



РОСАТОМ



ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

## УДАРНО-ВОЛНОВЫЕ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНА И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

**Александр Валериевич Павленко**

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

**С.Ю. Филатов, М.А. Борщевский, А.Е. Шестаков, А.С. Седов,**

**А.В. Добромыслов\* и Н.И. Талуц\***

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

*\* Институт Физики Металлов УрО РАН,  
Екатеринбург, Россия*

\* - 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, М.А. Борщевский

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

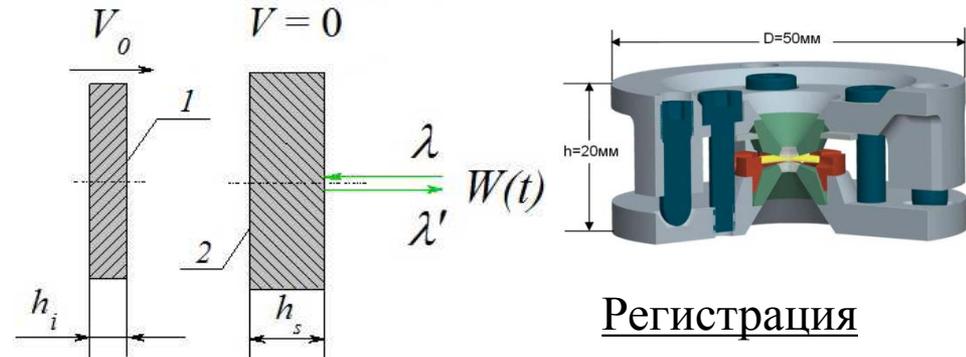
# Экспериментальная аппаратура, схема эксперимента



## Одноступенчатые пушки калибра 44 мм



## 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 % //ЭКД

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;



0,05...1 км/с и 0,2...2,5 км/с

Алмазные наковальни- ячейка типа Voehler-Almax.

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

# Титан, титановые сплавы



Титан – полиморфный металл. Его низкотемпературная модификация  $\alpha$  ( $\alpha$ -Ti) существует при температуре до 882 °С, имеет ГПУ решетку ( $\alpha$ -фаза).

Высокотемпературная модификация ( $\beta$ -Ti) имеет ОЦК кристаллическую решетку.

Фаза	Кристалл. структура	Параметры решетки, нм	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Условия существования
$\alpha$	ГПУ	a=0,229511 c=0,46843 c/a=2,04099	4,49	T ≤ 882 °С
$\beta$	ОЦК	a=0,33065	4,48	T = 882-1668 °С
$\omega$	ГПУ	a=0,4625 c=0,2813 c/a=0,608	4,581	P > 6 ГПа

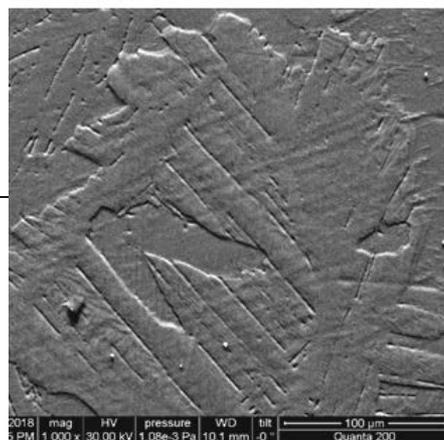
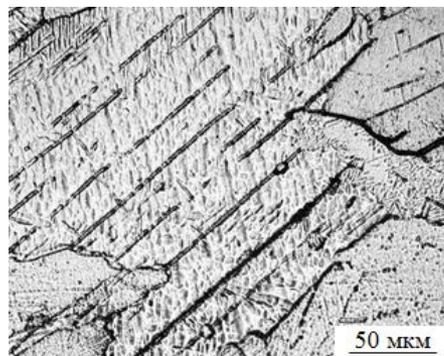
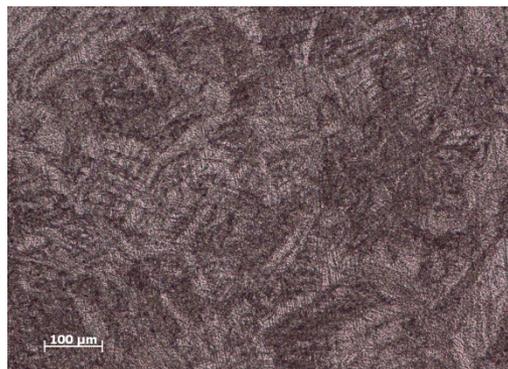
Исследуемые материалы: **BT1-00, BT1-0, OT4, BT8, BT20**

Марка	Ti	Al	Mo	Zr	V	Si	Mn	Fe	O	H	N	C	Прим
BT1-00 ( $\alpha$ -сплав)	Основа	-	-	-	-	≤0,08	-	0,15	≤0,1	≤0,008	≤0,04	≤0,05	<0,1
BT1-0 ( $\alpha$ -сплав)	Основа	≤0,7	-	-	-	≤0,1	-	≤0,25	≤0,2	≤0,01	≤0,04	≤0,07	0,1
BT8 ( $(\alpha+\beta)$ -сплав)	Основа	5,8-7	2,8-3,8	0,5	-	0,2-0,4	-	0,3	0,15	0,015	-	-	0,3
BT20 (псевдо $\alpha$ -сплав)	Основа	5,5-7	0,5-2	1,5-2,5	0,8-2,5	0,15	-	0,25	0,15	0,015	0,05	0,1	0,3
OT4 (псевдо $\alpha$ -сплав)	Основа	3,5-5	-	0,3	-	0,12	0,8-2	0,3	0,15	0,012	0,05	0,1	0,3

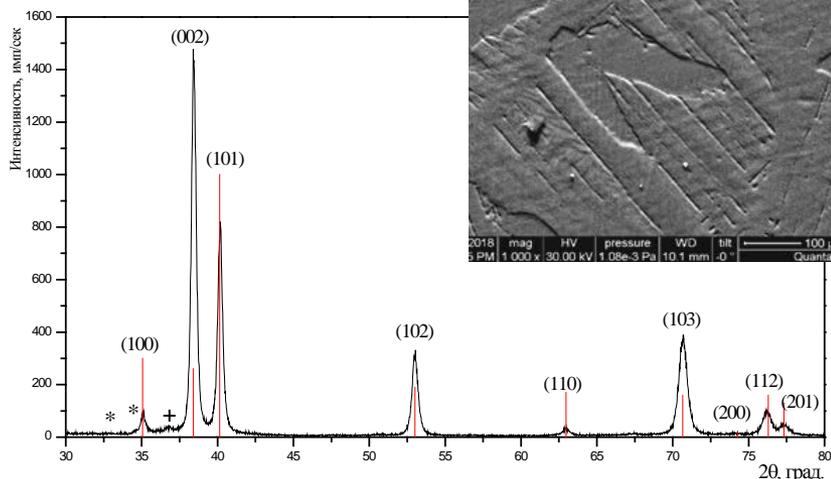
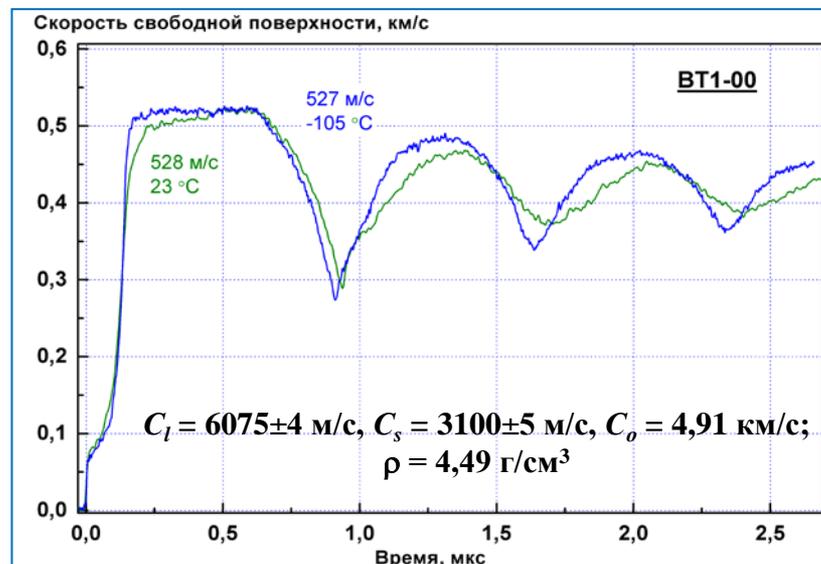
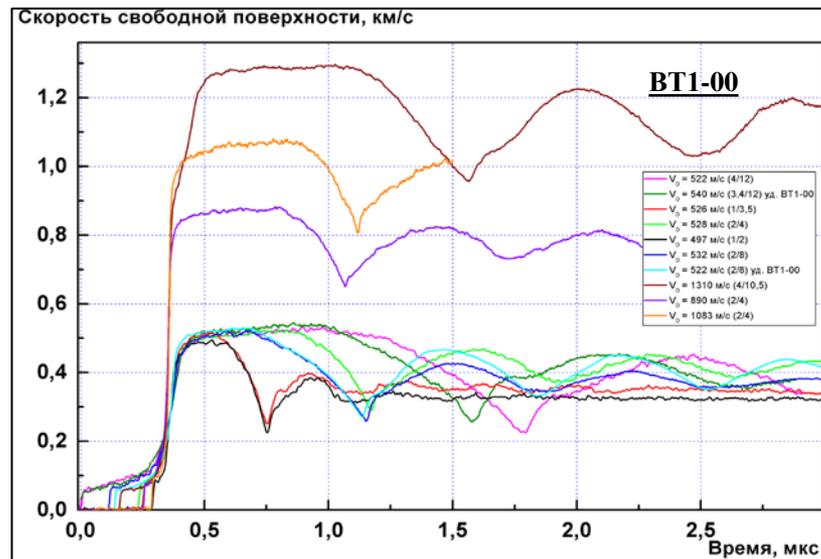
# Структура ВТ1-00, первичные данные



$H_{\mu} = 1648 \pm 50$  МПа



\* Работы выполнены  
О.И. Горбоконой, В.А.Куликовым  
Р.Р. Исхужиным, А.А. Узких

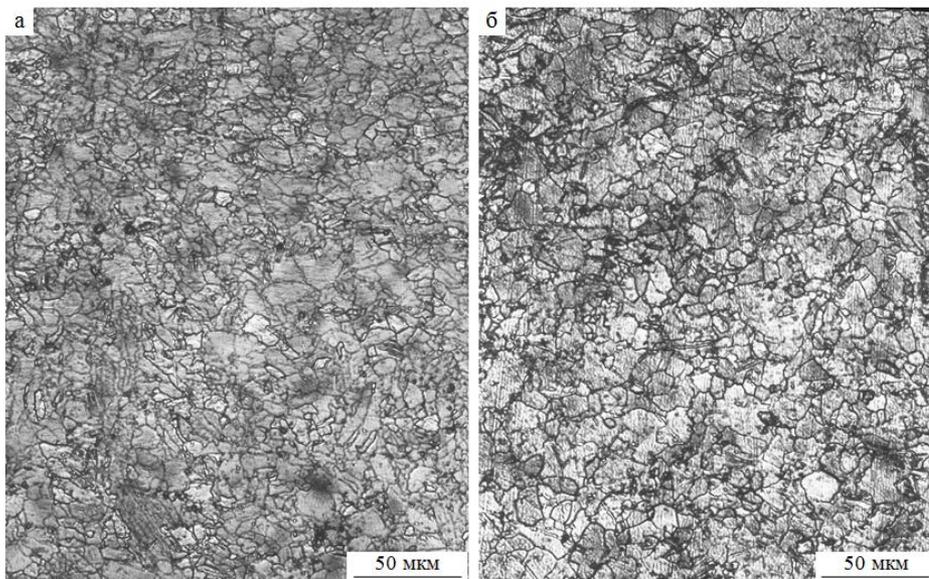


\*  $\alpha$ -Ti, содержит соединение  $Ti_2O_3$

преимущественная ориентация кристаллитов в направлении (002)

$a = b = 2,95438 \pm 0,00065$  Å и  $c = 4,68530 \pm 0,00151$  Å

# Структура ВТ1-0, первичные данные



Размер зерна – 11..13 мкм

$$H_{\mu} = 1837 \pm 55 \text{ МПа}$$

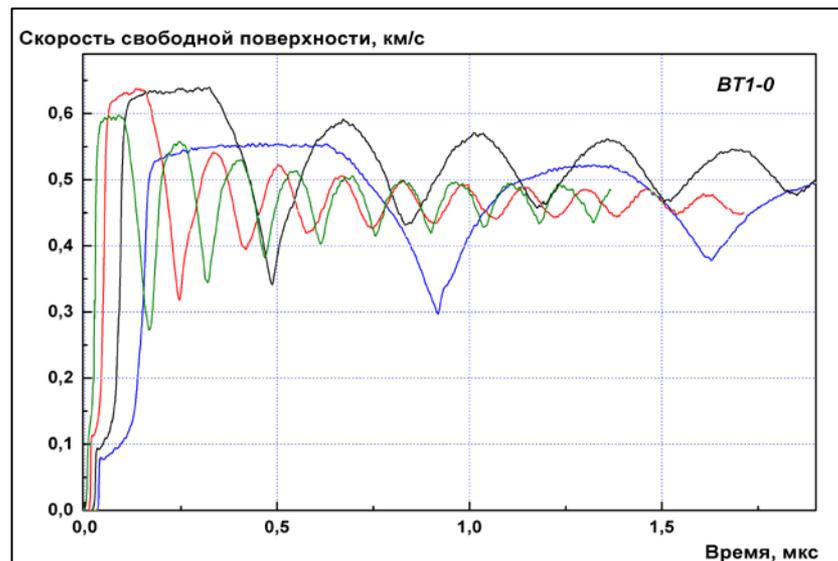
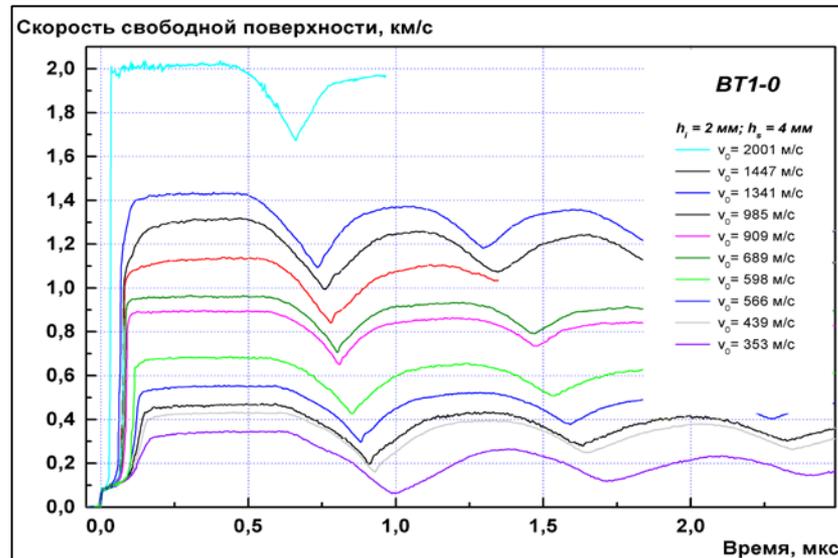
РФА - исходное состояние сплава ВТ1-0 только из одной  $\alpha$ -фазы. Присутствующие дифракционные пики довольно узкие, что свидетельствует об отсутствии существенных искажений в сплаве.

Разницы в зеренной структуре в поперечном и продольном сечениях исходного образца не выявлено.

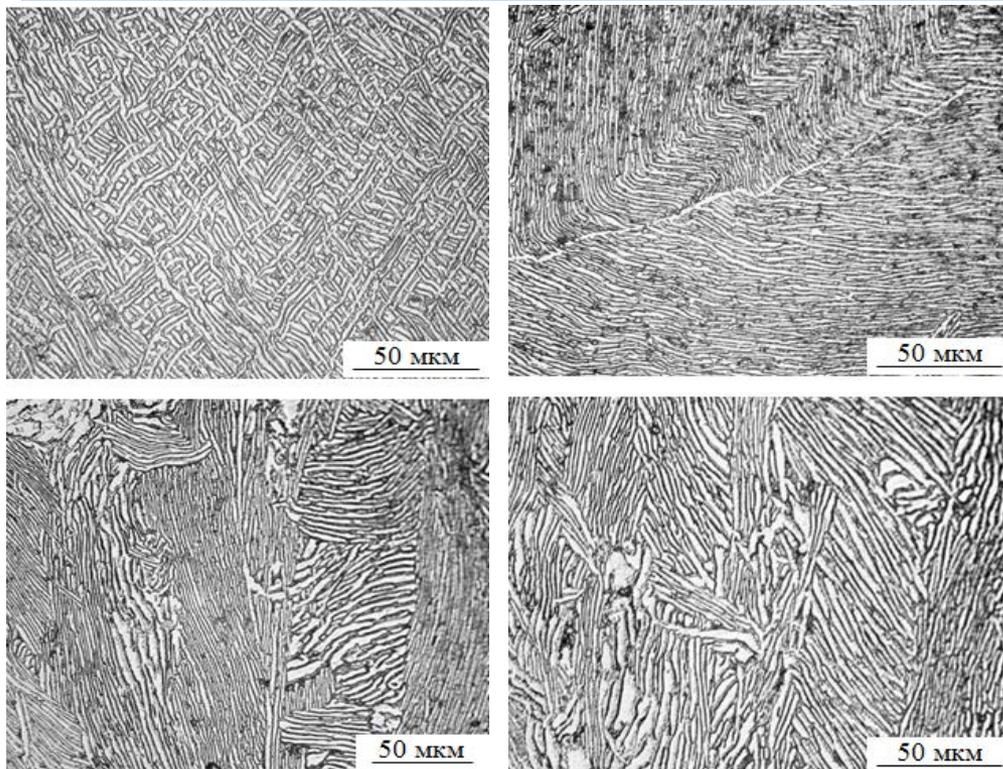
$$a = b = 2,96 \text{ \AA} \text{ и } c = 4,72 \text{ \AA}$$

$$C_l = 6085 \pm 12 \text{ м/с}, C_s = 3019 \pm 20 \text{ м/с}, C_o = 4,99 \text{ км/с};$$

$$\rho = 4,48 \text{ г/см}^3$$



# Структура ВТ8, первичные данные

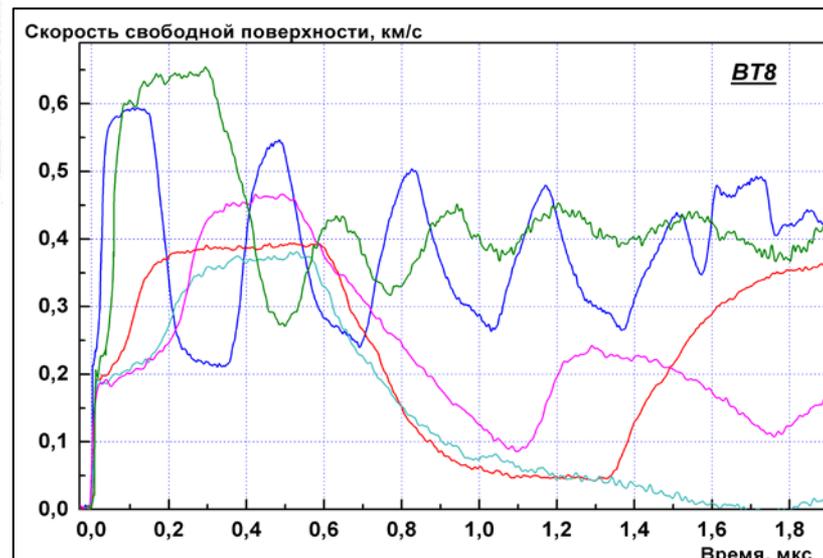
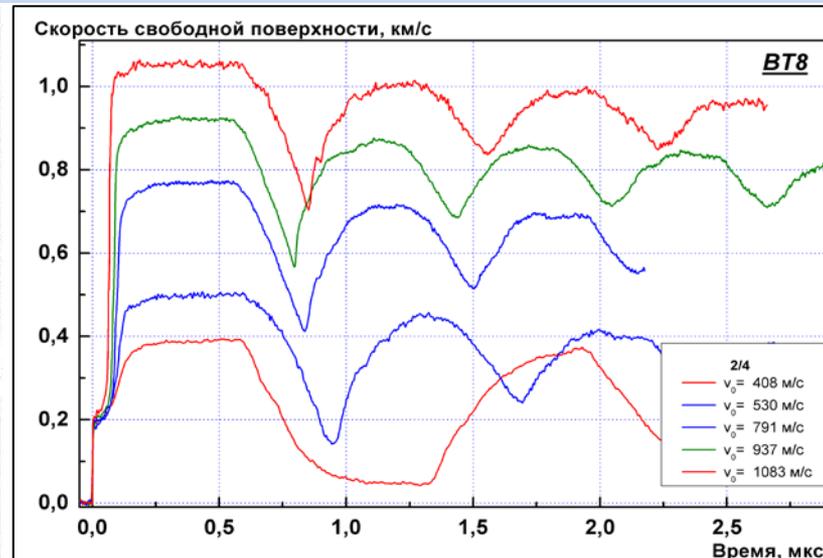


**( $\alpha+\beta$ )-сплав ВТ8** имеет ламеллярное строение, состоит из реек  $\alpha$ -фазы и прослоек  $\beta$ -фазы между ними, обогащенных легирующими компонентами. Структура в поперечном (слева) и продольном (справа) сечениях достаточно однородна.

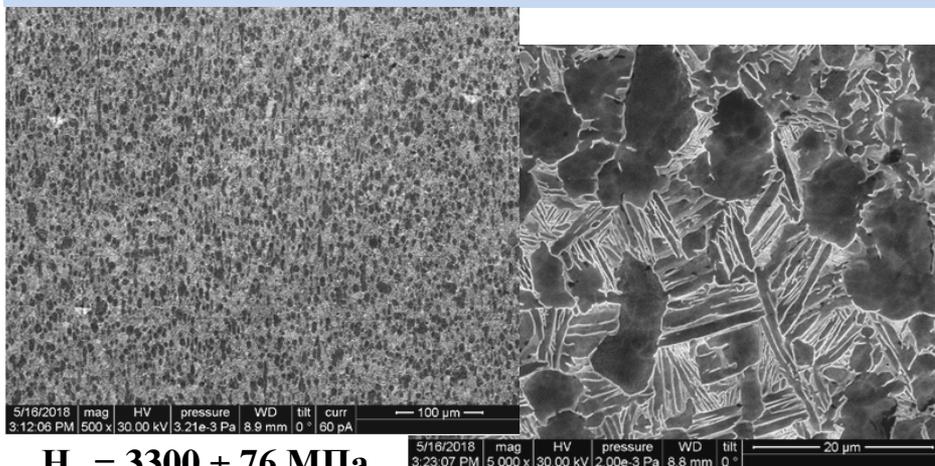
Толщина реек  $\alpha$ -фазы составляет  $\sim 1,5$  мкм, прослойка  $\beta$ -фазы –  $0,4$  мкм.

( $H_{\mu} = 3407$  МПа)

$$C_l = 6100 \pm \text{м/с}, C_s = 3130 \pm \text{м/с}, C_o = 4,91 \text{ км/с};$$
$$\rho = 4,43 \text{ г/см}^3$$



# Структура ВТ20, первичные данные

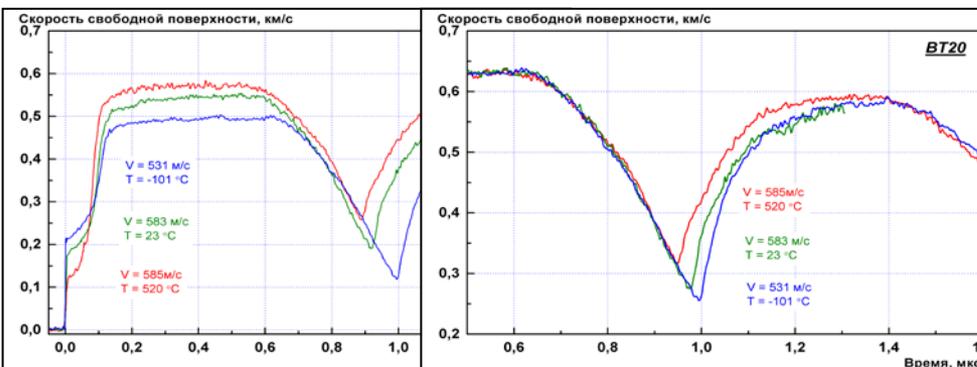
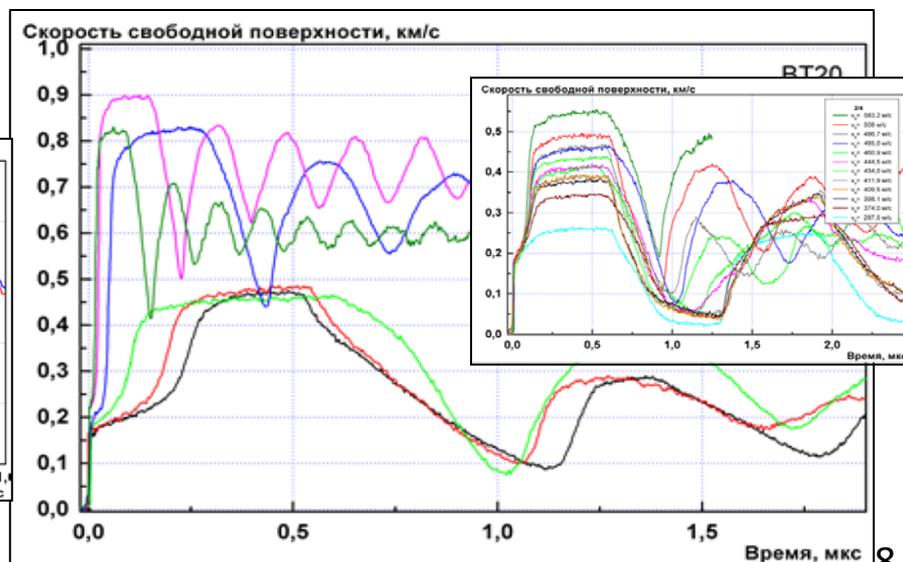
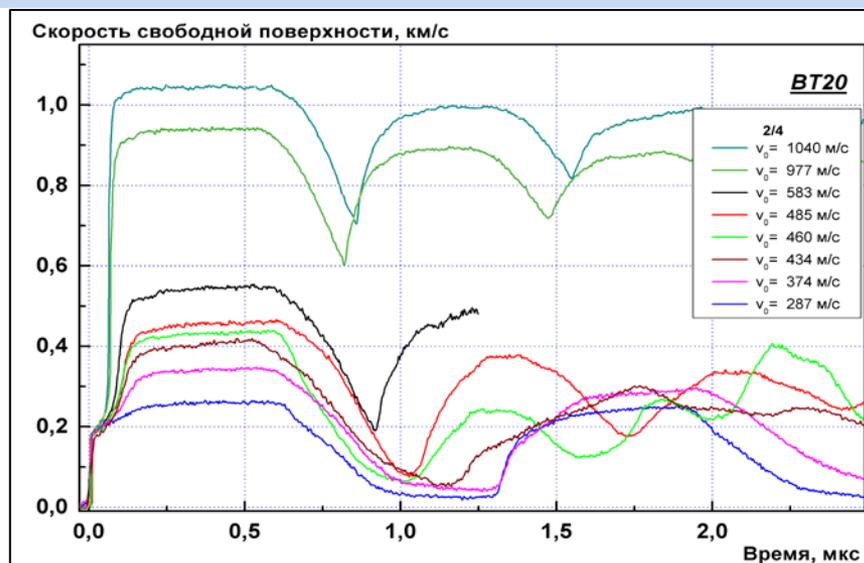


$$H_{\mu} = 3300 \pm 76 \text{ МПа}$$

Сплав ВТ20 имеет смешанную структуру, состоящую из первичной  $\alpha$ -фазы и участков  $(\alpha + \beta)$  фаз.

Двухфазные  $(\alpha + \beta)$  области состоят из колоний пластинчатых областей (ламелей)  $\alpha$ -фазы, разделенных более тонкими прослойками  $\beta$ -фазы.

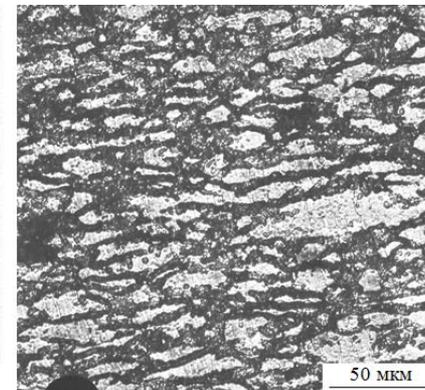
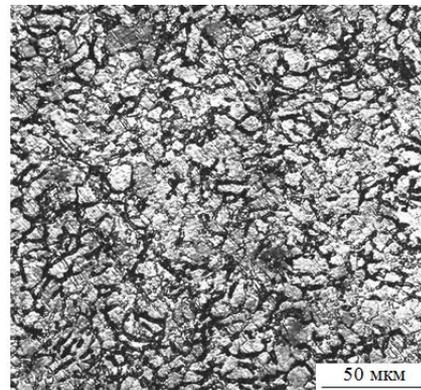
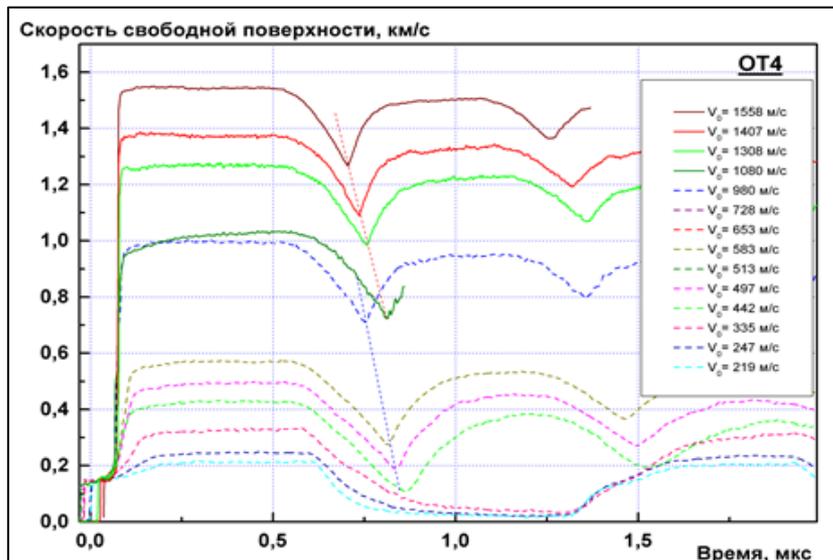
$$a_{\alpha} = (0,2925 \pm 0,0001) \text{ нм}, a_{\beta} = (0,4671 \pm 0,0002) \text{ нм}, c/a = 1,597$$



$$C_l = 6117 \pm 16 \text{ м/с}, C_s = 3200 \pm 16 \text{ м/с}, C_o = 4,875 \text{ км/с};$$

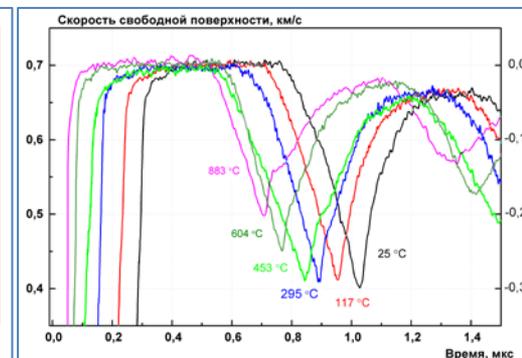
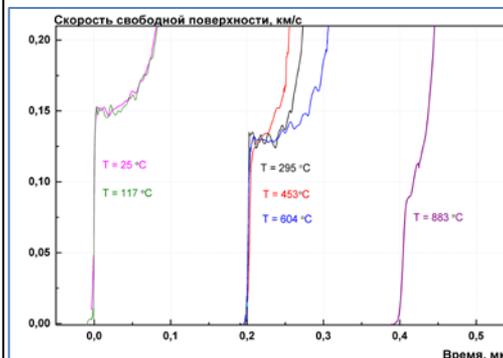
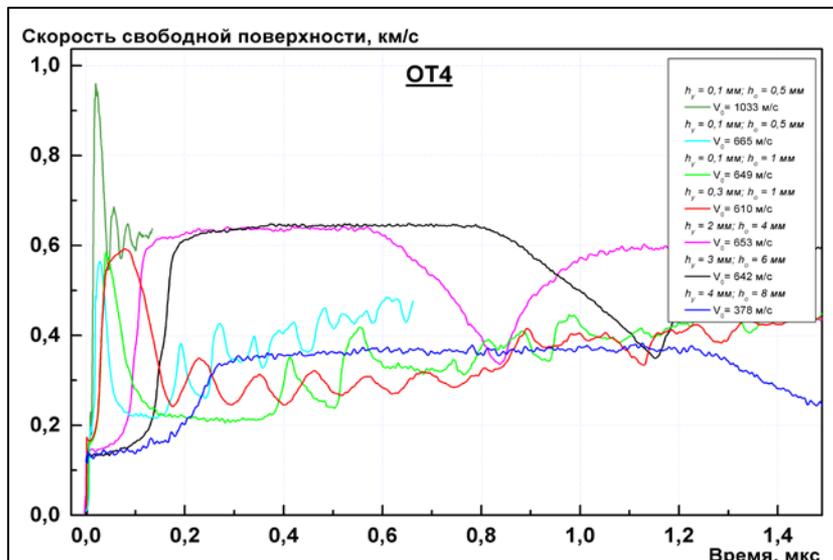
$$\rho = 4,46 \text{ г/см}^3$$

# Структура ОТ4, первичные данные



$$H_{\mu} = 2816 \pm 50 \text{ МПа}$$

Структура сплава ОТ4. В поперечном (слева) сечении наблюдается довольно однородное распределение зерен по размерам, в продольном (справа) - зерна имеют вытянутую вдоль оси образца, пластинчатую форму, т.е. в сплаве присутствует текстура прокатки. **Размер зерна – 35..37 мкм**



$$C_l = 6152 \pm 14 \text{ м/с}, C_s = 3191 \pm 25 \text{ м/с}, C_o = 4,93 \text{ км/с};$$

$$\rho = 4,4 \text{ г/см}^3$$

# Обработка профилей ударных волн



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

*Ударно-волновые явления в конденсированных средах.* Москва, М: Янус-К, 1996.

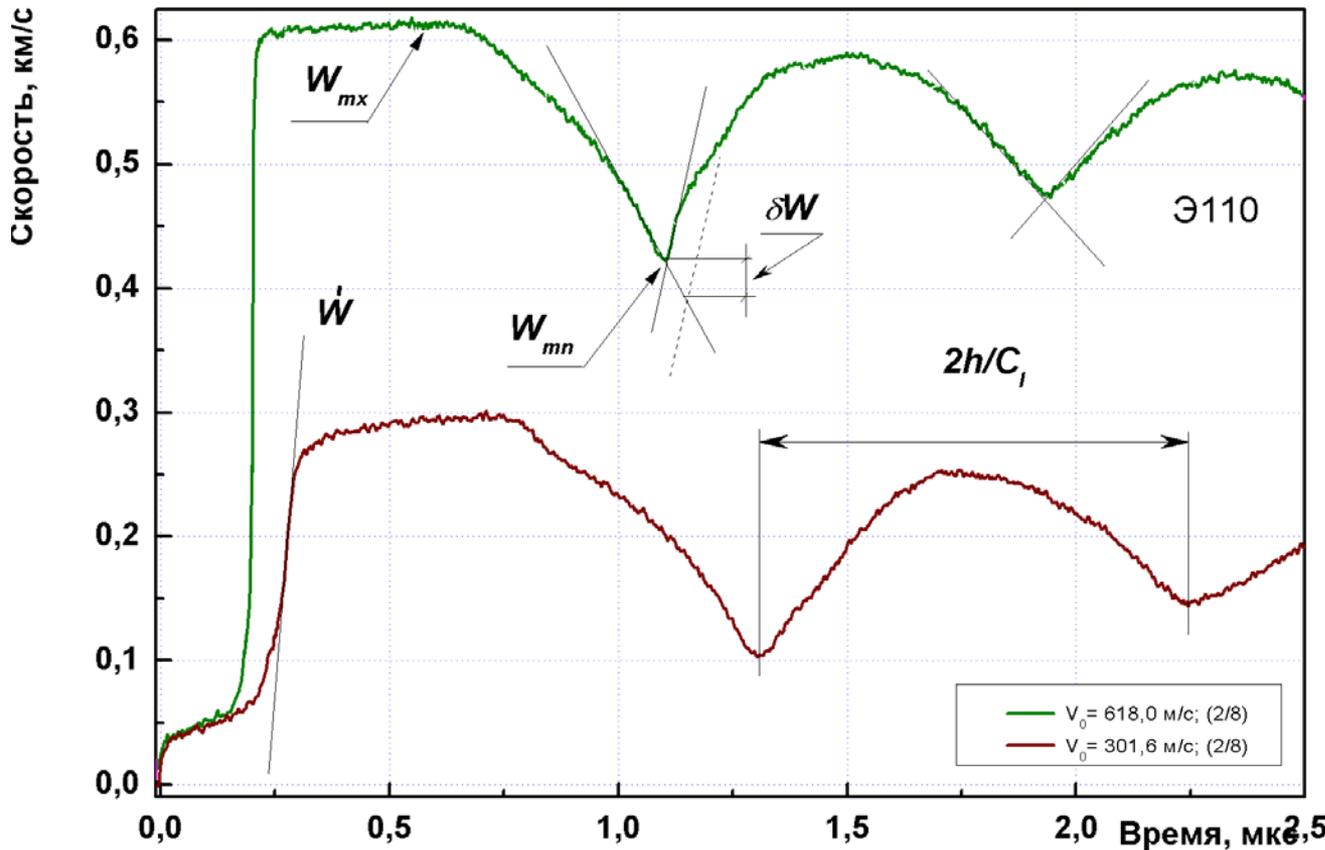
$$Y = 3/2 \sigma_e (1 - c_b^2/c_l^2), \quad \sigma_e = \rho_0 c_l u_{fse}/2$$

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

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

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

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



РФЯЦ-ВНИИТФ 2014

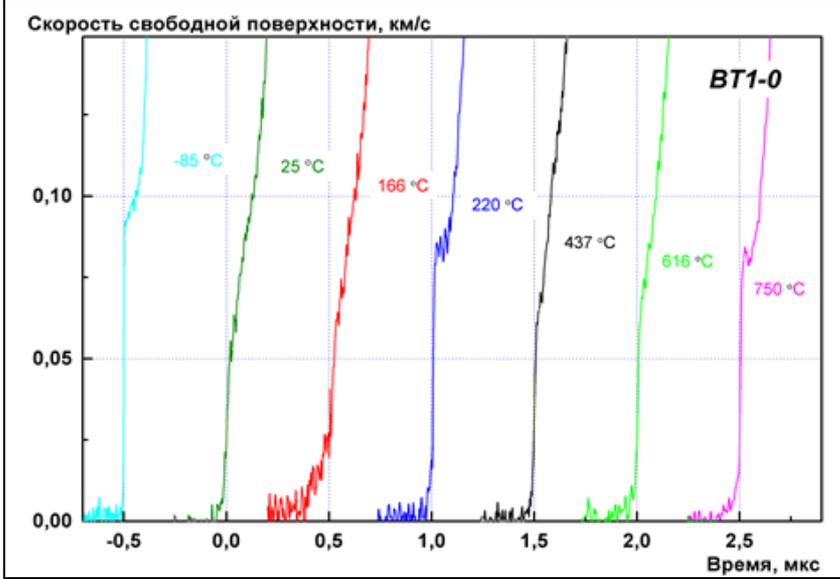
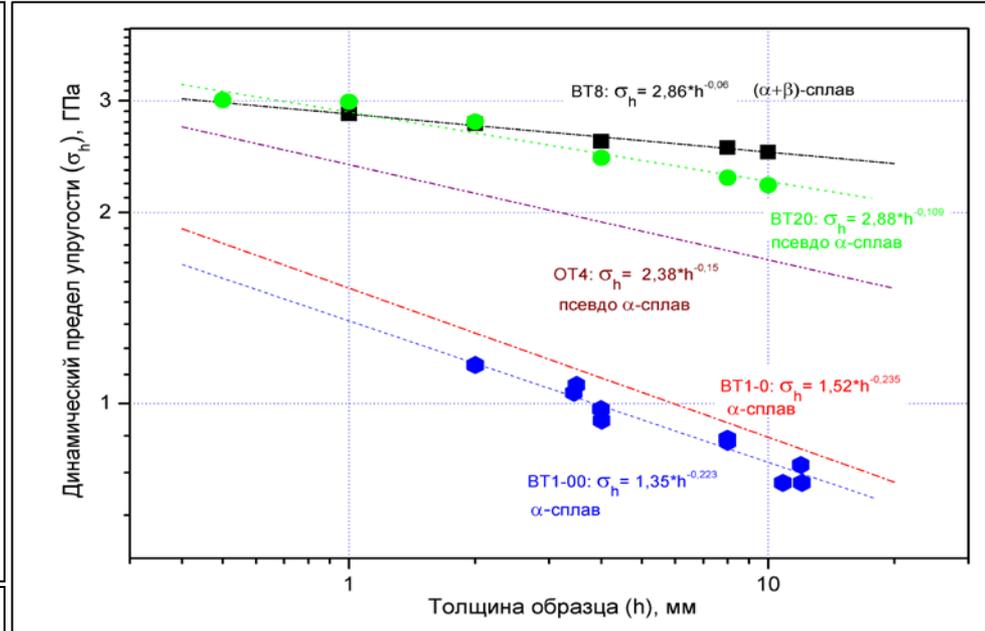
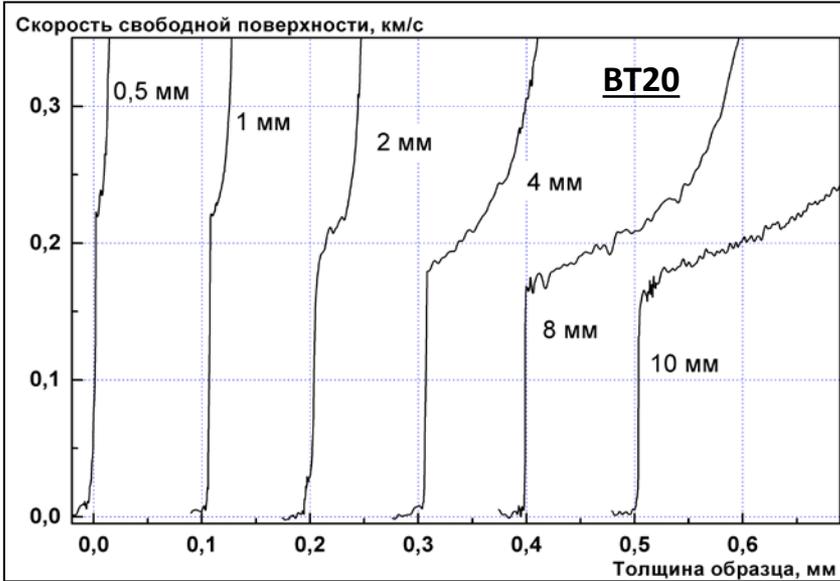
Канель Г.И.

Забабахин Е.И.

*Искажение волновых профилей при отколе в упругопластическом*

*Некоторые вопросы газодинамики взрыва.* Снежинск, 1997. *тел. ПМТФ, том 42, №2, с. 194-198, 2001.*

# Динамические свойства ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ



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

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

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

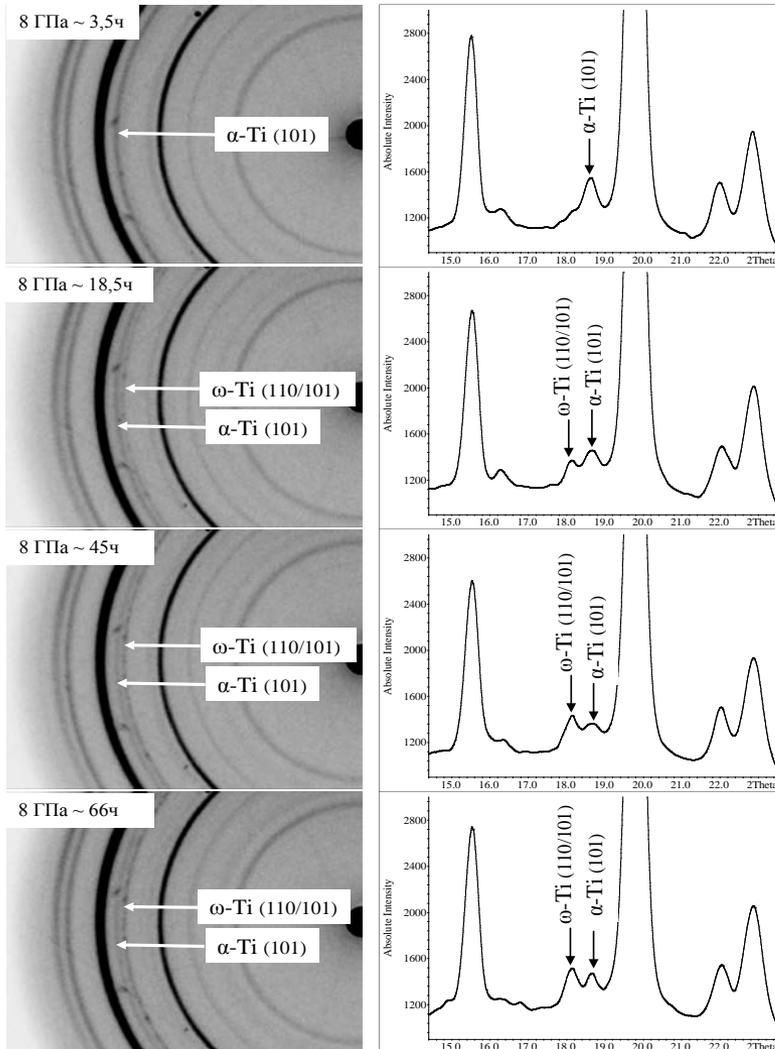
$$\left. \frac{d\sigma_x}{dh} \right|_{\text{HEL}} = -\frac{S\alpha}{h_0} \left( \frac{h}{h_0} \right)^{-(\alpha+1)}$$

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

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

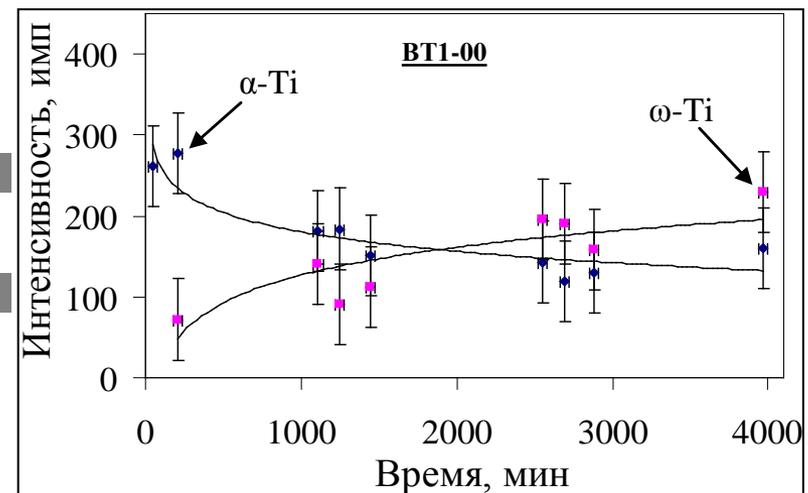
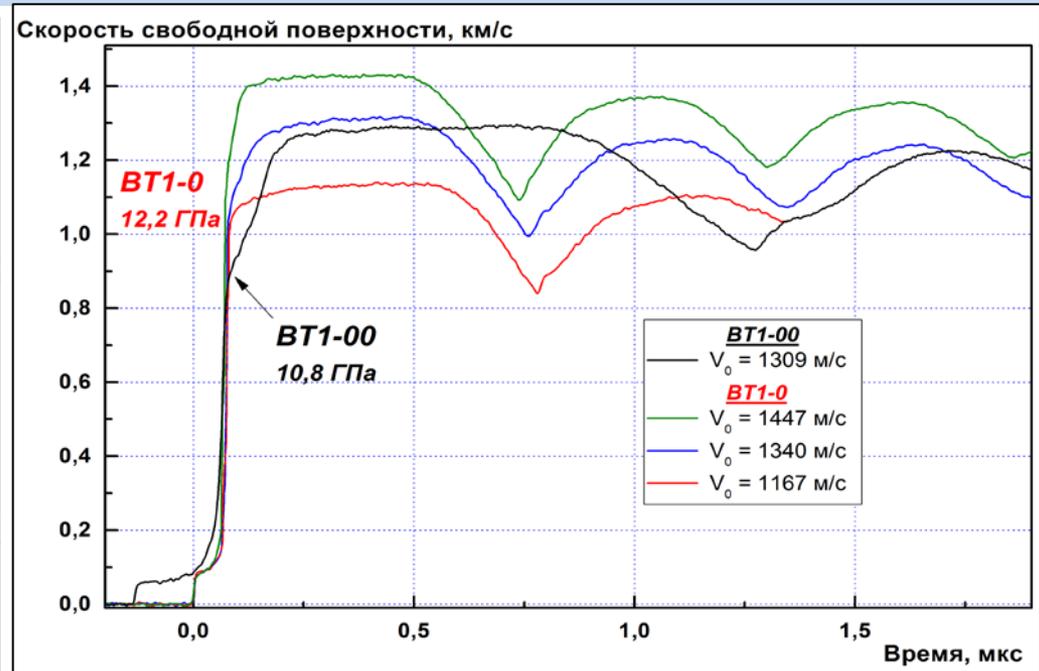
- J. R. Asay, G. R. Fowles, and Y. Gupta, J. Appl. Phys. 43, 744 (1972).
- Г.В. Гаркушин, Г.И. Канель, С.В. Разоренов. ФТТ, 2012. Т. 54, № 5.

# Фазовые превращения (статика-динамика)

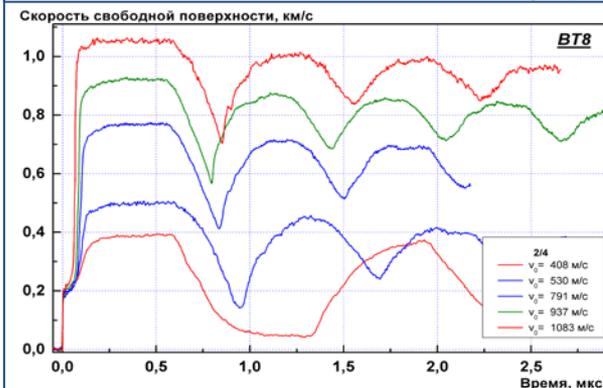
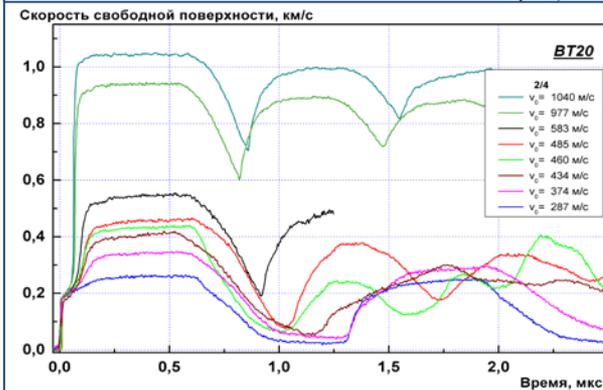
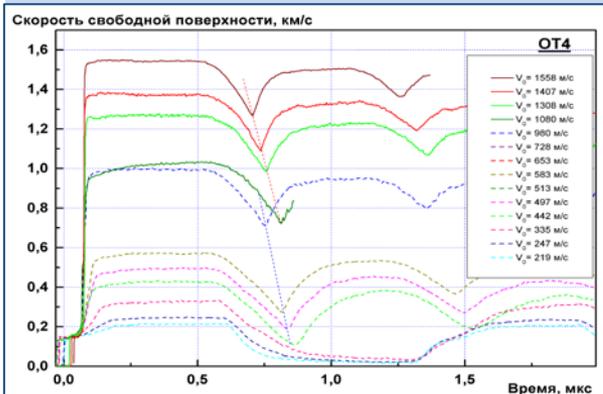


**BT1-00**

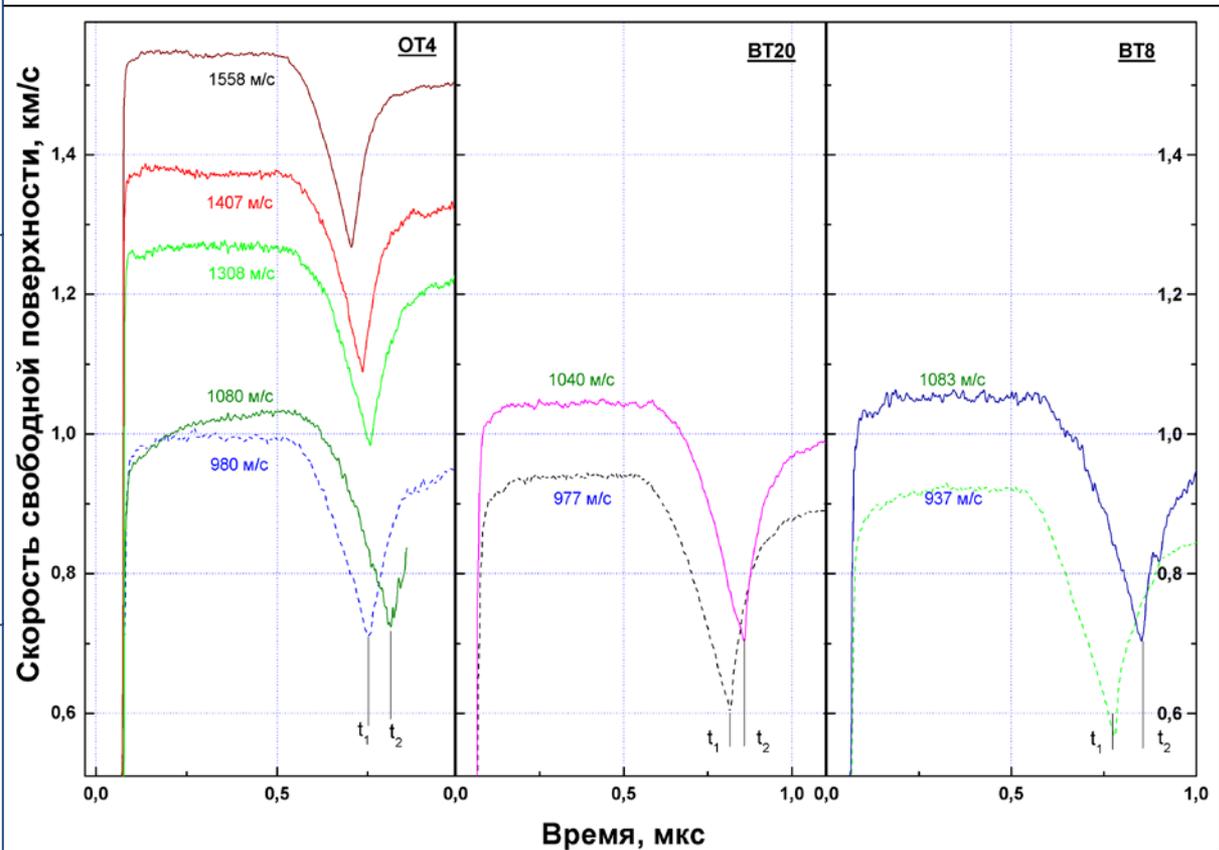
Выдержка при 8 ГПа в течение 66 часов. Слева - двухмерные дифракционные картины при их временах выдержки. Справа - преобразованные 2D→1D спектры. Стрелками обозначены самые сильные кольца/пики  $\alpha$ - и  $\omega$ -фаз титана.



# Фазовые превращения (псевдо $\alpha$ -сплавы; $\alpha+\beta$ -сплав)

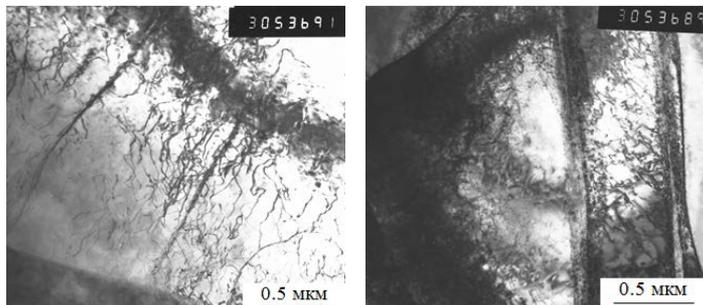


Особенности: Фазовый предвестник отсутствует.  
Изменение времени выхода откольного импульса.



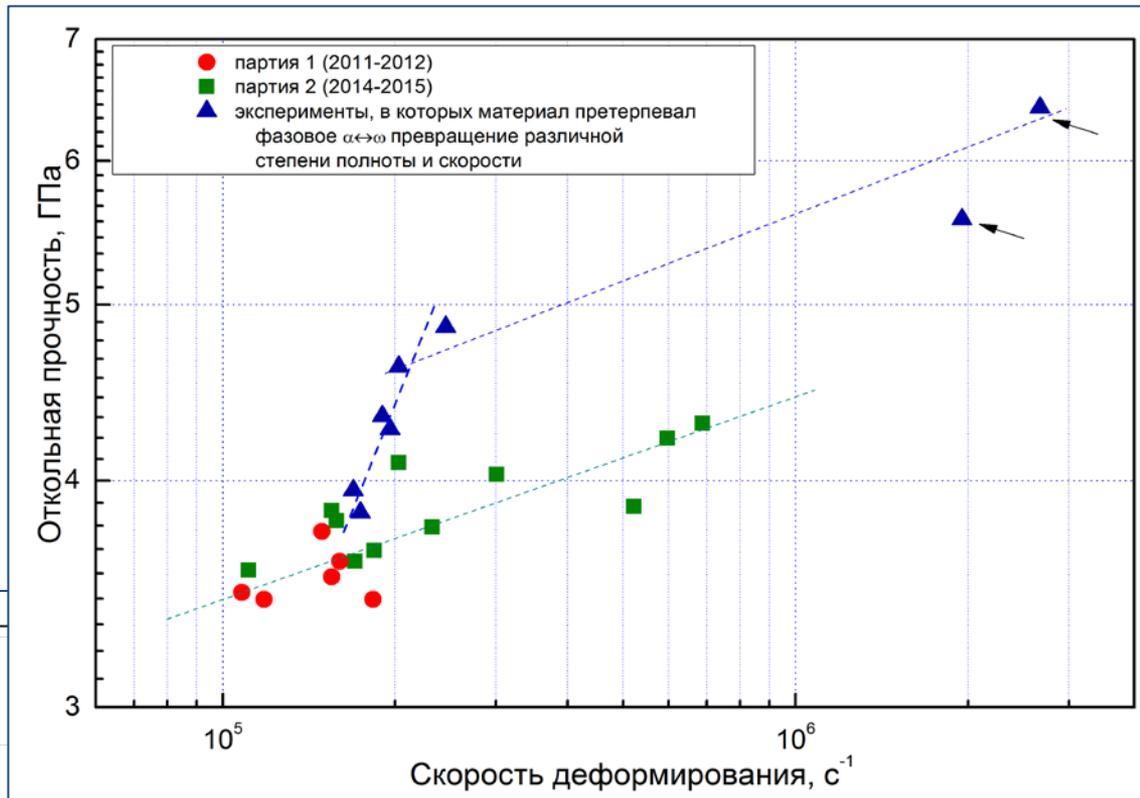
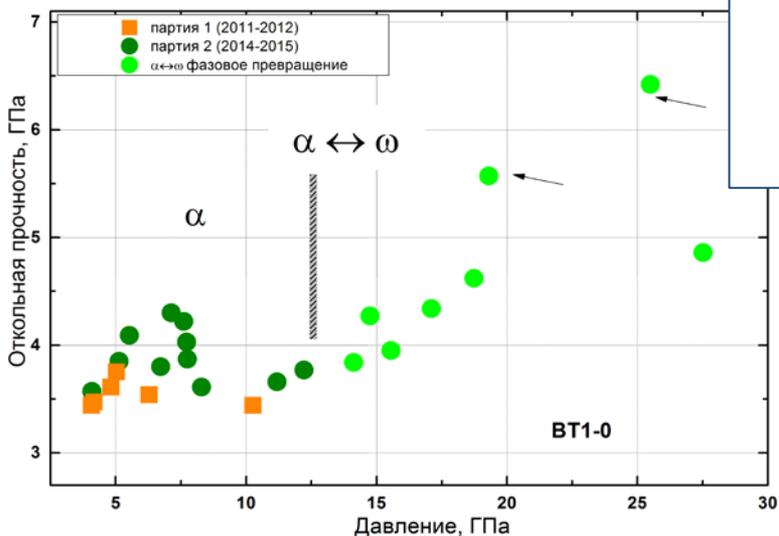
Изменение скорости звука! Фазовый переход?!

# Откольная прочность VT1-0



## Механизмы деформирования:

Высокоскоростная пластическая деформация VT1-0 осуществляется скольжением (слева) и двойникованием (справа). скольжение в основном протекает в базисной плоскости дислокациями типа  $b = a/2 \langle 1120 \rangle$

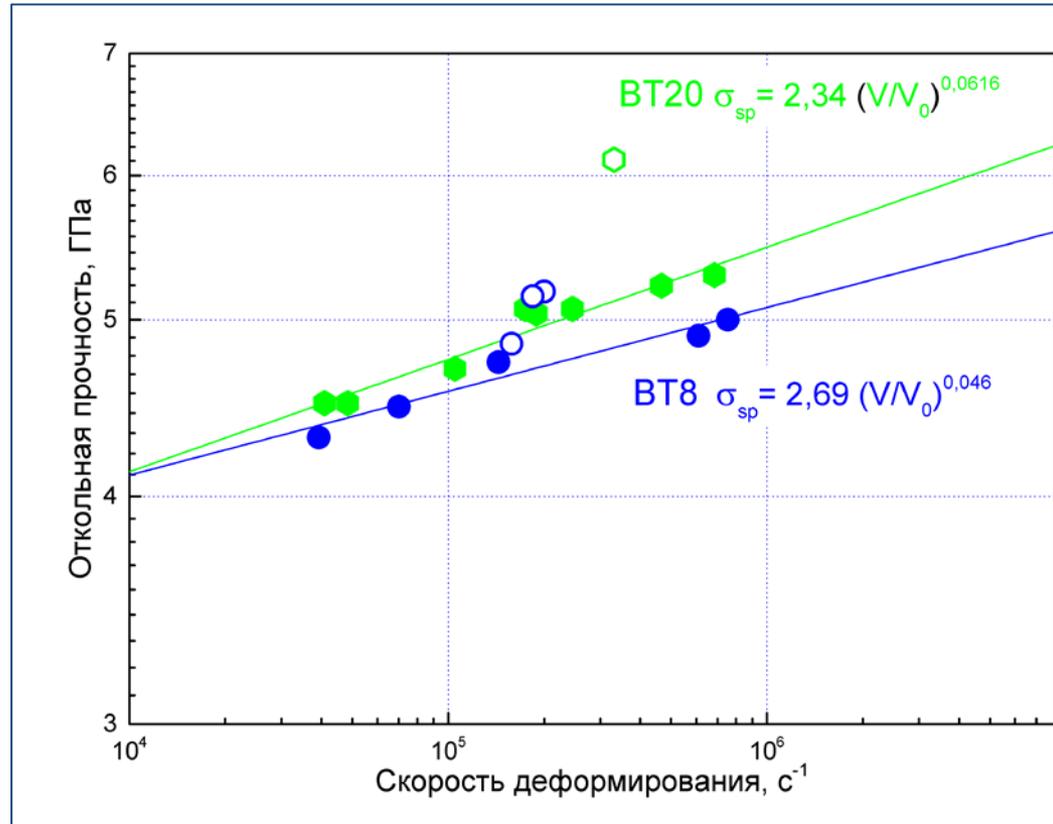


Г.И. Канель, С.В. Разоренов, Г.В. Гаркушин,  
А.В. Павленко, С.Н. Малюгина.

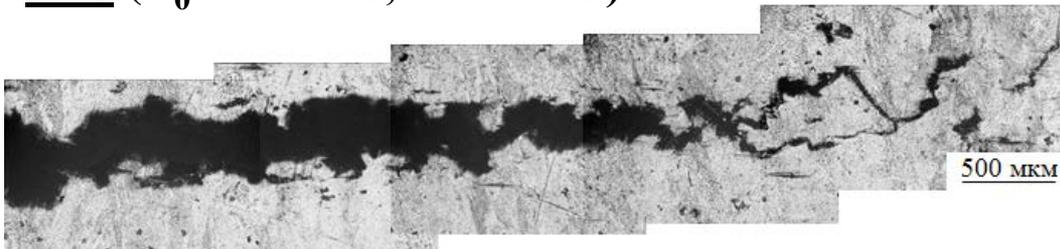
*Изменение кинетики ударно-волнового деформирования и разрушения титана VT1-0 в результате отжига.*

ФТТ, том 58, вып. 6, с. 1153-1160, 2016.

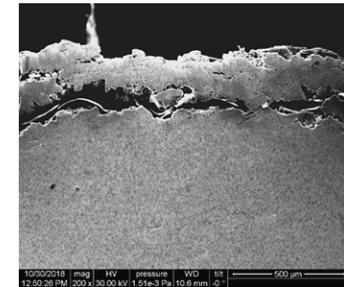
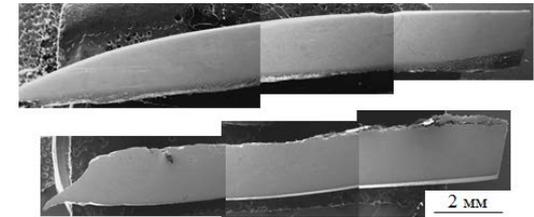
# Откольная прочность ВТ8 и ВТ20



**VT8** ( $V_0 = 530$  м/с;  $T = 25$  °C)



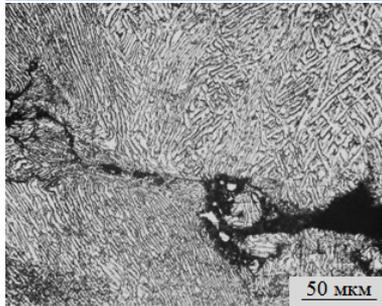
**VT20**  $V_0 = 1,1$  км/с



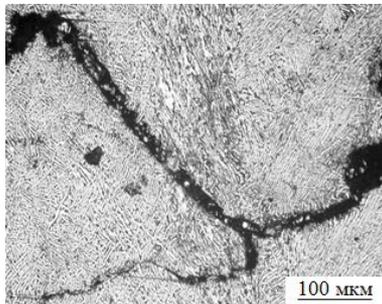
Скольжение - основной механизм пластической деформации; не наблюдается микродвойников и полос локализации деформации; Откольные трещины проходят в нескольких уровнях, преимущественно по границам первичной  $\alpha$ -фазы.

$\alpha \leftrightarrow \omega$  превращение дополнительно увеличивает откольную прочность как и в ВТ1-0

# Откольная прочность ВТ8, влияние температуры

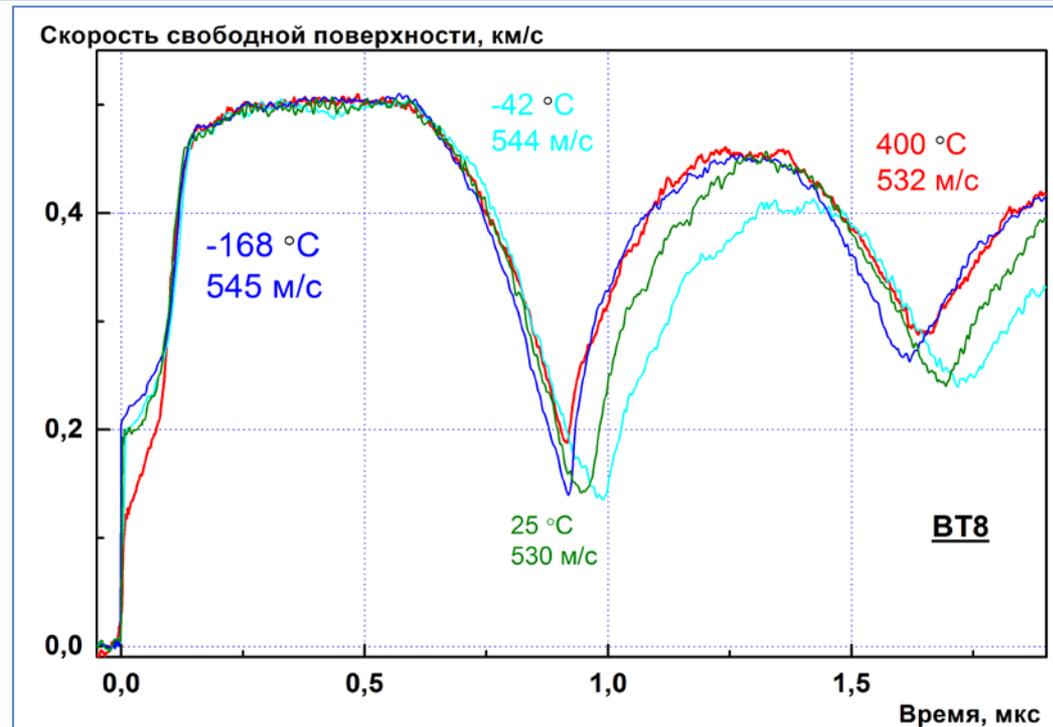
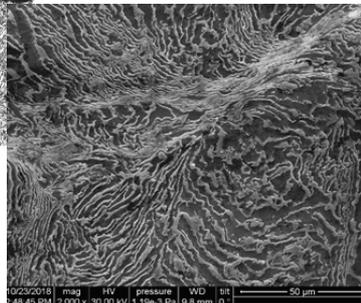
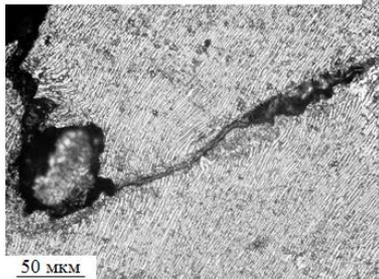
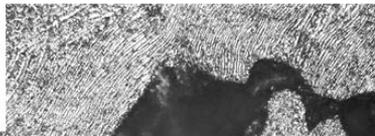


$V_0 = 537$  м/с  
 $T = -80$  °С  
Вязкое разрушение;  
немного областей  
локализации  
деформации.



$V_0 = 530$  м/с  
 $T = 25$  °С  
Вязкое разрушение;  
добавляется  
сдвиговой характер  
разрушения.

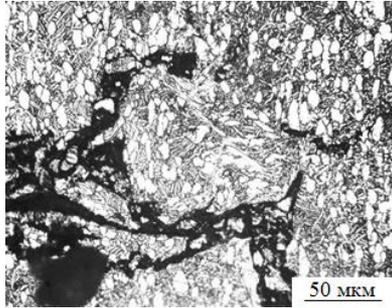
$V_0 = 532$  м/с  
 $T = 400$  °С



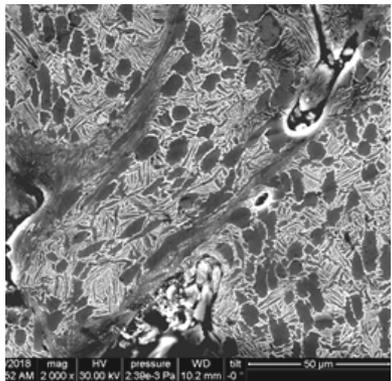
$T = 400$  °С

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

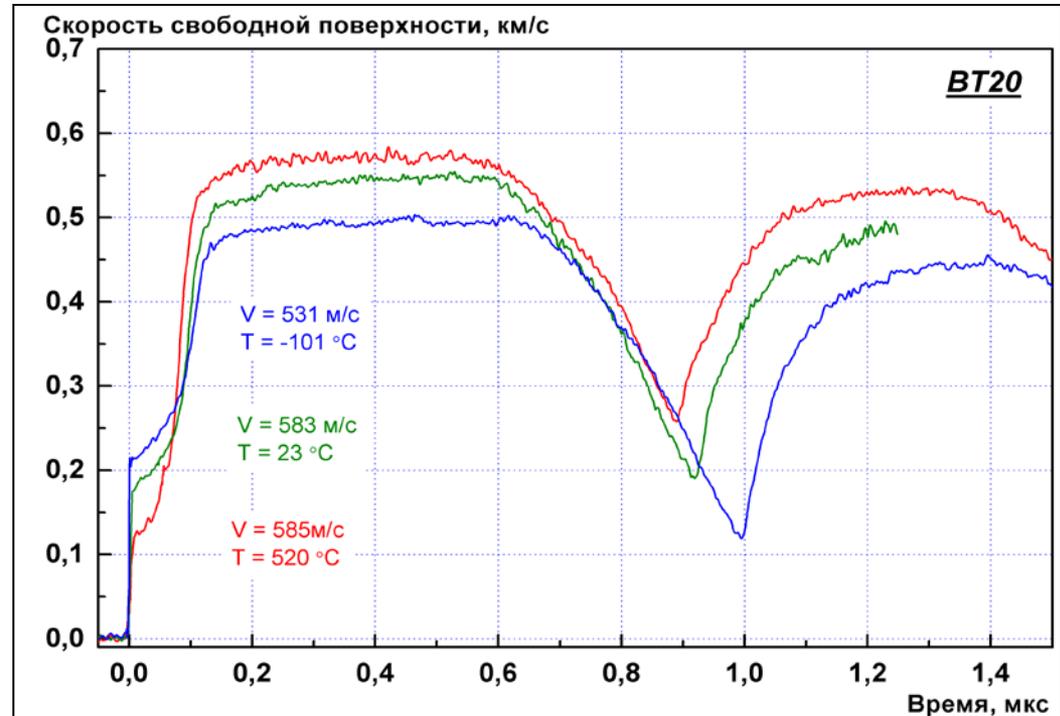
# Откольная прочность ВТ20, влияние температуры



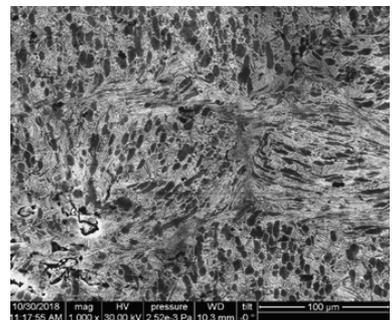
$V_0 = 531$  м/с  
 $T = -101$  °C  
Разветвленные  
откольные  
трещины – хрупкий  
характер  
разрушения;



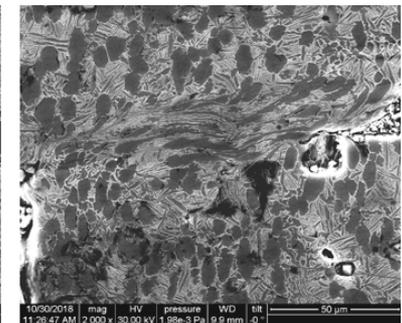
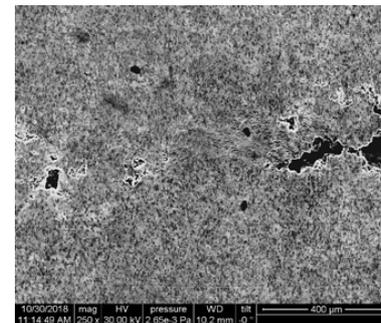
присутствуют  
многочисленные  
области  
локализации  
деформации.



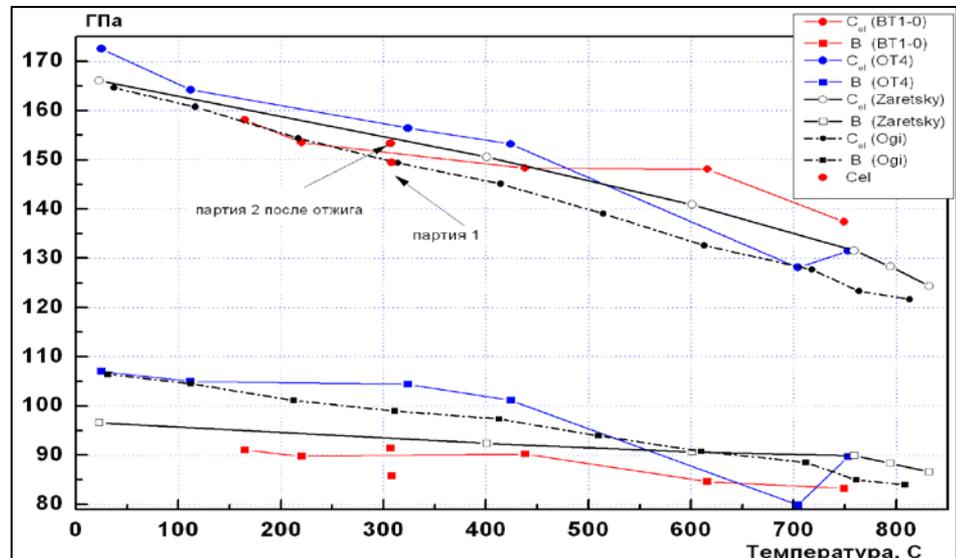
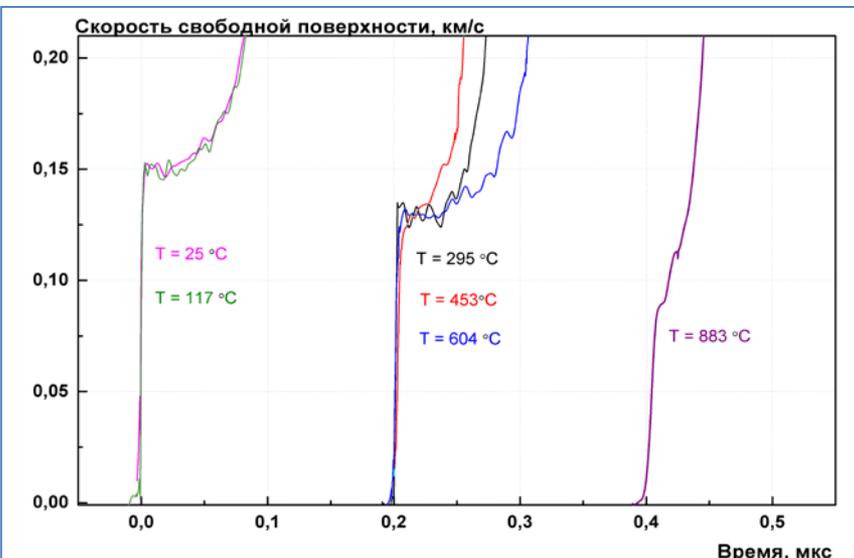
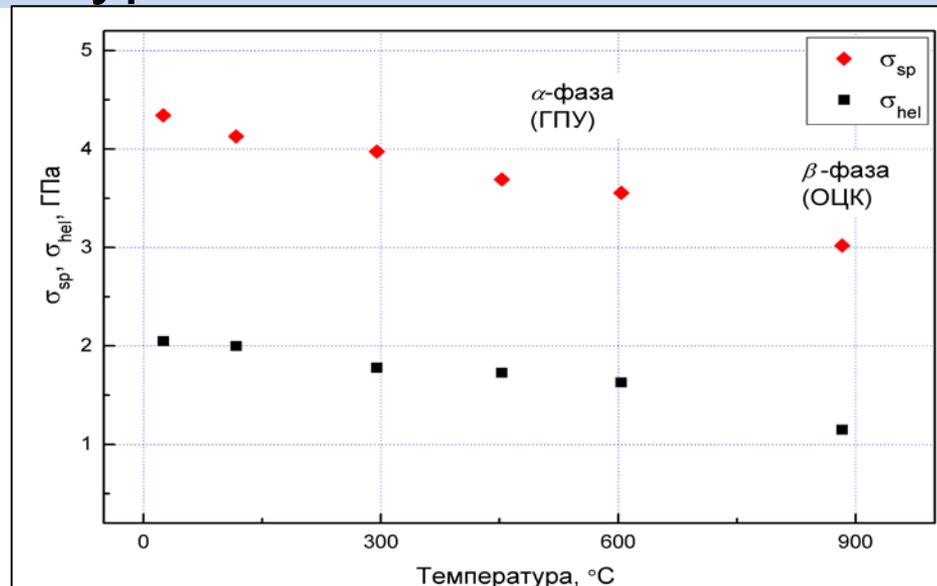
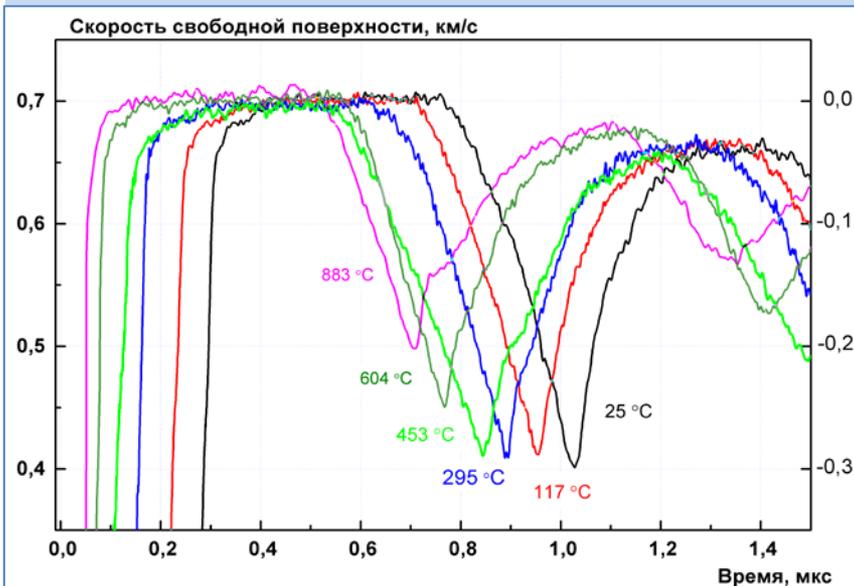
**VT20**  $V_0 = 585$  м/с;  $T = 520$  °C



Большое количество полос  
локализации деформации, в том числе  
между откольными трещинами;  
 $\alpha$ -фаза и двухфазные ( $\alpha + \beta$ ) области  
внутри полос локализации  
деформации приобретают  
анизотропную форму



# Откольная и сдвиговая прочность ОТ4, влияние температуры



# Заключение



- В широком диапазоне длительностей ударно-волнового воздействия определены величины динамических пределов упругости и текучести, подобраны параметры соотношения  $\sigma_h = S(h/h_0)^{-\alpha}$ , описывающих релаксацию упругих предвестников титановых сплавов ВТ1-00, ВТ1-0, ВТ8, ВТ20 и ОТ4.
- При исследовании закономерностей изменения откольной прочности сплава ВТ1-0 установлено сильное влияние скорости деформирования и полноты протекания фазового  $\alpha \leftrightarrow \omega$  превращения.
- В широком диапазоне скоростей деформирования определены значения закономерности изменения откольной прочности:  
для сплава ВТ1-0 -  $\sigma_{sp} = 0,93(\dot{V}N)^{0,114}$ ,  
для сплава ВТ8 -  $\sigma_{sp} = 2,69(\dot{V}N)^{0,046}$ ,  
для сплава ВТ20 -  $\sigma_{sp} = 2,34(\dot{V}N)^{0,0616}$ .
- Для сплава ОТ4 проведены измерения сдвиговой и откольной прочности, упругих модулей при повышенных до 883°C температурах.
- Исследована кинетика фазового  $\alpha \rightarrow \omega$  превращения в титановом сплаве ВТ1-00 при статическом сжатии.
- При ударно-волновом воздействии в исследованных  $\alpha$ -сплавах ВТ1-00 и ВТ1-0 полиморфное  $\alpha \rightarrow \omega$  превращение приводит к выделению фазового предвестника на фронте ударной волны.
- В псевдо  $\alpha$ -сплавах ВТ20 и ОТ4, в  $\alpha + \beta$ -сплаве ВТ8  $\alpha \leftrightarrow \omega$  превращение изменяет временные условия протекания откольного разрушения.