры  $S = 1,158$ ,  $\alpha = 0,148$ , для сплава Э110 -  $S = 0,88$ ,  $\alpha = 0,138$ .
- В широком диапазоне скоростей деформирования определены значения откольной прочности, подобраны параметры эмпирического соотношения, описывающего зависимость откольной прочности от скорости деформирования для сплава Э635 -  $\sigma_{sp\text{Э}635} = 0,96(\dot{V}N)^{0,095}$ , для сплава Э110 -  $\sigma_{sp\text{Э}110} = 0,402(\dot{V}N)^{0,164}$ , для сплава Э110 -  $\sigma_{sp(\text{Э}125)} = 1,73(\dot{V}N)^{0,057}$ .
- Проведены измерения прочностных свойств циркониевых сплавов при повышенных температурах. Измерения проводились при температурах ~300, 960 и ~1000°C.
- Откольная прочность образцов сплавов Э635 и Э110, нагретых до температуры ~300°C практически не изменилась, динамический предел упругости возрос на 11%, динамический предел текучести снизился на 6 %. При температуре ~1000°C (материал в  $\beta$  - фазе) снижение откольной прочности ~ 20 %.

# Заключение



- Установлены условия протекания равновесного и динамического фазового  $\alpha \rightarrow \omega$  превращения, экспериментально определены зависимости динамических свойств этих материалов от состава, режимов импульсного нагружения. Определены температурные зависимости откольной прочности чистого циркония марки Э100 и циркониевого сплава Э125.
- Для сплавов Э100 и Э125 значение амплитуды ударных волн, при которых происходят фазовые  $\alpha \rightarrow \omega$  превращения – 8,4 ГПа и 10,6 ГПа, соответственно. Для сравнения в образцах циркония подвергнутого ТМО – 7,4 ГПа, сплава Э635 – 14,5 ГПа. Получены данные о температурной зависимости фазовых  $\alpha \rightarrow \omega$  превращений циркония и сплава Э125 в диапазоне от минус 150 до плюс 600 °С.
- Установлены основные механизмы деформирования циркония и циркониевых сплавов в области импульсных давлений субмикросекундной длительности амплитудой от 4 до 15 ГПа и температур от нормальной до 600 °С
- Высокоскоростная пластическая деформация в исследованных материалах – может протекать путем скольжения, двойникования, зернограничного проскальзывания и локализации пластического течения. Кроме того значительная часть диссипации энергии импульсного нагружения этих материалов может происходить за счет протекания фазового  $\alpha \leftrightarrow \omega$  превращения. Установлена взаимосвязь перечисленных механизмов деформации с интенсивностью и условиями нагружения, а также с изменением микротвердости материалов. Установлено, что откольное разрушение перечисленных материалов протекает преимущественно по вязкому механизму путем роста и слияния пор

1. Г.П. Кобылянский, А.Е. Новоселов. Радиационная стойкость циркония и сплавов на его основе. Справочные материалы по реакторному материаловедению. Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1996, 176с.
2. Займовский А.С. Никулина А.В., Решетников Н.Г. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике.- М.: Энергоатомиздат, 1994.
3. G.I. Kanel, V.E. Fortov, S.V. Razorenov.//*Rus.J. UFN ("Uspekhi Fizicheskikh Nauk"- Advances in Physical Sciences)*, v. 177, № 8, pp. 809-830, (2007).
4. Е.Н. Аврорин, Б.К. Водолага, В.А. Симоненко, В.Е. Фортов. //УФН, том 163, № 5, сс. 1-34.
5. G.I. Kanel, S.V. Razorenov, A.V. Utkin, V.E. Fortov. *Shock-wave phenomena in condensed media*. М.: "Yanus –K", p. 408, (1996).
6. G.I. Kanel. R.J.//*Rus.J. PMTF (Applied Mechanics and Technical Physics)*, v. 42, № 2, с. 1-5, (2001).
7. G.I. Kanel, S.V. Razorenov, A.V. Utkin, V.E. Fortov. *Experimental profiles of shock waves in condensed matter*. М.: FIZMATLIT, (2008).
8. E.B. Zaretsky, G.I. Kanel.//*J. Appl. Phys.* 110 (7), 073502 (2011)
9. E.B. Zaretsky and G.I. Kanel.// *. Appl. Phys.* 112, 073504 (2012)
10. E.B. Zaretsky and G.I. Kanel.//*J. Appl. Phys.* 114, 083511 (2013)
11. E.B. Zaretsky and G.I. Kanel. // *Journal of Applied Physics* 115, 243502 (2014)
12. *Физическое материаловедение: Б.А. Калинин, П.А. Платонов, и др.* М.: МИФИ, 2008, 672 с.
13. M.V. Zhernokletov, V.N. Zubarev, R.F. Trunin, V.E. Fortov. *Experimental data on shock compressibility and adiabatic expansion of condensed matter under high energy densities*. Chernogolovka Publisher, (1996).
14. А.В. Павленко, С.И. Балабин, О.Е. Козелков, Д.Н. Казаков. // ПТЭ, № 4, сс. 122-124, (2013).
15. А.В. Павленко, С.Н. Малюгина, В.В. Перешитов, И.Н.Лисицина. // ПТЭ, № 2. сс. 127-129, (2013).
16. С.С. Мокрушин, Н.Б. Аникин, С.Н. Малюгина, А.А. Тяктев, А.В. Павленко. // ПТЭ, № 4, сс.107-110, (2014).
17. Г.В. Гаркушин, Г.И. Канель, С.В. Разоренов. // *Физика твердого тела*, 2012. Т. 54, № 5. с. 1012-1018.
18. Д.Н. Казаков, А.С. Майорова, А.В. Павленко, С.Н. Малюгина и др. МТТ, № 6, с 77, 2014