

Институт Проблем Химической Физики РАН

Черноголовка



УПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ СИЛЬНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ (ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ)

С.В.Разоренов

Заведующий лабораторией реологических свойств конденсированных сред при импульсных воздействиях Отдела экстремальных состояний вещества ИПХФ РАН, доктор физико-математических наук, профессор

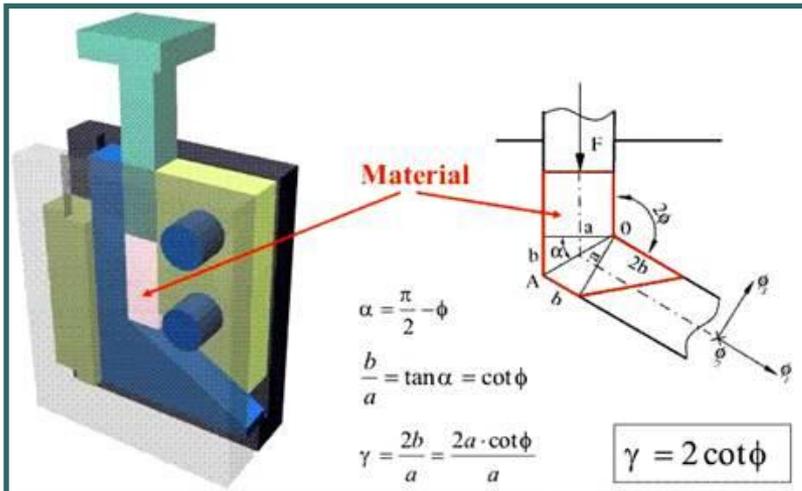
"Исследования в области физики высоких плотностей энергии лазерными и электрофизическими методами"



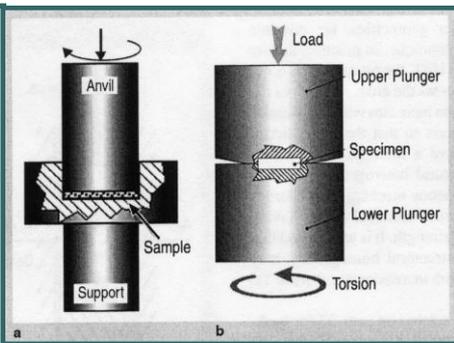
Нижний Новгород, 2 – 3 апреля 2018 г.

Методы статической интенсивной пластической деформации

Метод разно-канального углового прессования

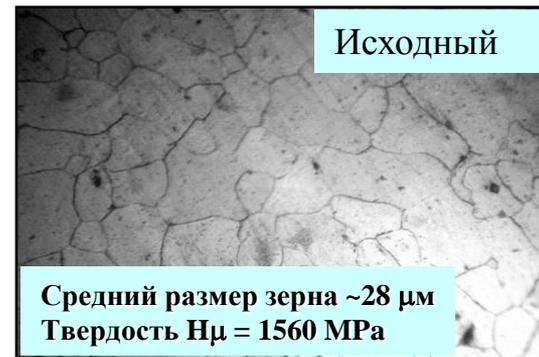


Метод кручения под давлением

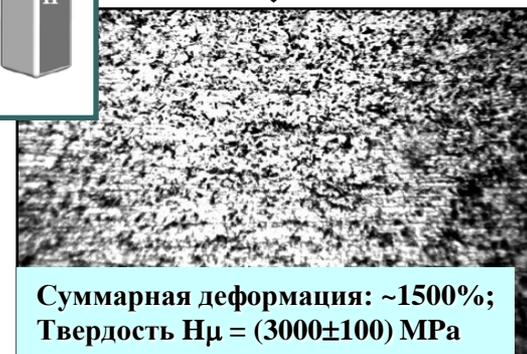


Метод всестороннего прессования

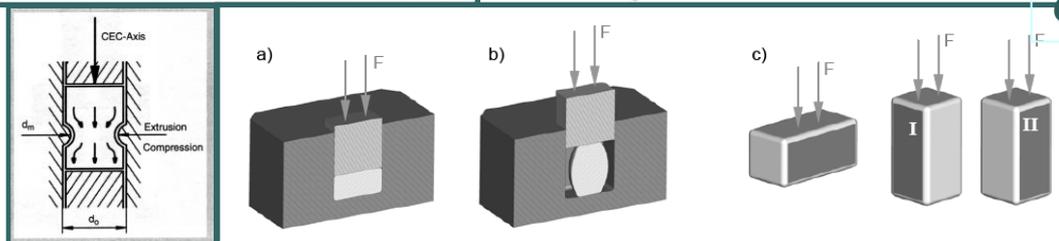
Пример структуры Армко-железа после ИПД



Объемная (3D) ковка



Метод «песочных часов»

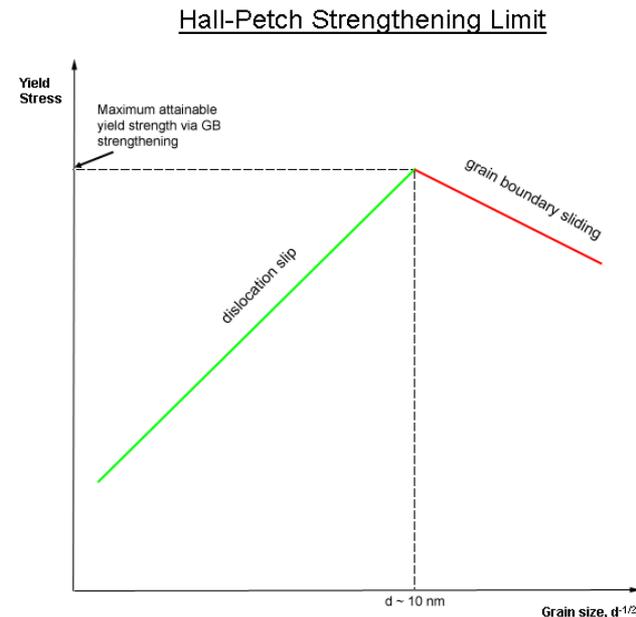
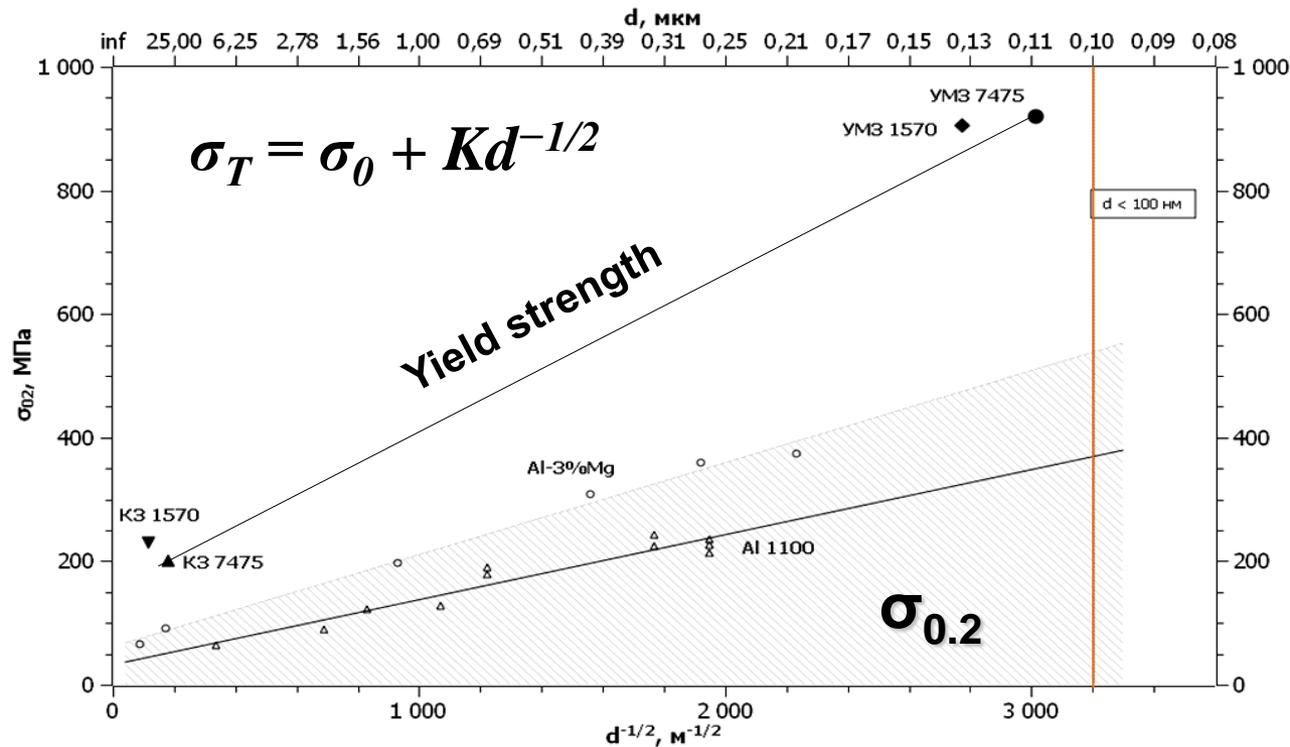


Целью методов ИПД является создание объемных субмикроструктурных материалов с размером зерен $d_0 < 1$ мкм.

Преимущества: высокая однородность внутренней структуры металлов.

Зависимость Холла-Петча для алюминиевых сплавов*

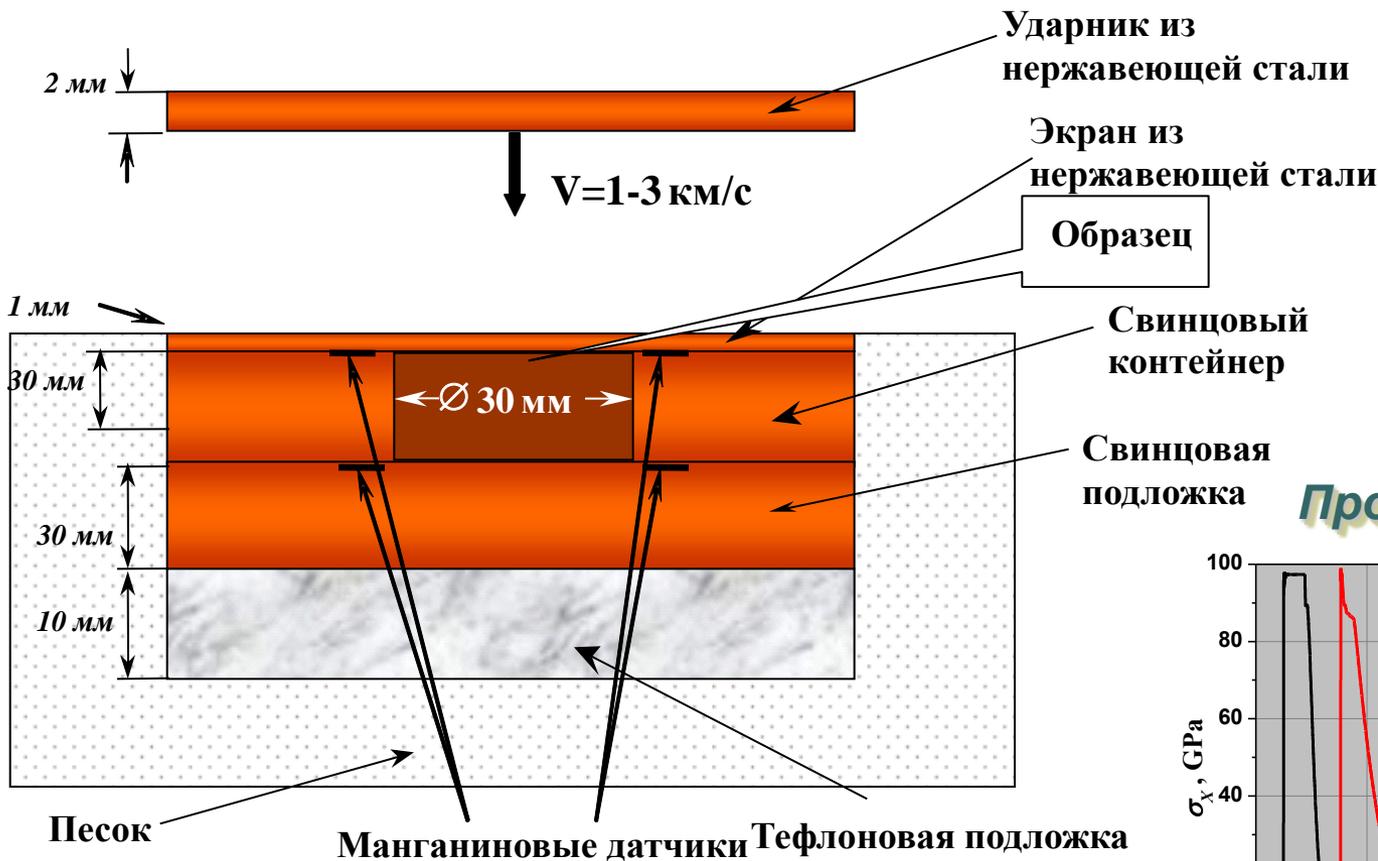
Статические измерения



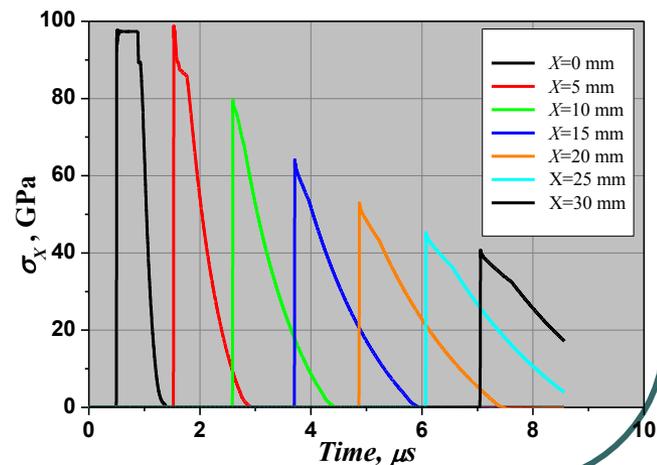
Предел текучести ультрамелкозернистых сплавов много больше

*N.Enikeev, et.al., *Reports of Russian Academy of Sciences, Physics, 2010*

Метод сохранения ударно-сжатых образцов



Профили давления



Специфический характер ударно-волновой деформации твердых тел

- ⇒ Небольшая деформация при ударном сжатии (0.01 – 0.2%)
- ⇒ Общие деформации при экстремальном сжатии (10÷70%);
- ⇒ Экстремально высокие скорости деформирования при сжатии ($>10^{10}\text{с}^{-1}$);
- ⇒ Сильный нагрев вещества в ударной волне, и высокая остаточная температура вещества после разгрузки (до $T_{\text{плавления}}$);

Образование дефектов в материалах при ударно-волновой деформации

- ⇒ Дислокационная структура, образованная при ударном сжатии, зависит от параметров ударной волны и материалов;
- ⇒ Большая концентрация точечных дефектов;
- ⇒ Двойникование - основной механизм деформирования при ударно-волновом нагружении;
- ⇒ Фазовые превращения при ударно-волновом нагружении;
Например: мартенситные превращения – механизм деформации при сдвиговых напряжениях, конкурирующий со скольжением и двойникованием.

Полный профиль ударной волны

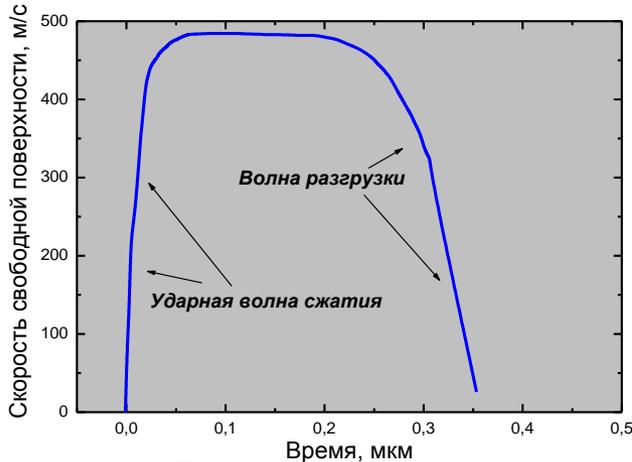
Основа метода: эволюция ударной волны при ее распространении по веществу отражает практически все процессы и изменения, имеющие место внутри вещества.....



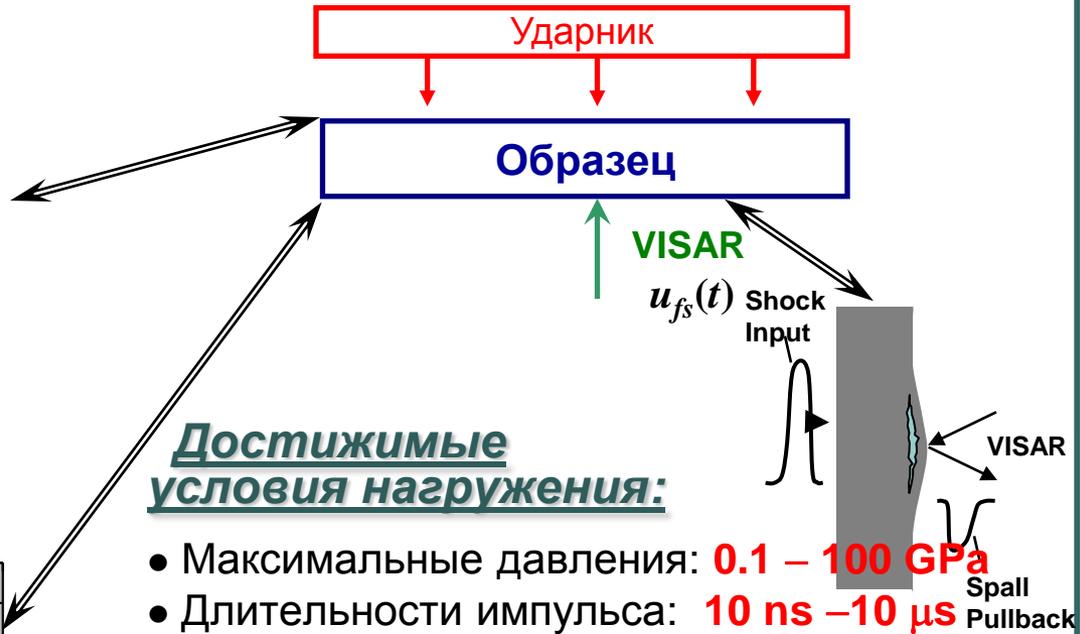
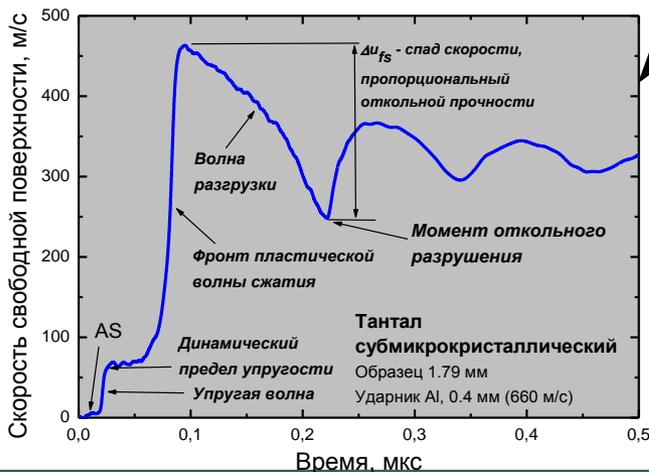
✓ Использование техники ударных волн позволяет изучать свойства материалов при длительности воздействия $10^4 - 10^8$ с в условиях одномерной деформации при напряженном состоянии, близком к всестороннему сжатию или растяжению.

Проявление свойств материала на профилях скорости свободной поверхности

Профиль входящей волны



Профиль скорости свободной поверхности



Достижимые условия нагружения:

- Максимальные давления: **0.1 – 100 GPa**
- Длительности импульса: **10 ns – 10 μs**

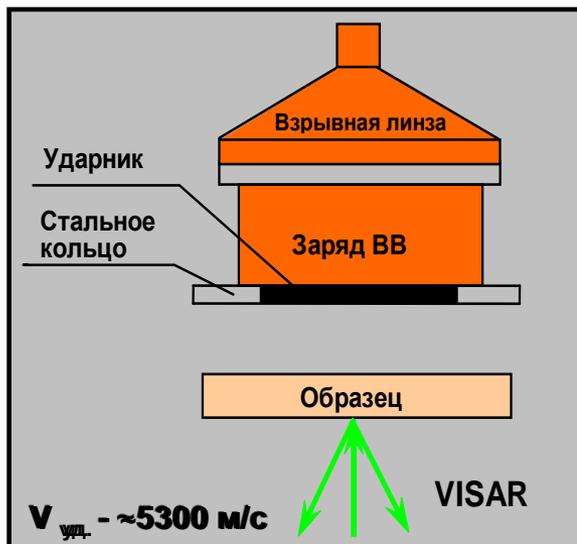
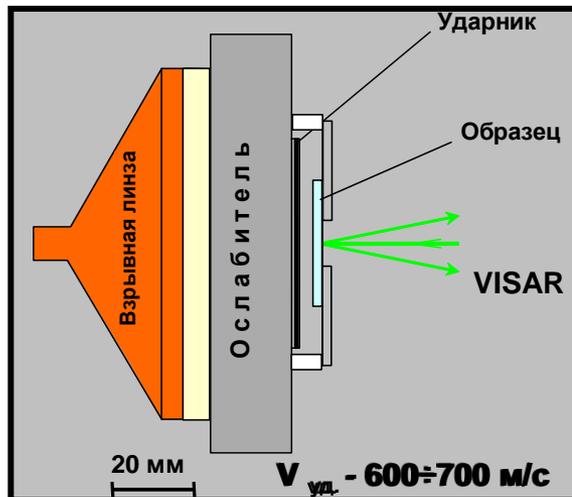
Искомые параметры:

- **Динамический предел упругости :**

$$HEL = \rho_0 c_l u_{fs}^{HEL} / 2$$
- **Предел текучести:** $\gamma = HEL (1-2\nu) / (1-\nu)$
- **Откольная прочность:**

$$\sigma_{sp} = \rho_0 c_b (\Delta u_{fs} + \delta) / 2$$

ВЗРЫВНОЕ МЕТАНИЕ ПЛАСТИН



Взрывные ускорители:

- ◆ Толщина ударников: 50 μ – 10 мм
- ◆ Скорость метания: 400 м/с – 5.3 км/с



Газовая пушка ПП50:

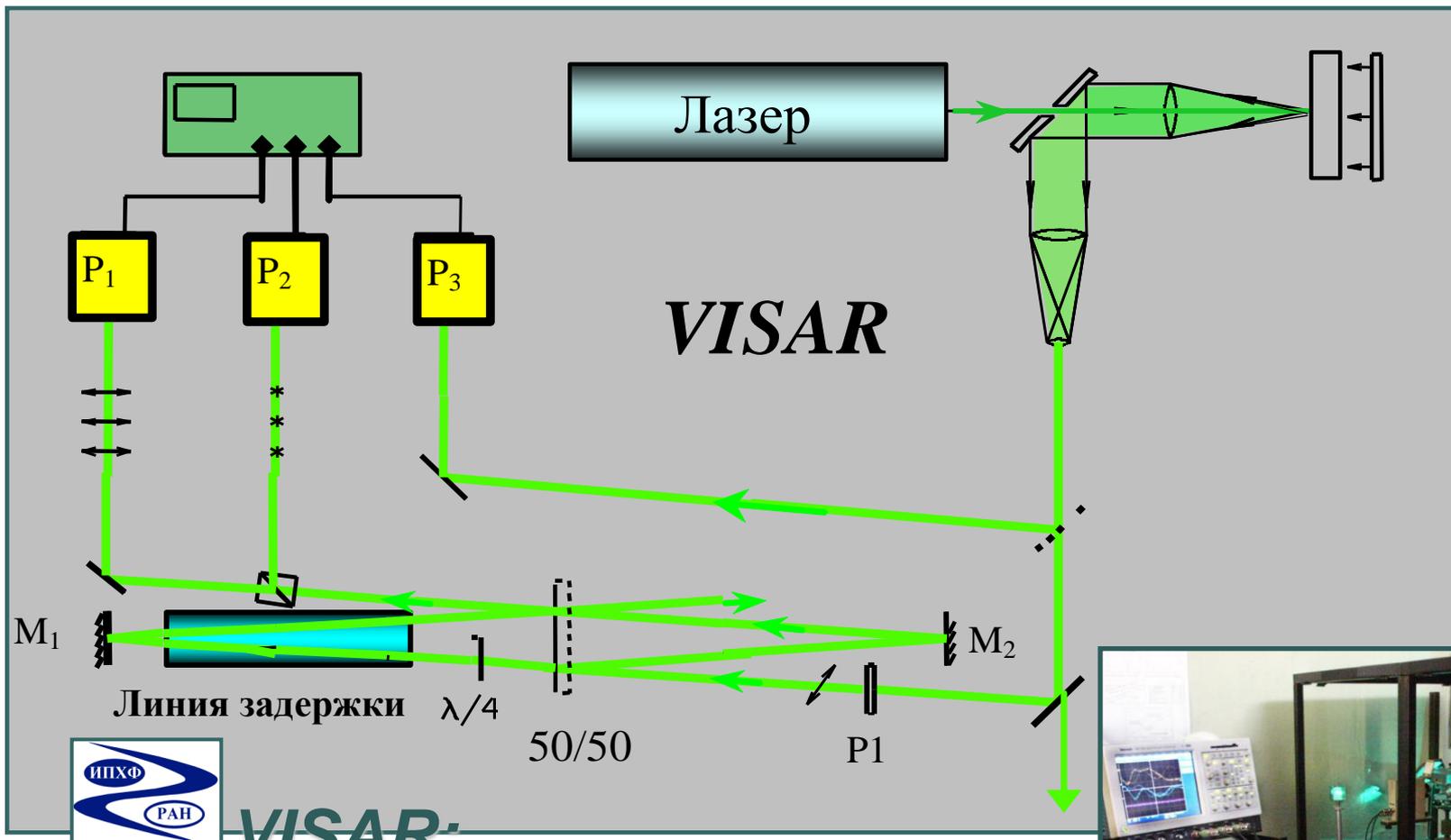
- ◆ Скорости метания 0 – 900 м/с (гелий)



Параметры экспериментов:

- ◆ Максимальное давление: 1 – >100 ГПа;
- ◆ Скорости деформирования: $\sim 10^4 - 10^7 \text{ с}^{-1}$

Регистрация волновых профилей лазерным интерферометром



- ◆ *Временное разрешение: > 1 нс*
- ◆ *Пространственное разрешение: ~ 0.1 мм²*
- ◆ *Точность измерений: > 5 м/с*



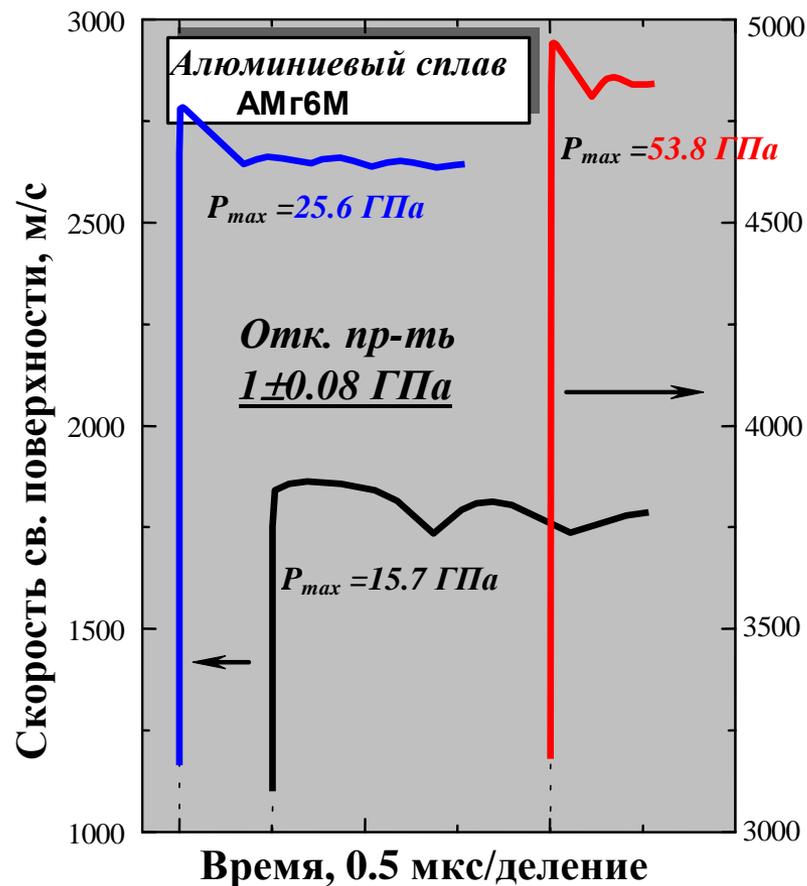
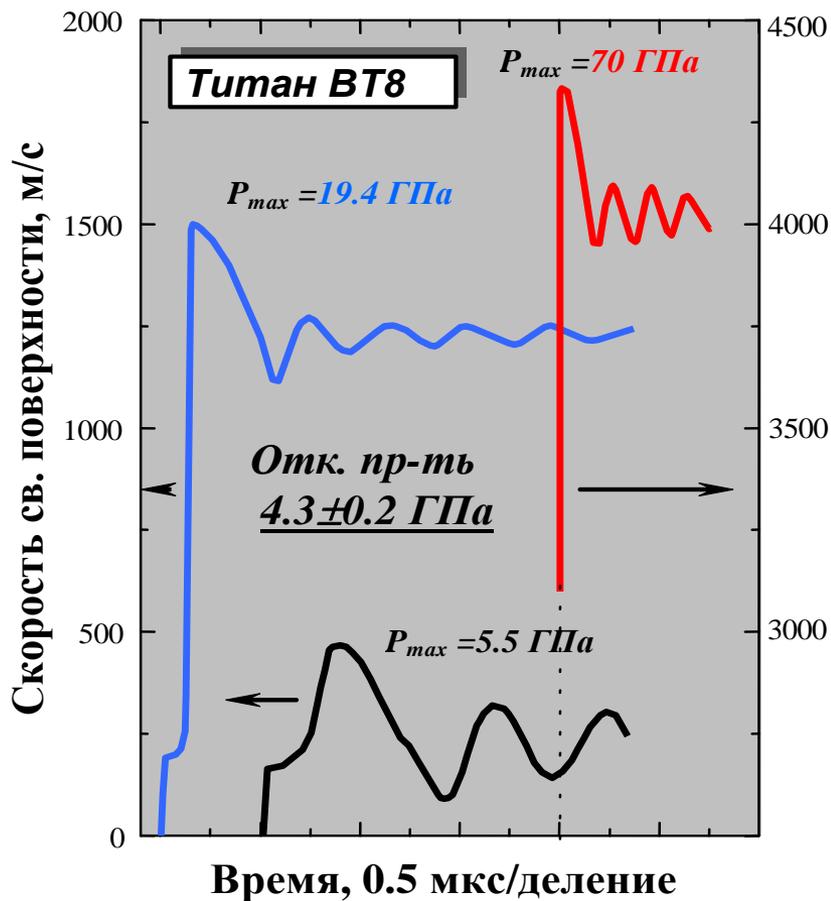
Влияние интенсивности ударного сжатия на динамическую прочность металлов

ПОЛУЧЕННЫЕ РАНЕЕ и НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Объекты исследования:

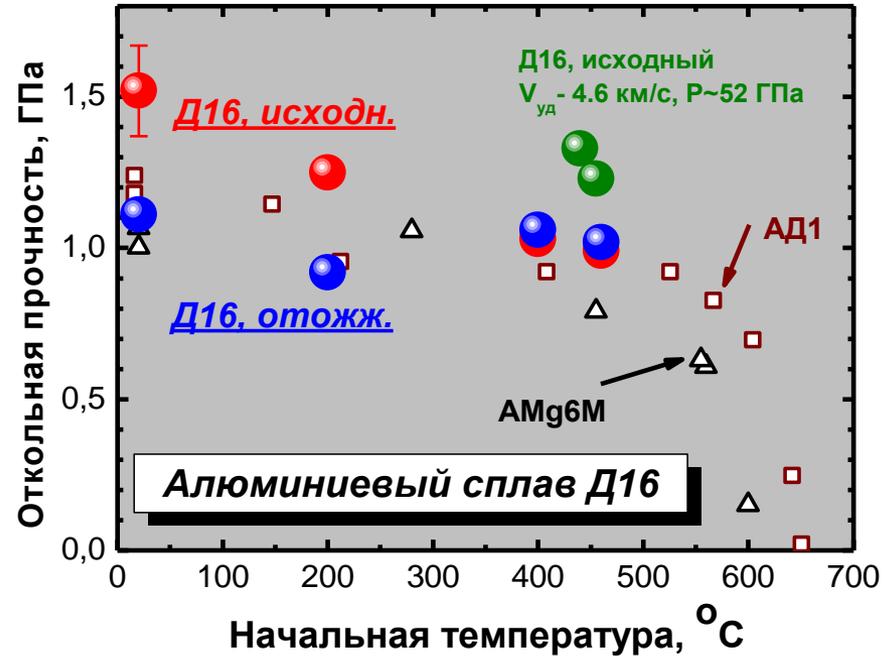
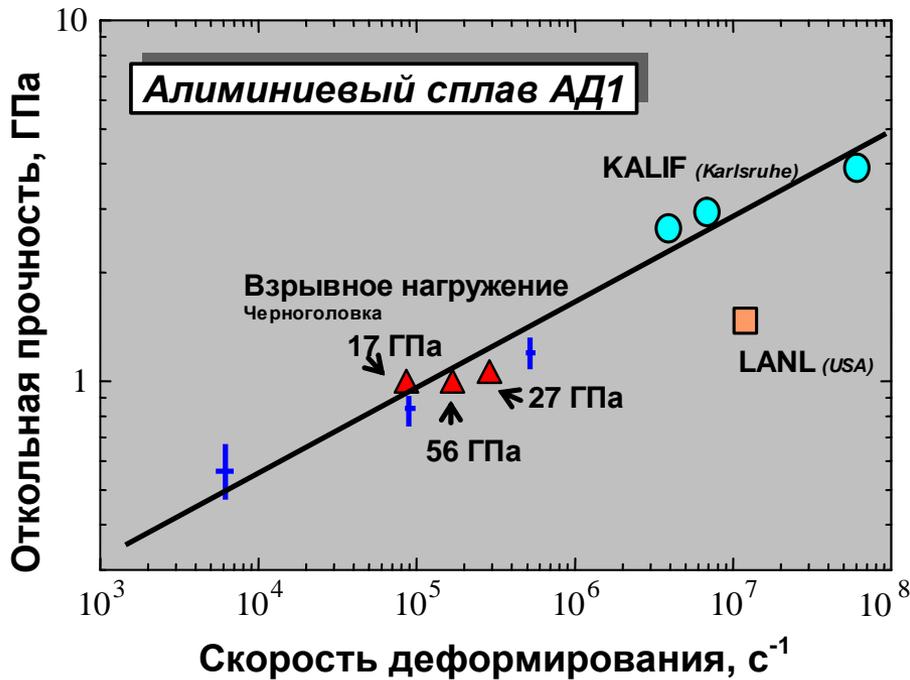
Металлы – никель, медь, латунь, железо Армко, никелид титана, нержавеющая сталь в состоянии поставки, после ИПД, после предварительного ударного сжатия;

Влияние амплитуды ударного сжатия на динамическую прочность металлов*



*Разоренов С.В., Канель Г.И. и др. (1984 – 1989)

Влияние интенсивности ударного сжатия на динамическую прочность алюминиевых сплавов*

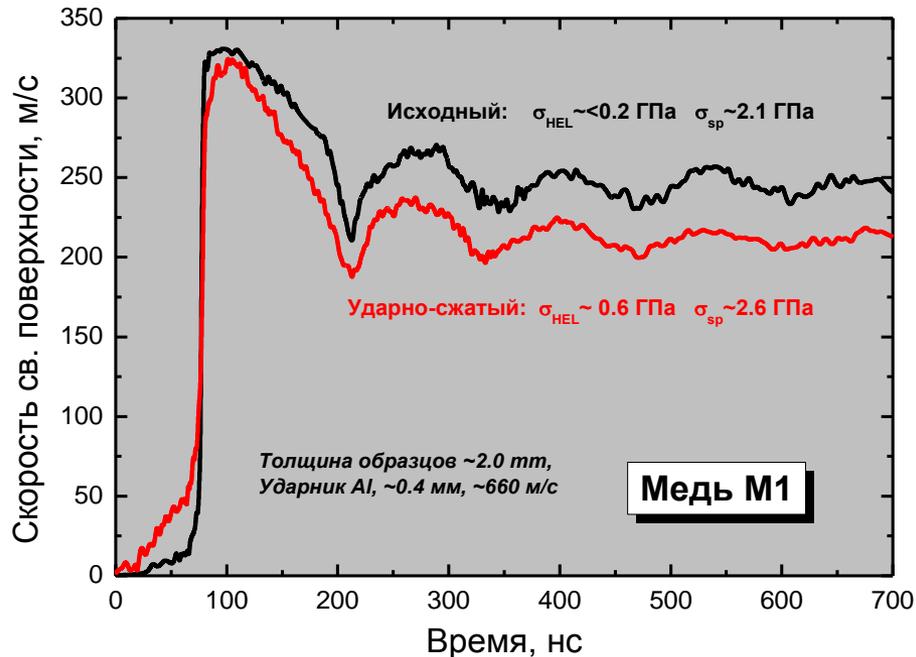


*Разоренов С.В., Канель Г.И., и др. (1984 – 1989) *Разоренов С.В., Канель Г.И., и др. (1996 – 2009)

Вывод по этим результатам: сильное ударное сжатие металлов не влияет на динамическую прочность, имеющиеся грубые дефекты структуры определяют динамическую прочность материала

Влияние интенсивности ударного сжатия на динамическую прочность меди*

Результаты измерений откольной прочности в ударно-сжатой меди М1



*Разоренов С.В., Гаркушин Г.В., Игнатова О.Н. и др. (2007 – 2009)

- ✓ Предварительное сжатие меди М1 ударной волной интенсивностью ~ 30 ГПа привело к достаточно сильному росту ее откольной прочности;

Влияние предварительного ударного сжатия на твердость металлов*

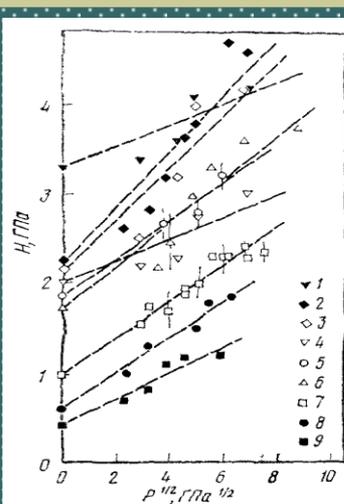
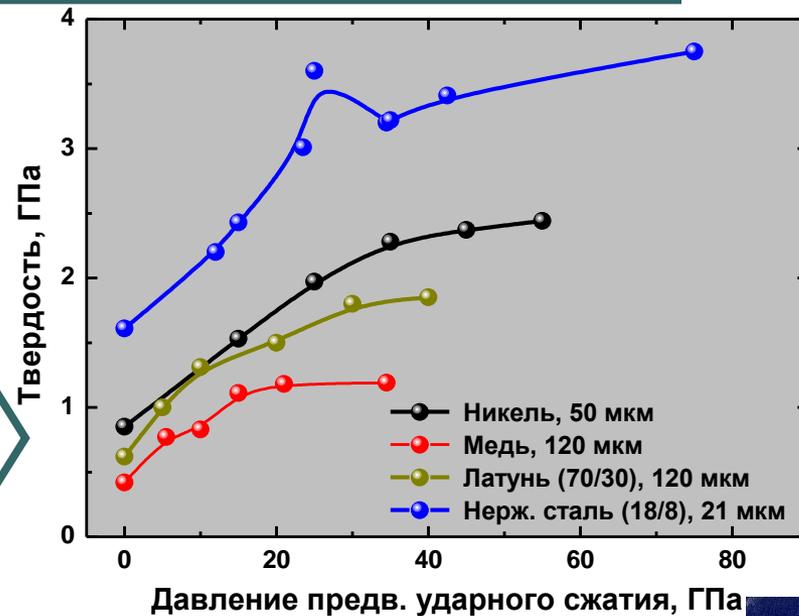


Рис. 8. Упрочнение различных металлов при импульсном нагружении (продолжительность импульса 2 мкс):
 1 – ThO_2 – NiCr; 2 – инконель 600;
 3 – нихром; 4 – ThO_2 – Ni; 5 – Mo
 ($D = 67$ мкм); 6 – нержавеющая сталь 18/8; 7 – никель; 8 – латунь 70/30; 9 – медь



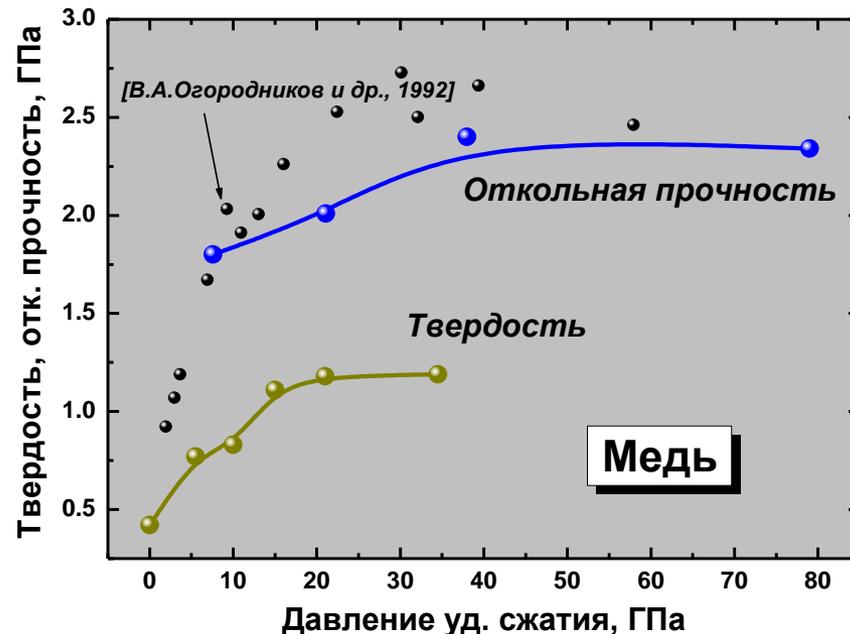
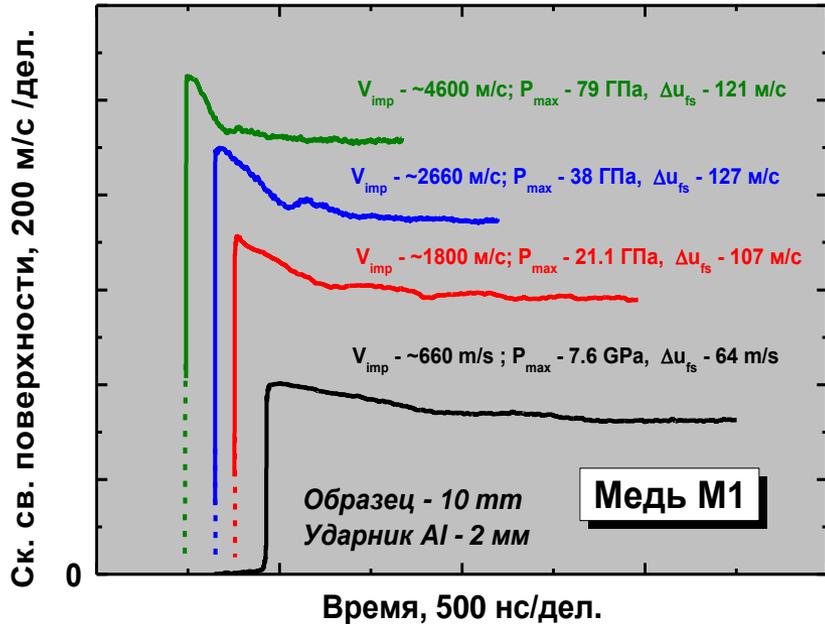
**Нет титановых и
алюминиевых сплавов**

*M.A.Meyers, L.E.Murr (1984)

Ударные волны
и явления
высокоскоростной
деформации
металлов

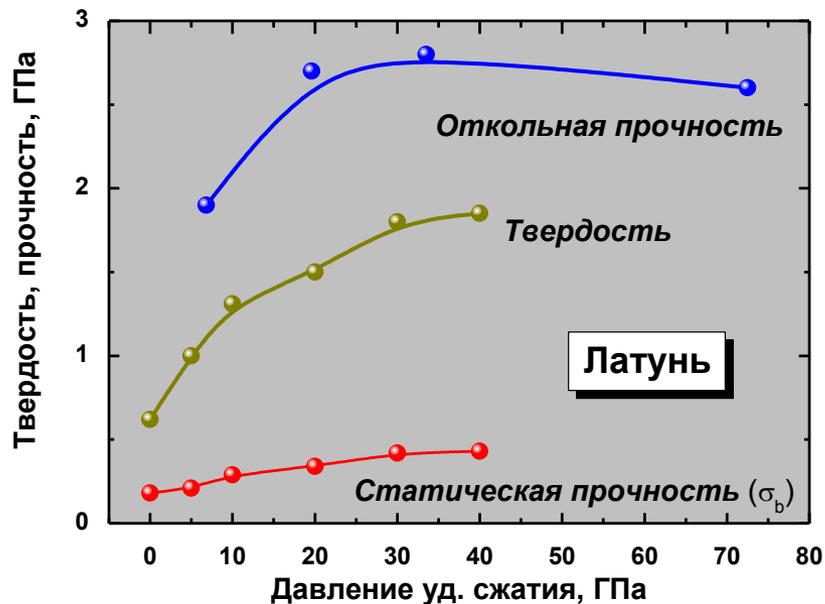


Влияние амплитуды ударного сжатия на динамическую прочность меди



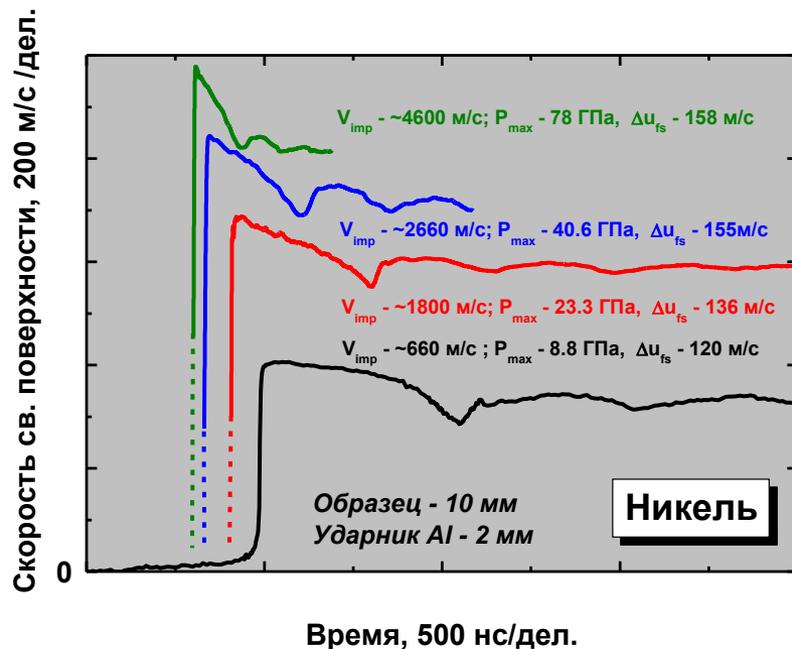
- ✓ Откольная прочность меди растет с ростом интенсивности ударного сжатия до ~35 - 40 ГПа как и твердость предварительно нагруженных образцов;
- ✓ Слабое уменьшение прочности при максимальном давлении в ударной волне связано ударным нагревом вещества;

Влияние амплитуды ударного сжатия на динамическую прочность латуни



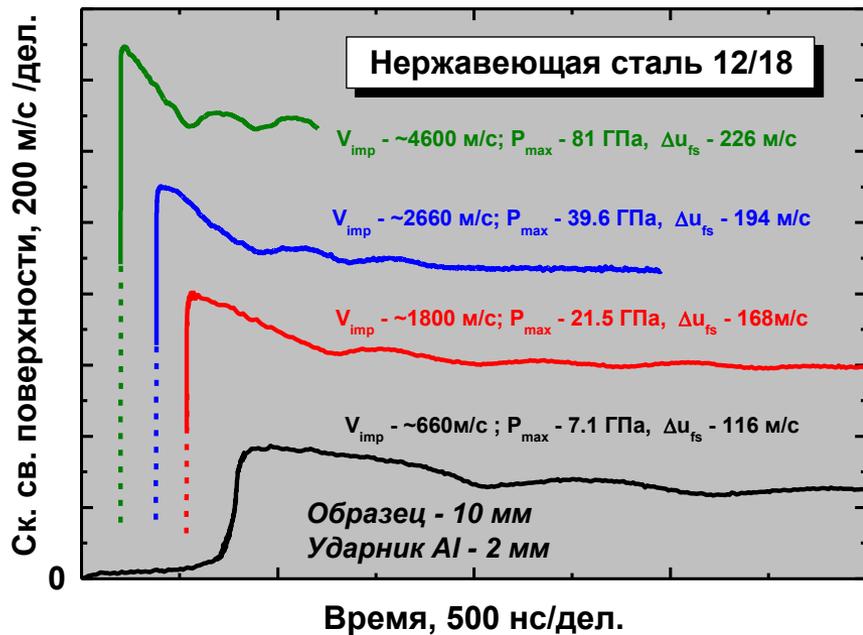
- ✓ Откольная прочность латуни растет с ростом давления ударного сжатия до ~35 ГПа, как твердость и статическая прочность предварительно нагруженных образцов;
- ✓ Слабое уменьшение динамической прочности при дальнейшем росте амплитуды ударной волны связано с ударным нагревом металла;

Влияние амплитуды ударного сжатия на динамическую прочность никеля



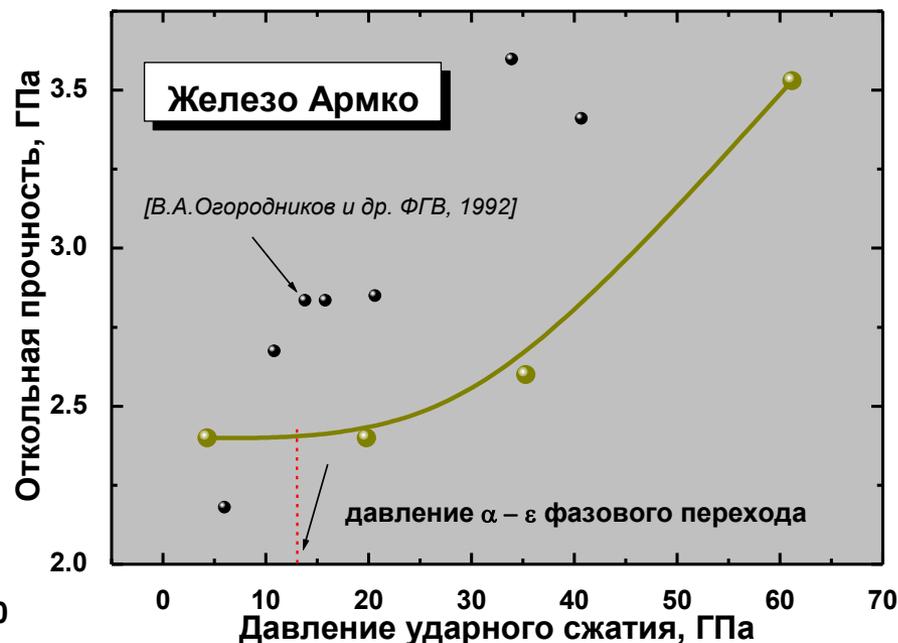
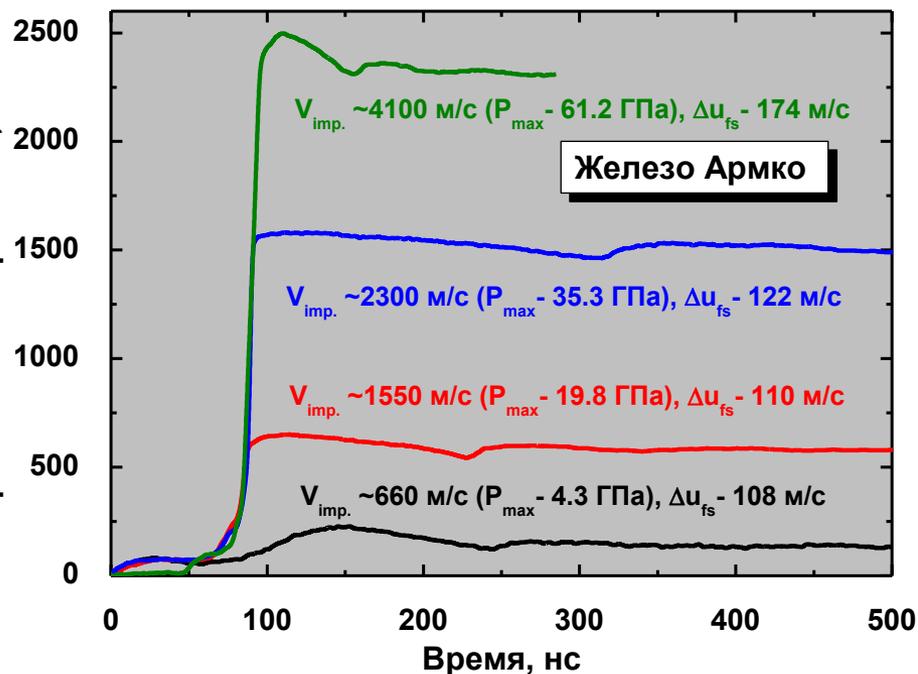
- ✓ Откольная прочность никеля растет с ростом давления ударного сжатия до ~40 ГПа, так же как и статическая прочность и твердость сохраненных после ударного сжатия образцов;
- ✓ Рост откольной прочности с давлением имеет пороговый характер, как для медных и латунных образцов;

Влияние амплитуды ударного сжатия на динамическую прочность нержавеющей стали



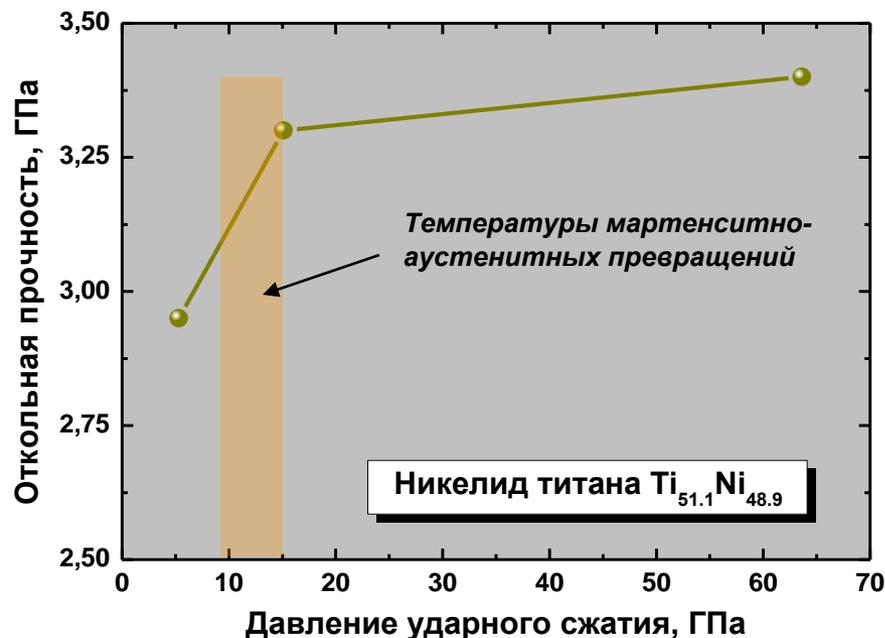
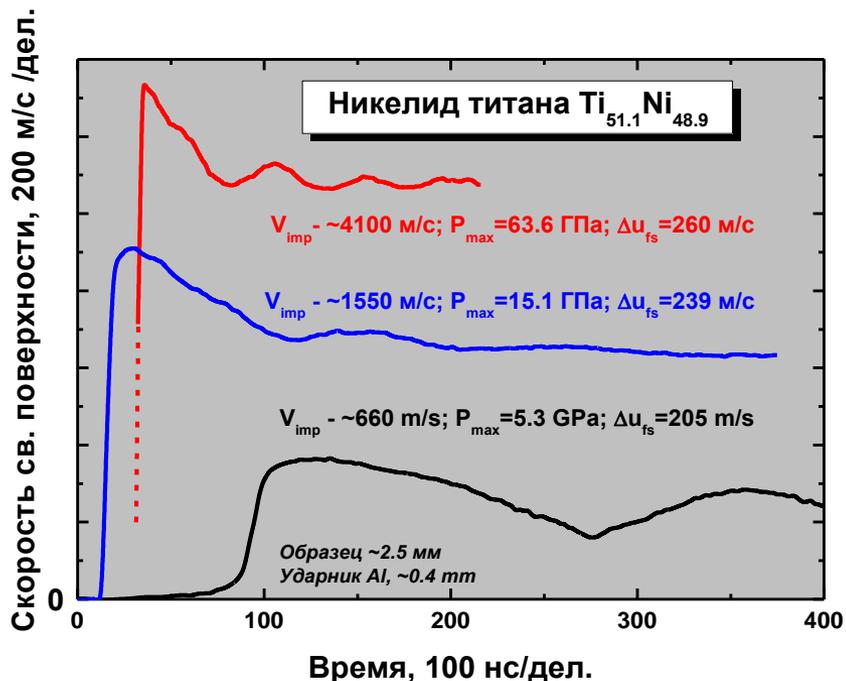
- ✓ Откольная прочность нержавеющей стали растет с ростом давления в диапазоне до 80 ГПа, так же как статическая прочность и твердость сохраненных после ударного сжатия образцов;

Влияние амплитуды ударного сжатия на динамическую прочность железа Армко



✓ Слабый рост откольной прочности железа Армко в диапазоне давлений ударного сжатия 10 – 30 ГПа может быть связан с перестройкой его кристаллической структуры вследствие $\alpha \leftrightarrow \epsilon$ фазового перехода в ударной волне при 13 ГПа;

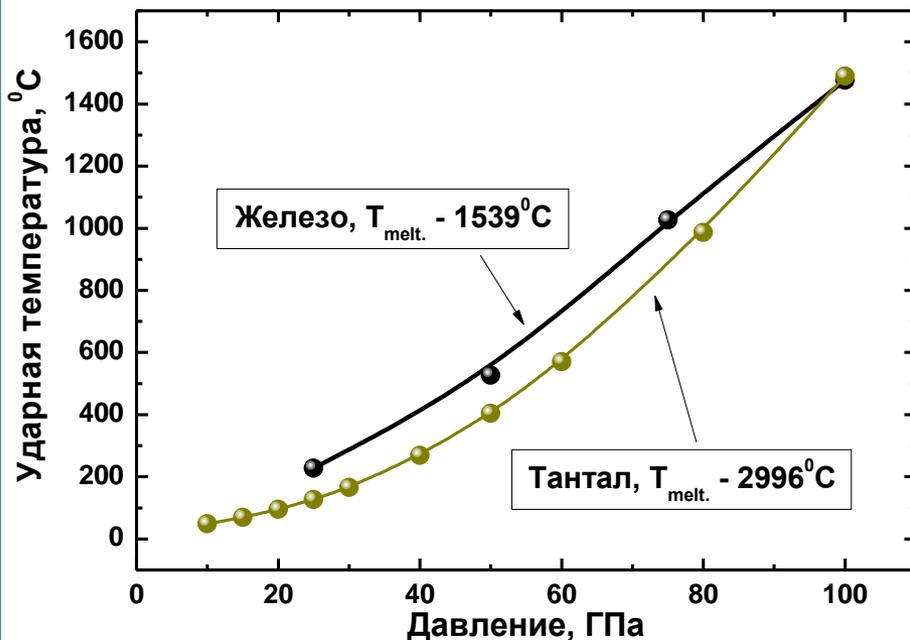
Влияние амплитуды ударного сжатия на динамическую прочность никелида титана



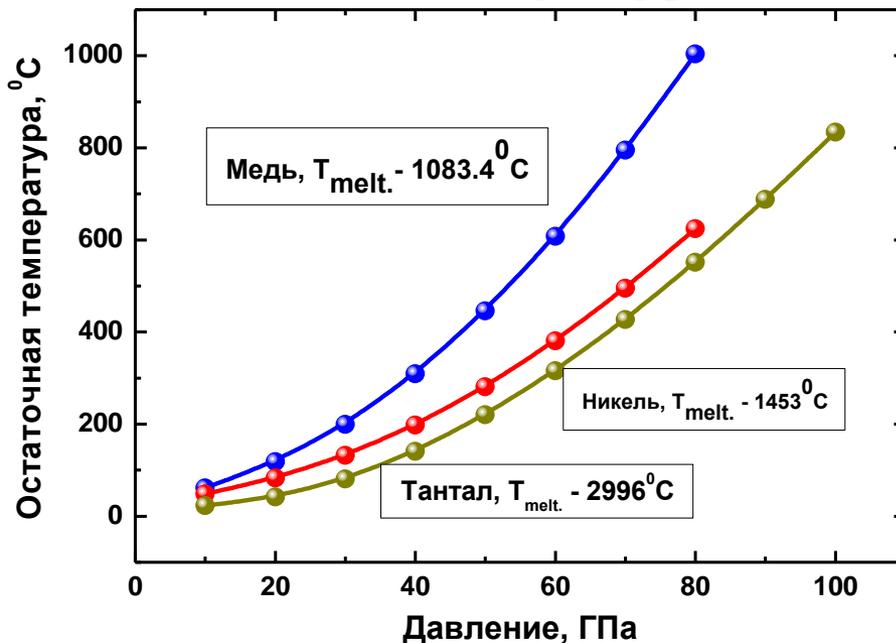
✓ Откольная прочность никелида титана растет с ростом давления ударного сжатия. Сильный рост прочности в диапазоне давлений 5 – 15 ГПа может быть связан с мартенситно-аустенитным переходом вследствие роста температуры образцов в ударной волне;

Нагрев металлов при ударном сжатии*

Ударная температура



Остаточная температура после разгрузки

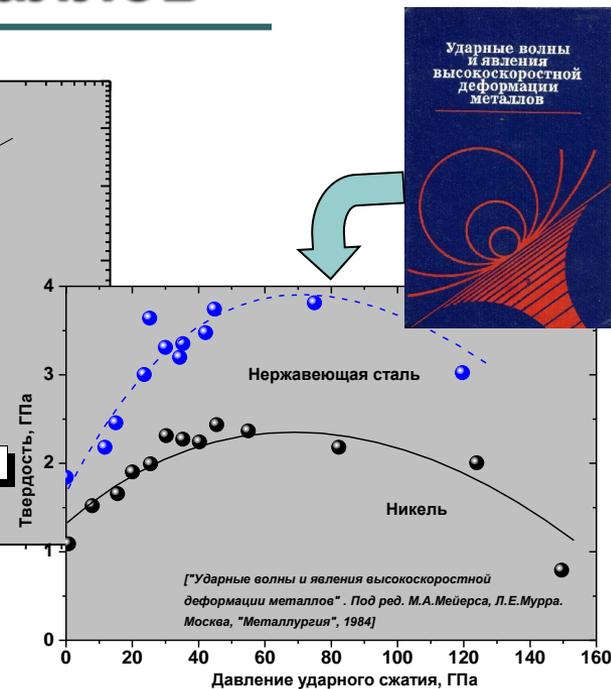
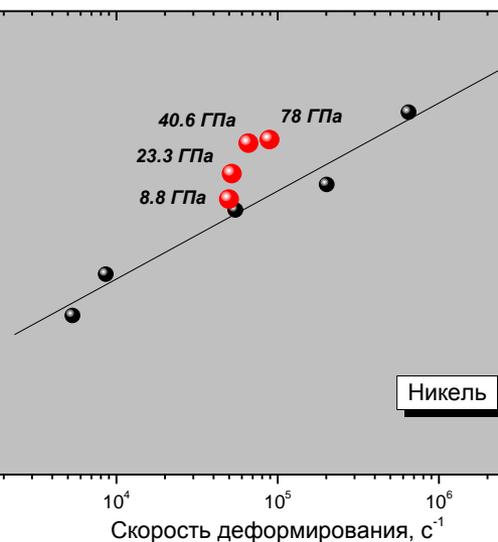
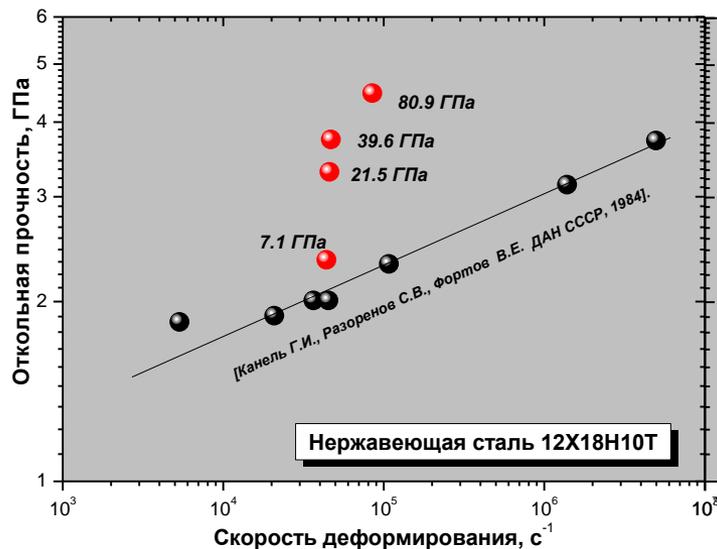


*R.G.Mc. Queen, S.P.Marsh (1960)

✓ Нагружение металлов интенсивными ударными волнами может привести к плавлению как во фронте ударной волны, так и после разгрузки;

[Данные по танталу предоставлены проф. Ломоносовым И.В. (ИПХФ РАН), Черноголовка]

Влияние амплитуды и скорости деформирования на динамическую прочность металлов



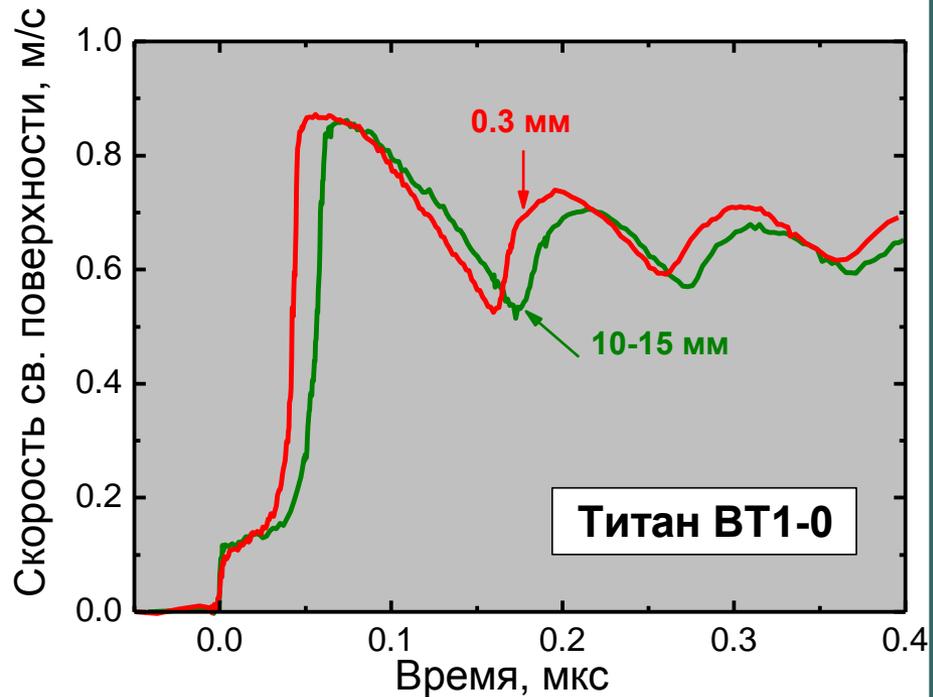
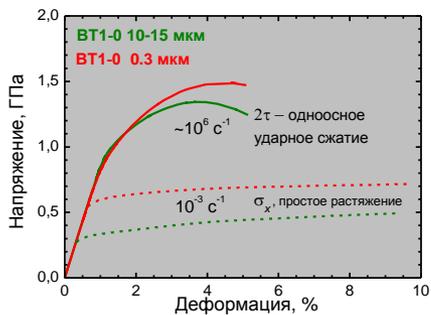
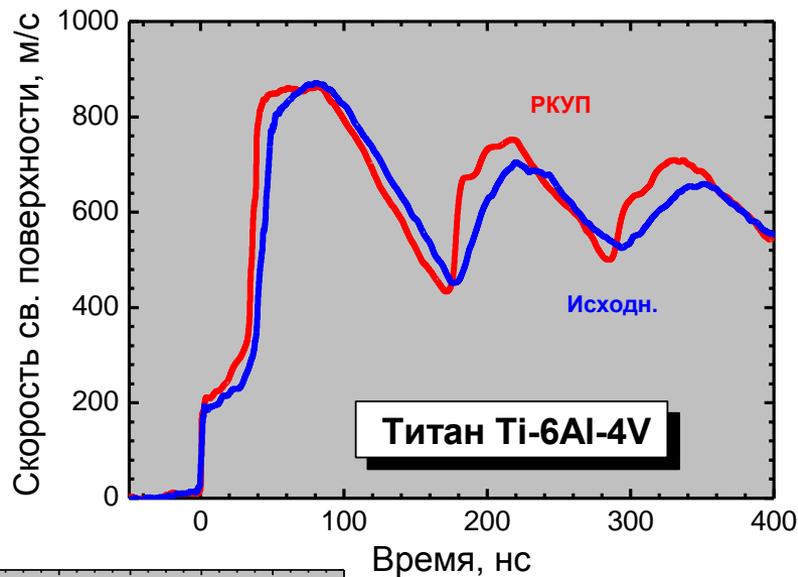
✓ При $P > 100$ ГПа в никеле начинает развиваться субзеренная структура, характерная для термического возврата, твердость уменьшается. После 150 ГПа структура никеля идентична структуре никеля в ненагруженном отожженном состоянии. [Rose M.F., 1966].

✓ Термический возврат в нержавеющей стали не так велик, как в никеле — после 120 ГПа в структуре остаются двойники и сохраняется субзеренная структура.

ИНТЕНСИВНАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ (СТАТИКА)

Влияние внутренней структуры
на динамическую прочность металлов

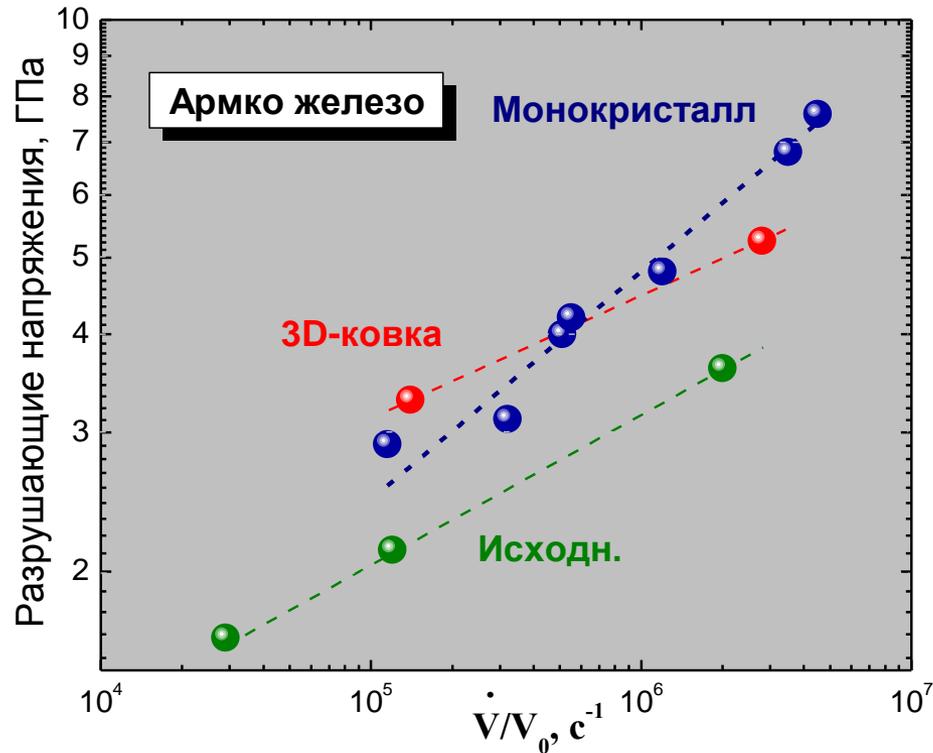
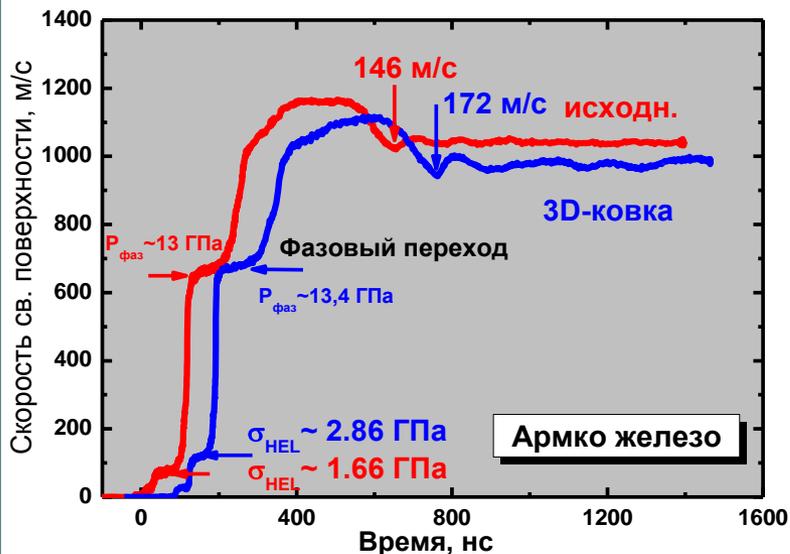
Субмикросекундная прочность нанокристаллических титановых сплавов*



✓ Практически нет различия в характере динамического деформирования и разрушения титановых сплавов при радикальном уменьшении размеров зерна

*Разоренов С.В., Канель Г.И. и др. (2001 – 2005)

Влияние ИПД на высокоскоростное деформирование и разрушение железа Армко *

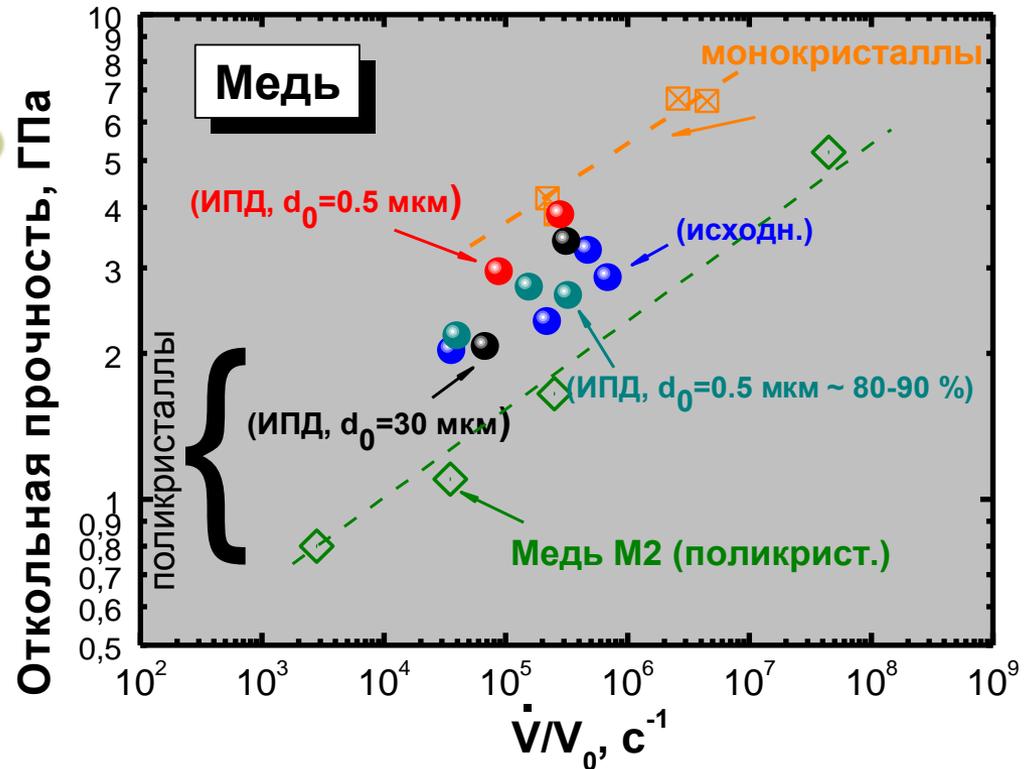
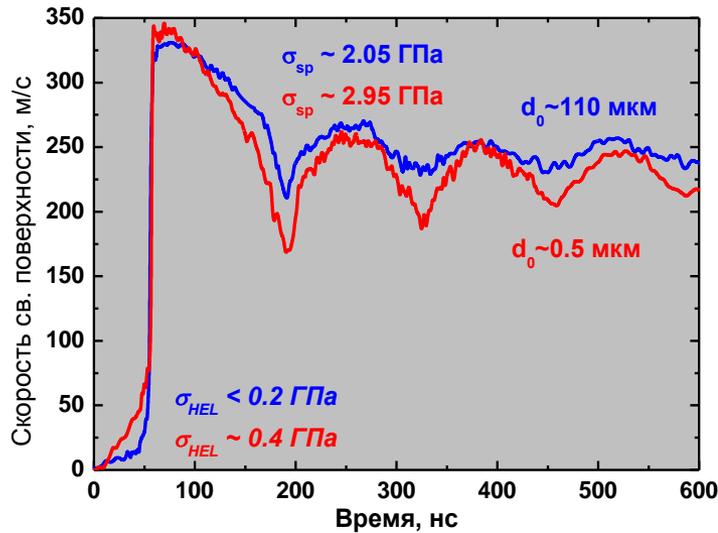


✓ Интенсивная пластическая деформация железа Армко приводит к значительному росту откольной прочности, предела упругости и давления фазового превращения. Прочность ультрамелкозернистого железа близка к прочности монокристаллов.

*Разоренов С.В., Канель Г.И. (2003 - 2004)

Влияние внутренней структуры на динамическую прочность меди М1*

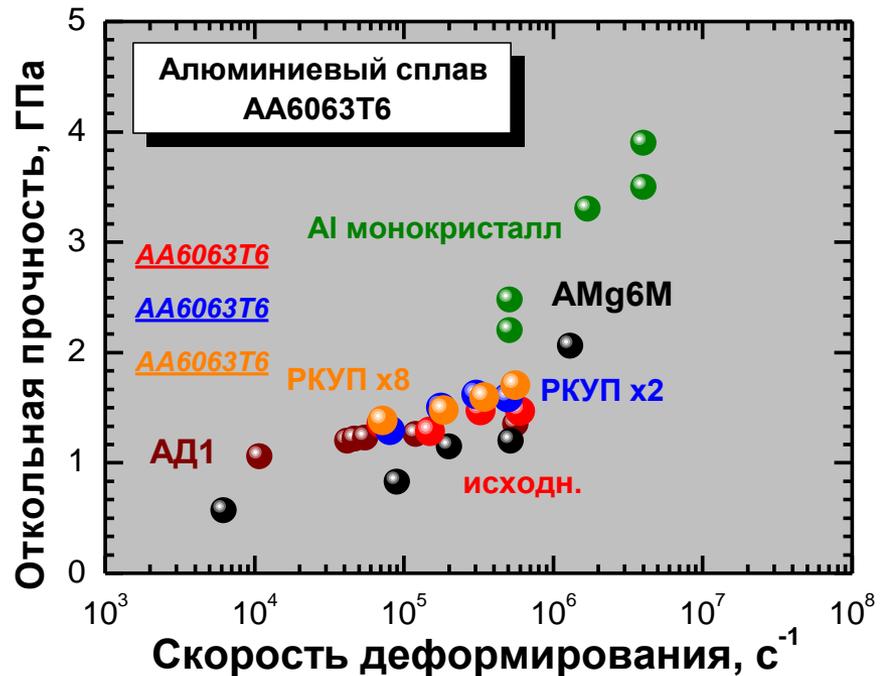
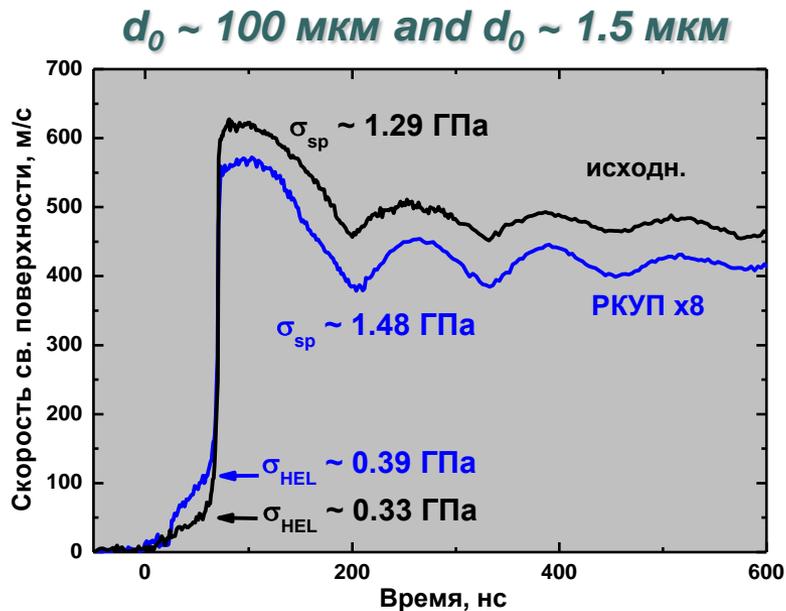
Медь в состоянии поставки и после объемного прессования ($d_0 \sim 0.5$ мкм)



- ✓ Максимальный предел упругости и разрушающие напряжения реализуются в высокооднородных ультрамелкозернистых ($d_0 \sim 0.5$ мкм) образцах меди;
- ✓ Характер разрушения и откольная прочность ультрамелкозернистой меди подобны поведению монокристаллических образцов;

*Разоренов С.В., Канель Г.И., Гаркушин Г.В., Игнатова О.Н. и др. (2007 – 2009)

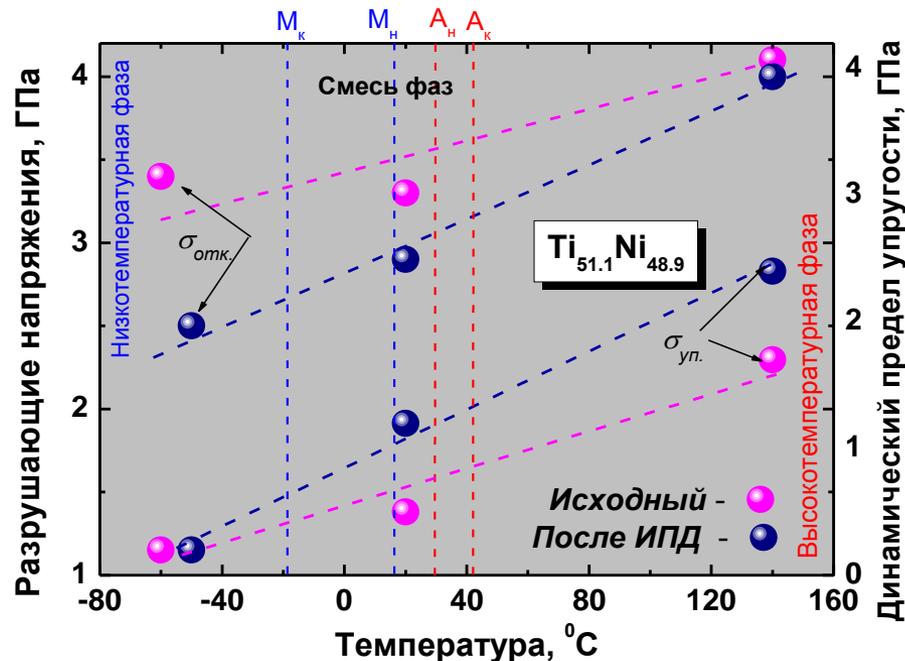
Влияние ИПД на упруго-пластические и прочностные свойства алюминиевого сплава АА6063Т6*



*Разоренов С.В., Канель Г.И., Гаркушин Г.В., Майер Л. И др. (2007 - 2008)

- ✓ Уменьшение размера зерна в алюминиевом сплаве АА6063Т6 в 100 раз приводит к увеличению предела упругости 10-15%;
- ✓ Динамическая прочность алюминиевого сплава АА6063Т6 после ИПД увеличивается незначительно и растет с ростом скорости деформирования;

Динамическая прочность сплава $Ti_{51.1}Ni_{48.9}$ в температурном диапазоне мартенситных превращений*



*Разоренов С.В., Гаркушин Г.В., Канель Г.И. и др. (2008 – 2009)

- ✓ Максимальная прочность реализуется в аустенитной фазе;
- ✓ ИПД приводит к уменьшению откольной прочности в этом температурном диапазоне;

Выводы по этим результатам: Формирование ультрамелкозернистой внутренней структуры в поликристаллических металлах методами ИПД приводит к не столь значительному влиянию на их прочностные свойства при динамическом разрушении в сравнении со статическими и квазистатическими условиями нагружения. Это влияние может быть неоднозначным.

Заключение

- ✓ Наблюдается корреляция между прочностным откликом металлов на сильную статическую и динамическую деформацию: динамическая прочность металлов без фазовых превращений (титан, алюминий) слабо реагирует на сильное уменьшение размеров зерна методами ИГД и также не зависит от максимального давления ударного сжатия;
- ✓ Одинаковое упрочнение металлов наблюдается как после предварительного ударного сжатия, так и в процессе ударно-волнового нагружения образцов – металл сохраняет структуру после УВ нагружения;
- ✓ Увеличение прочности металлов при ударном сжатии имеет пороговый характер вследствие ударного нагрева, приводящему к т.н. «термическому возврату»;
- ✓ Металлы с фазовыми превращениями имеют более сложный характер зависимости прочностных характеристик как от сильной статической деформации, так и интенсивности ударного сжатия;

*Спасибо за
внимание!*



Нижний Новгород - 2018

**Влияние внутренней структуры
технически чистого тантала
на его прочностные свойства
при ударном нагружении**

Исследованные образцы тантала

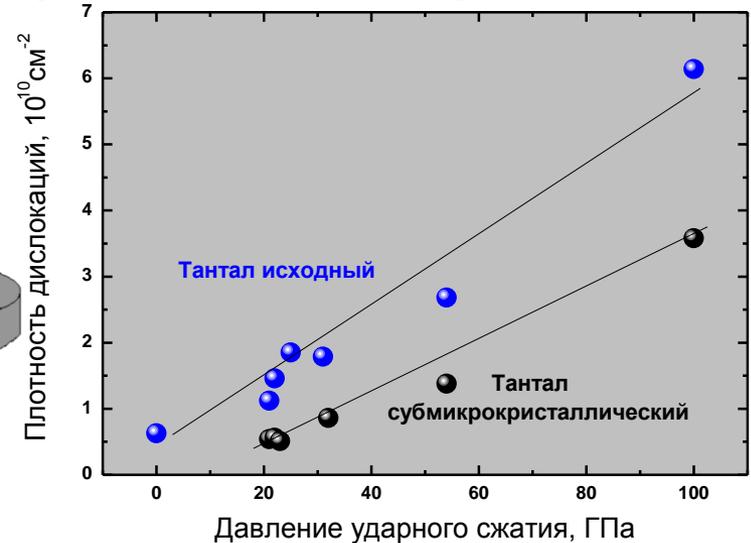
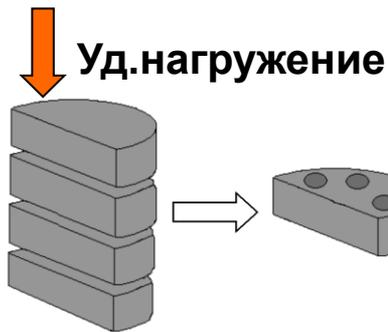
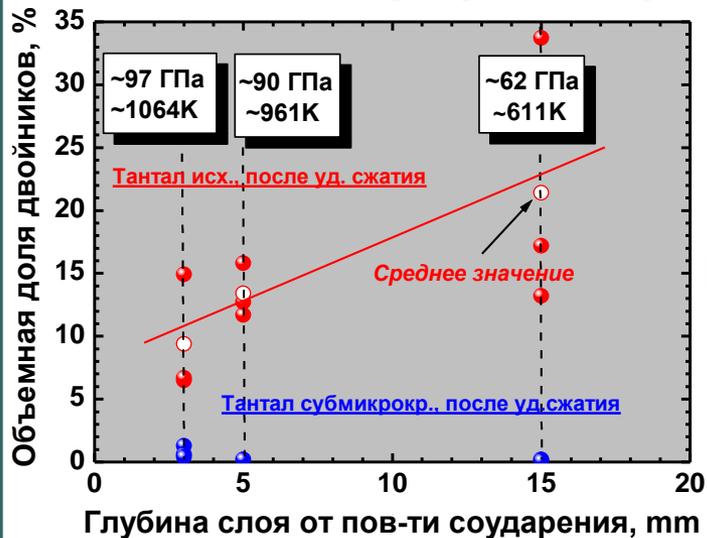
| <i>Образец</i> | <i>Твердость, HRB</i> |
|--|-----------------------|
| В состоянии поставки (средний размер зерна <u>~55 μm</u>) | 76 – 79 |
| Субмикrokристаллический (средний размер зерна <u>~0.5 μm</u>) | 103 – 104 |
| Крупнокристаллический после ударного сжатия (<u>~40 GPa</u>) | 103 |
| Крупнокристаллический после ударного сжатия(<u>~100 GPa</u>) | 97 – 99 |
| Субмикrokристаллический после ударного сжатия (<u>~40 GPa</u>) | 104 – 105 |
| Субмикrokристаллический после ударного сжатия (<u>~100 GPa</u>) | 103 – 105 |
| Монокристаллический неопределенной ориентации | 68 |

Условия экспериментов:

- ✓ Толщина образцов: ~0.5 мм, ~2 мм;
- ✓ Толщина алюминиевого ударника: 0.1 мм и 0.4 мм, соответственно;
- ✓ Скорость соударения: ~630±30 м/с;
- ✓ Амплитуда ударной волны сжатия: 12 – 14 ГПа;
- ✓ Скорость деформирования перед разрушением: $3 \cdot 10^5 - 1.5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$;

Динамическое деформирование и разрушение тантала с различной внутренней структурой

Влияние предварительной динамической деформации: Металлография сохраненных после ударного сжатия образцов*

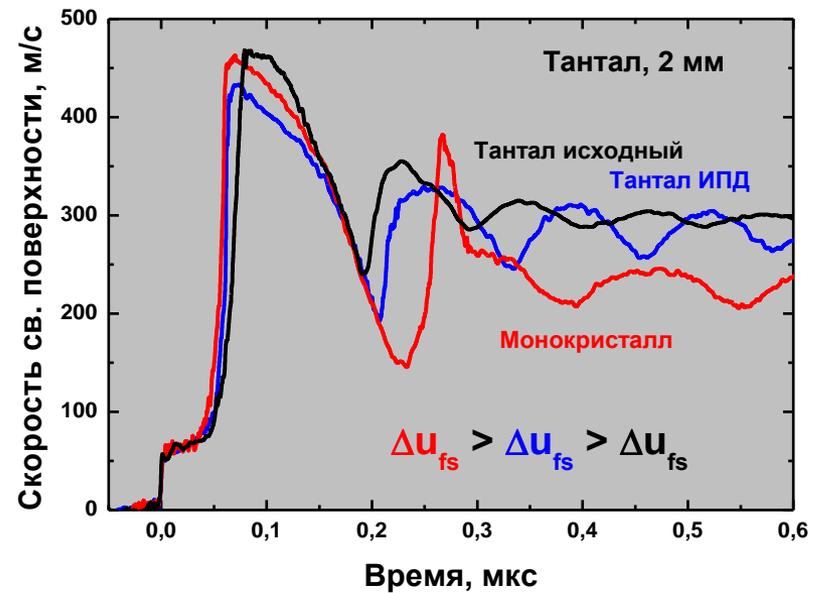
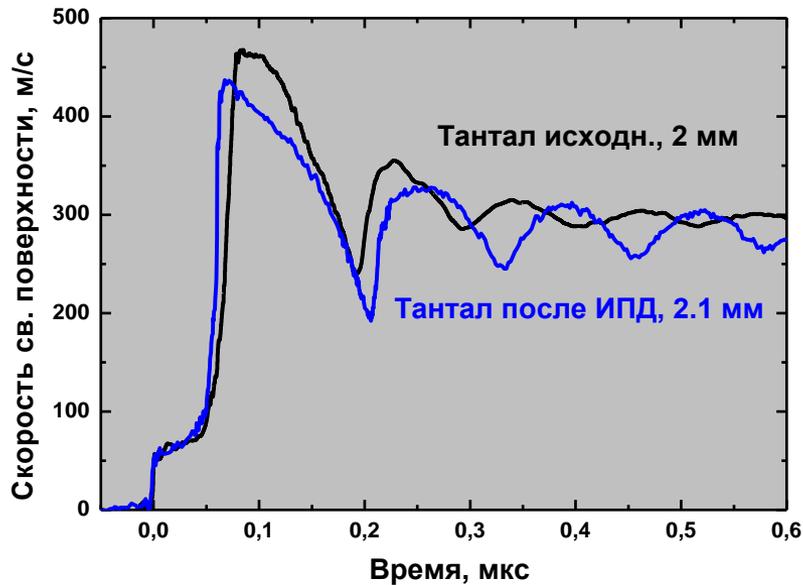


- ✓ Количество двойников растет с уменьшением интенсивности ударного сжатия крупнокристаллических образцов тантала;
- ✓ Количество двойников мало в образцах субмикроструктурного тантала после ударного сжатия любой интенсивности;
- ✓ Плотность дислокаций увеличивается примерно в пять раз при увеличении интенсивности ударного сжатия до 100 ГПа;

*Металлографический анализ процесса двойникования выполнен проф. Салищевым В.А. (Белгородский гос. Университет.)
Плотность дислокаций определена доктором Падурец А.И. (РФЯЦ ВНИИЭФ, Саров)

Динамическое деформирование и разрушение тантала с различной внутренней структурой

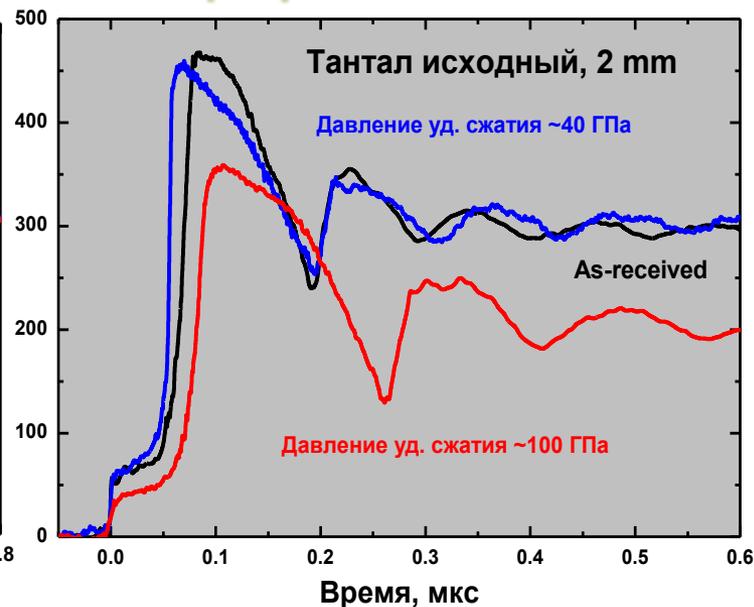
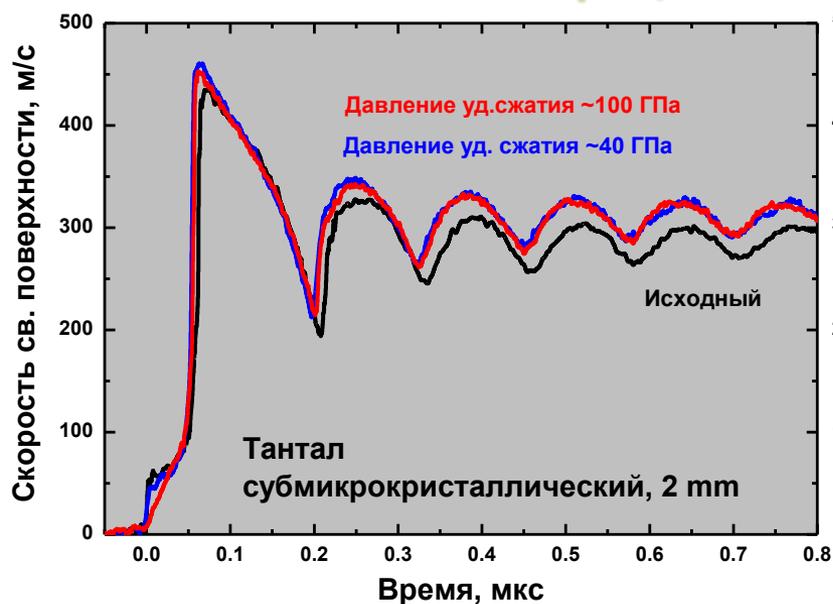
Влияние интенсивной пластической деформации: Регистрация волновых профилей



- ✓ Как и ожидалось, монокристаллы тантала обладают максимальной прочностью;
- ✓ Уменьшение размеров зерна после ИПД приводит к слабому (~7%) росту откольной прочности тантала;

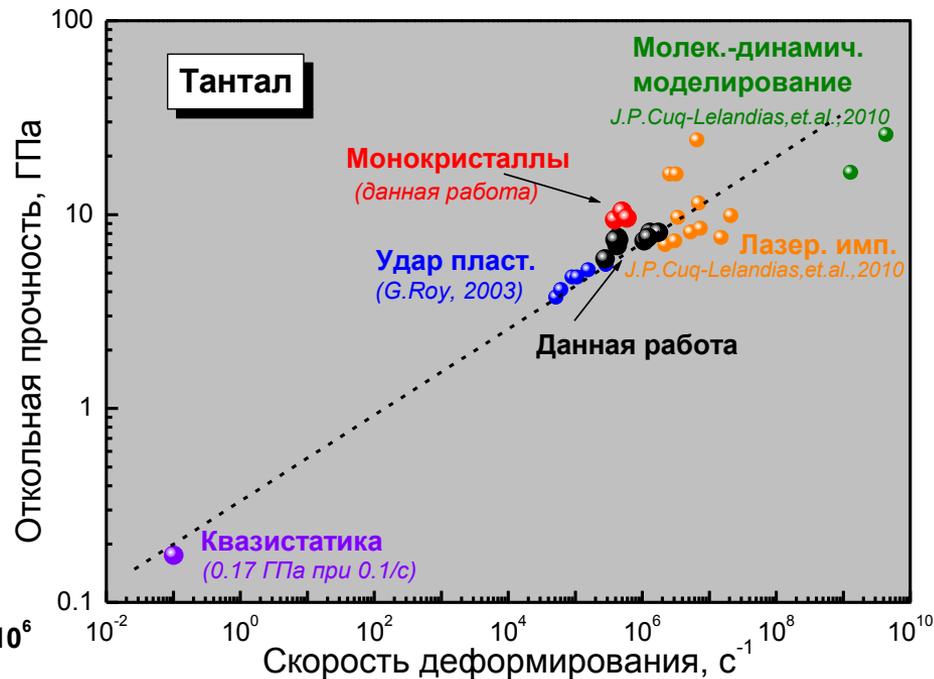
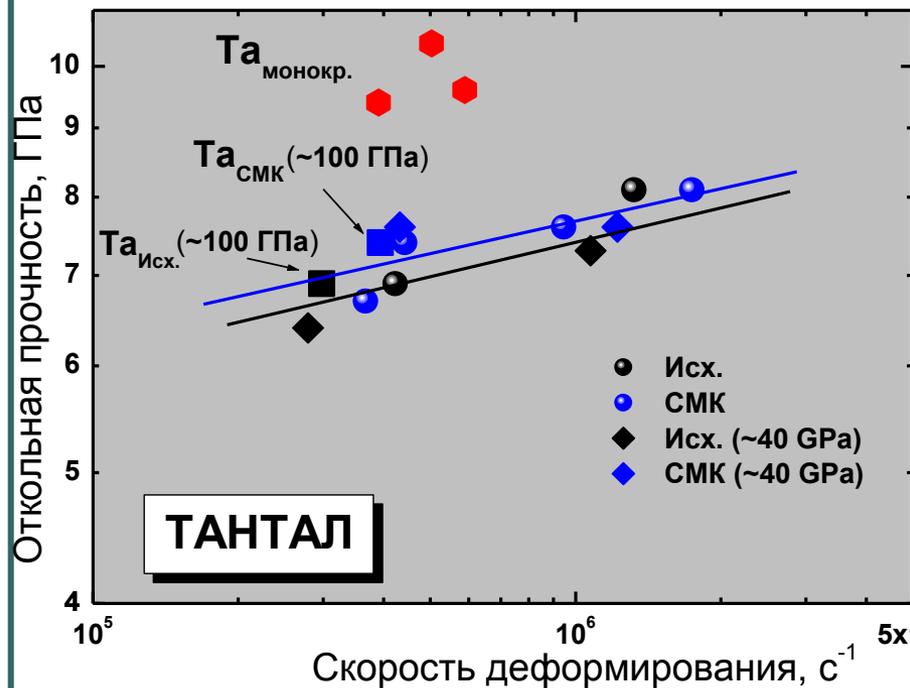
Динамическое деформирование и разрушение тантала с различной внутренней структурой

Влияние предварительной динамической деформации:
Регистрация волновых профилей



- ✓ Практически не наблюдается влияния предварительного ударного сжатия на величину разрушающих напряжений при отколе как для крупнокристаллических, так и субмикроструктурных образцов тантала;

Динамическая прочность тантала

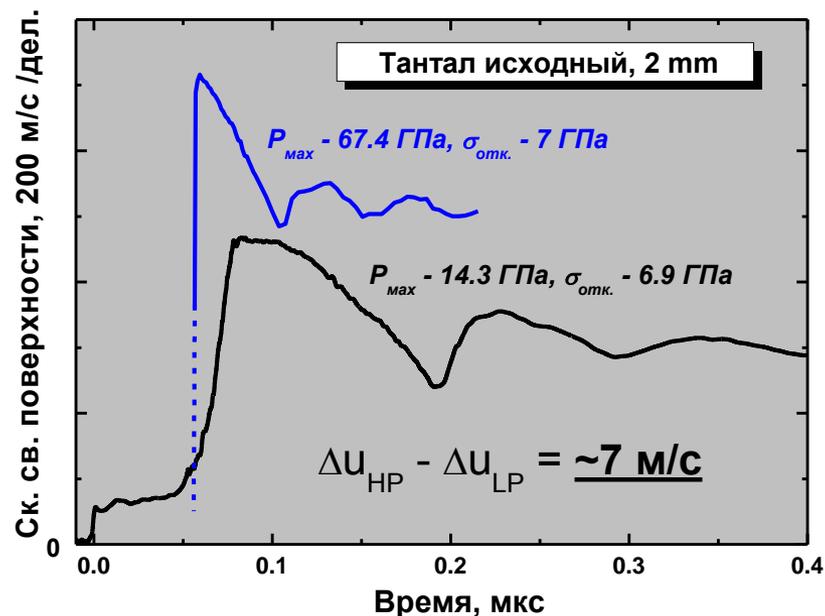
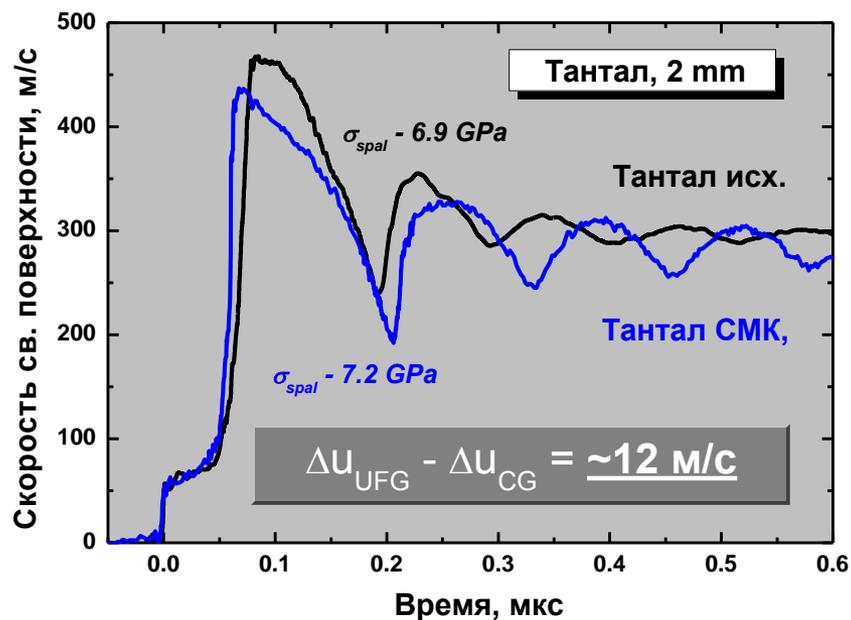


- ✓ Предварительная обработка поликристаллического тантала методами ИГД, как и высокоскоростное деформирование в ударных волнах слабо влияет на его прочностные свойства при импульсном нагружении;
- ✓ Откольная прочность тантала увеличивается с ростом скорости деформирования перед разрушением, и эта зависимость едина для поликристаллического тантала с различной внутренней структурой, начиная с квазистатических условий нагружения;

Вопрос

- **Остается вопрос: будет ли влияние амплитуды ударного сжатия на откольную прочность тантала в процессе нагружения?**
- **Предварительный ответ: Нет или очень слабое....**
- **Обоснование ответа – практически отсутствие влияния на динамическую прочность как сильной статической деформации, так и предварительного ударного сжатия;**
- **Необходимо было это проверить.....**

Влияние интенсивности ударного сжатия на откольную прочность тантала



- Таким образом, эксперименты по откольному разрушению тантала подтвердили наличия корреляции между влиянием сильной статической и интенсивной динамической деформации на сопротивление металлов динамическому разрушению