

ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ X16H15M3T1 И X13B2 ПРИ УДАРНО- ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ СУБМИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

С.С. Мокрушин¹, А.С. Майорова¹, С.Н. Малюгина¹, А.В. Павленко¹,
В.В. Сагарадзе², Н.В. Катаева², Е.Г. Волкова²

1 – Российский Федеральный Ядерный Центр-Всероссийский
Научно-исследовательский институт технической физики, Снежинск

2 – Институт Физики Металлов УрО РАН, Екатеринбург

2017 г.

Исследовательский коллектив

- Эксперименты по ударно-волновому нагружению помогали проводить Д.Н. Казаков, О.Е. Козелков, М.Ф. Геращенко, С.Ю. Филатов, И.А. Романов, Н.А. Стрижов и М.И. Деньгин
- Исследование структуры сохраненных образцов выполнены специалистами отдела материаловедения ИФМ УрО РАН Н.В. Катаевой, И.Г. Кабановой, В.А. Завалишиным, Ю.И. Филипповым, Л.М. Вороновой, С.В. Афанасьевым, А.М. Черкасовым, Д.Ю. Распосиенко, Э.Н. Фризен под руководством члена-корреспондента РАН В.В. Сагарадзе

Актуальность исследований X16H15M3T1 и X13B2

- Перспективные материалы в атомной промышленности (характеризуются малой величиной радиационного распухания)
- Экспериментальные данные по прочностным свойствам в области высоких скоростей деформации для сталей X16H15M3T1 и X13B2 отсутствуют
- Материал для исследований предоставлен Институтом физики металлов УрО РАН (г. Екатеринбург)
- Работа выполнена при поддержке Госкорпорации «Росатом» в рамках государственного контракта № Н.4х.44.90.13.1111

Свойства сталей

X16H15M3T1

Состав сплава в % по массе:

| ^{24}Cr | ^{28}Ni | ^{42}Mo | ^{22}Ti | ^{12}C |
|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| 15.9 | 15 | 2.5 | 1.02 | 0.03 |

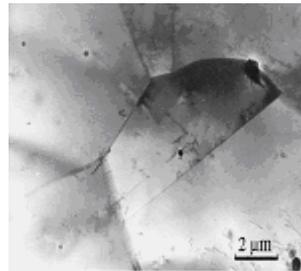
Физико-механические свойства:

- плотность - 7.95 г/см^3
- продольная скорость звука - $c_l = 5731 \pm 10 \text{ м/с}$
- поперечная скорость звука - $c_s = 3037 \pm 5 \text{ м/с}$
- рассчитанная объемная скорость звука $c_b = 4530 \text{ м/с}$

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



Цилиндрическая заготовка
из стали X16H15M3T1.
Размер 34x160



Структура закаленной от 1100°C
стали X16H15M3T1. Вид под
микроскопом

X13B2

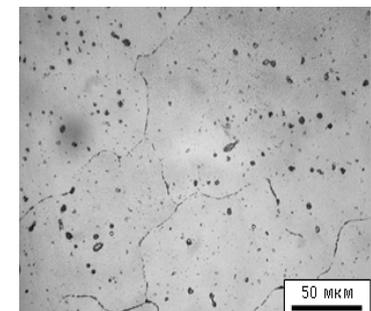
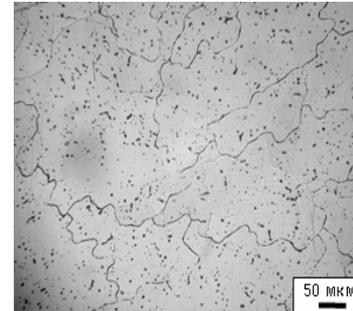
Состав сплава в % по массе:

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

Физико-механические свойства:

- плотность - 7.65 г/см^3
- продольная скорость звука - $c_l = 5972 \pm 10 \text{ м/с}$
- поперечная скорость звука - $c_s = 3140 \pm 5 \text{ м/с}$
- рассчитанная объемная скорость звука $c_b = 4570 \text{ м/с}$

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



Метод исследования

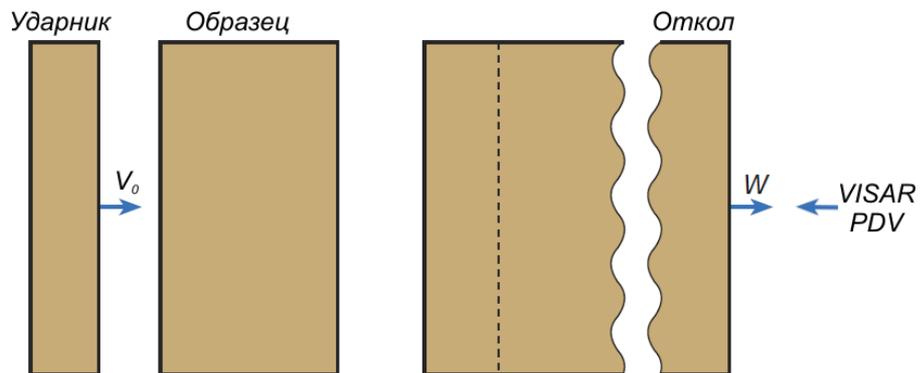
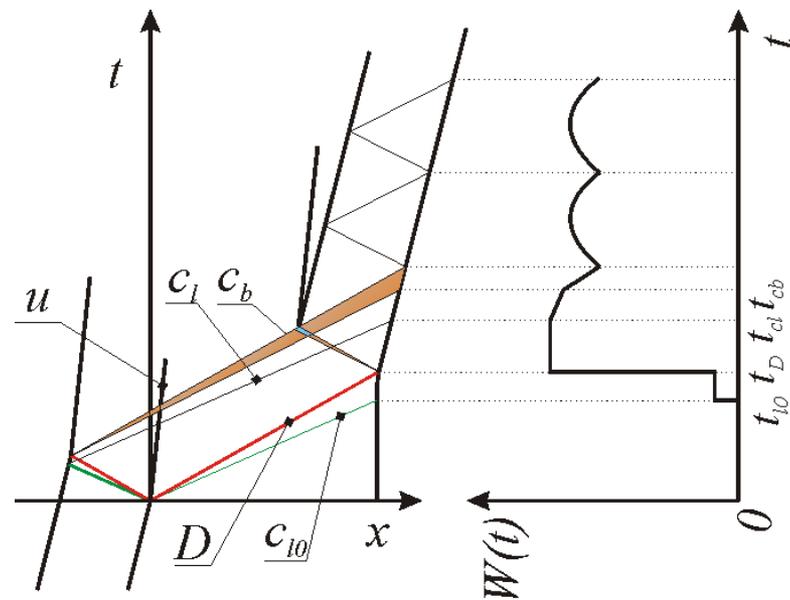


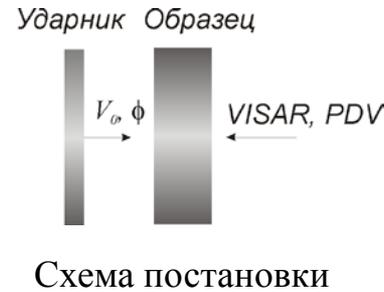
Схема опыта по исследованию ударной сжимаемости и откольной прочности материала



$x-t$ – диаграмма ударно-волнового процесса и профиль скорости свободной поверхности образца



Постановка экспериментов



Регистрация скорости $W(t)$:

- VISAR – точность $\sim 1\%$, разрешение 2 нс
 - PDV – точность $\sim 1\%$, разрешение 4 нс
- Скорость соударения V_0
- ЭКД – точность $\sim 0,5\%$

Условия экспериментов

Образцы 0,5; 1; 2; 4; 8 мм

Ударники 0,1; 0,5; 1; 2; 2 мм

- Испытания при нормальных условиях $T \sim 23^\circ\text{C}$
- Испытания при температуре эксплуатации $T \sim 500^\circ\text{C}$ и повышенной до $\sim 900^\circ\text{C}$
- Испытания при пониженной температуре $T \sim -90^\circ\text{C}$
- Реализованы интенсивности нагружения от 210 до 1530 м/с
- Диапазон скорости деформирования $10^4 - 3 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$.

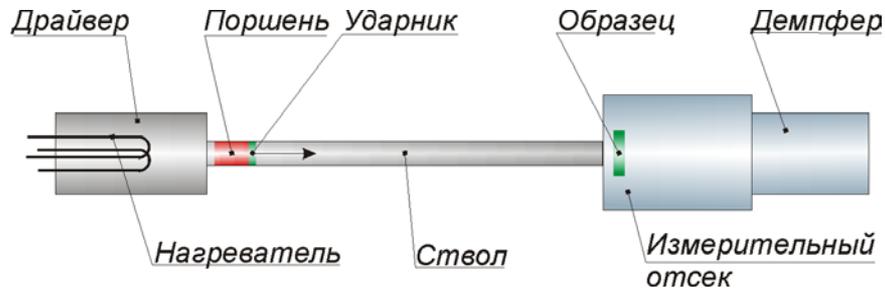
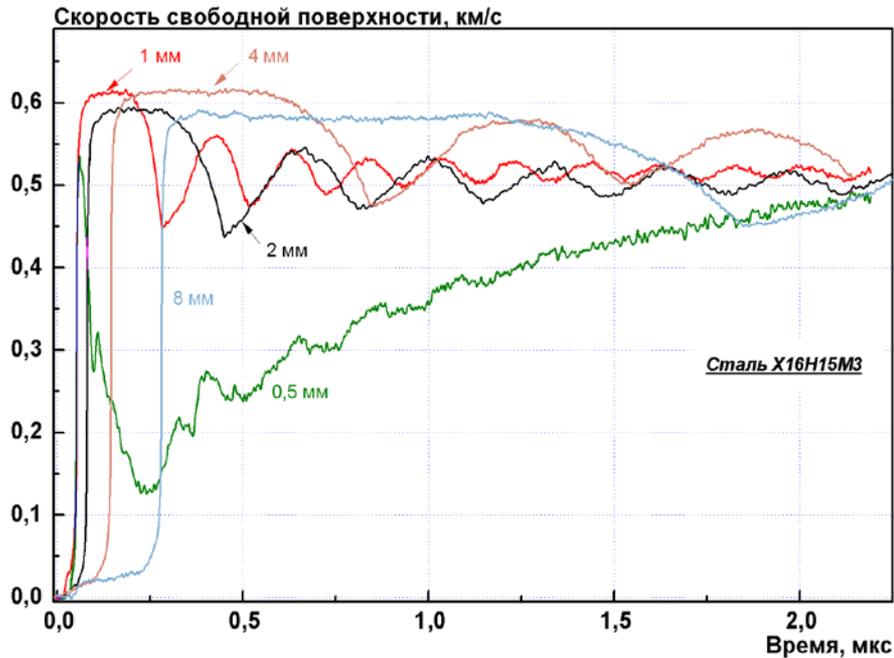


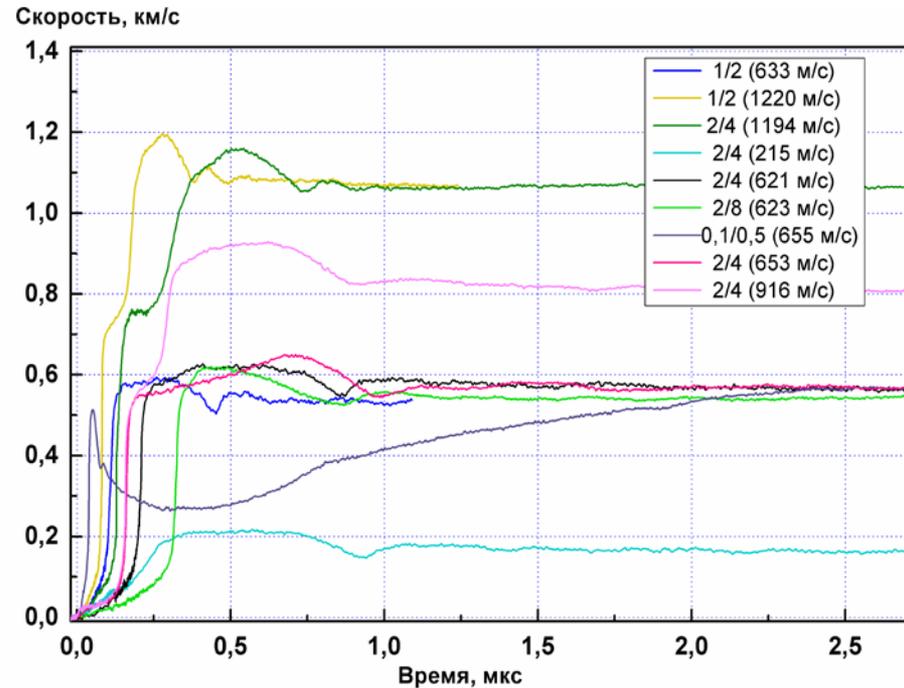
Схема легкогазовой пушки

Экспериментальные результаты.

Профили скорости свободной поверхности. Образцы различной толщины.



Профили скорости свободной поверхности образцов стали X16H15M3T1



Профили скорости свободной поверхности образцов стали X13B2

Обработка экспериментальных профилей скорости $W(t)$

$$\sigma_{sp} = \frac{1}{2} \rho_0 c_b (W_{max} - W_0 + \delta)$$

$$\delta = \left(\frac{h}{c_b} - \frac{h}{c_F} \right) |\dot{W}_1|$$

$$h = \frac{c_b c_l}{c_b + c_l} \Delta t$$

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

$$\dot{\sigma}_x^+ = \frac{1}{2} \rho c_b \dot{W}_1$$

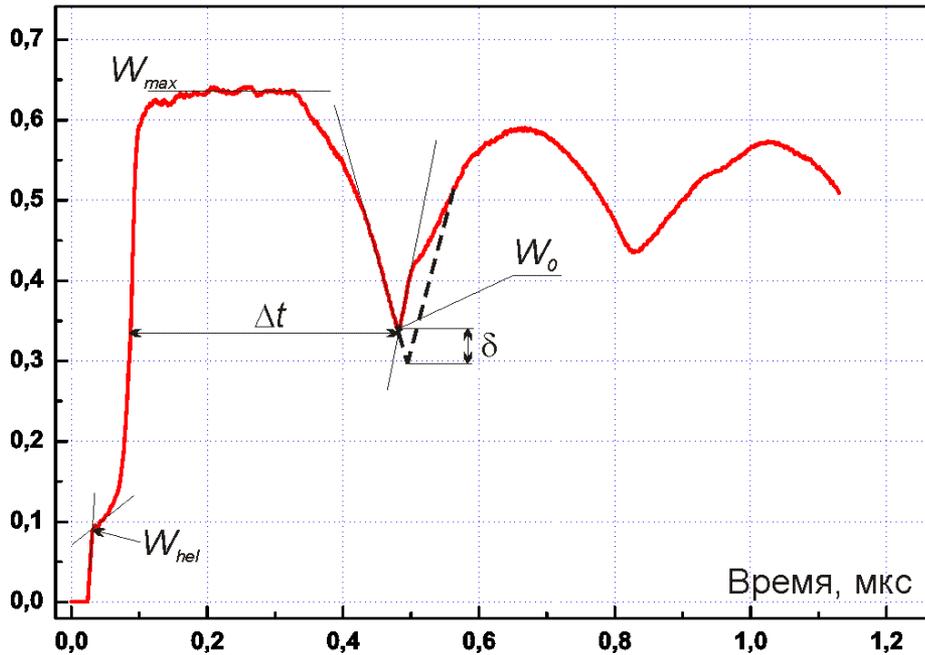
$$\dot{\sigma}_x^- = \frac{1}{2} \rho c_b \dot{W}_2$$

$$P = \frac{1}{2} \rho_0 c_b V_0$$

$$\frac{\dot{V}}{V_0} = \frac{|\dot{W}_1|}{2c_b}$$

$$\sigma_{hel} = 0.5 \rho_0 c_l W_{hel}$$

Скорость свободной поверхности $W(t)$, км/с



σ_{sp} - откольная прочность,

W_{max} - максимальная скорость св. поверхности

W_0 - минимальная скорость св. поверхности в имп. откола,

V_0 - скорость соударения,

h - толщина откольной пластины,

P - давление,

\dot{W}_1 - производная скорости св. поверхности на волне разрежения,

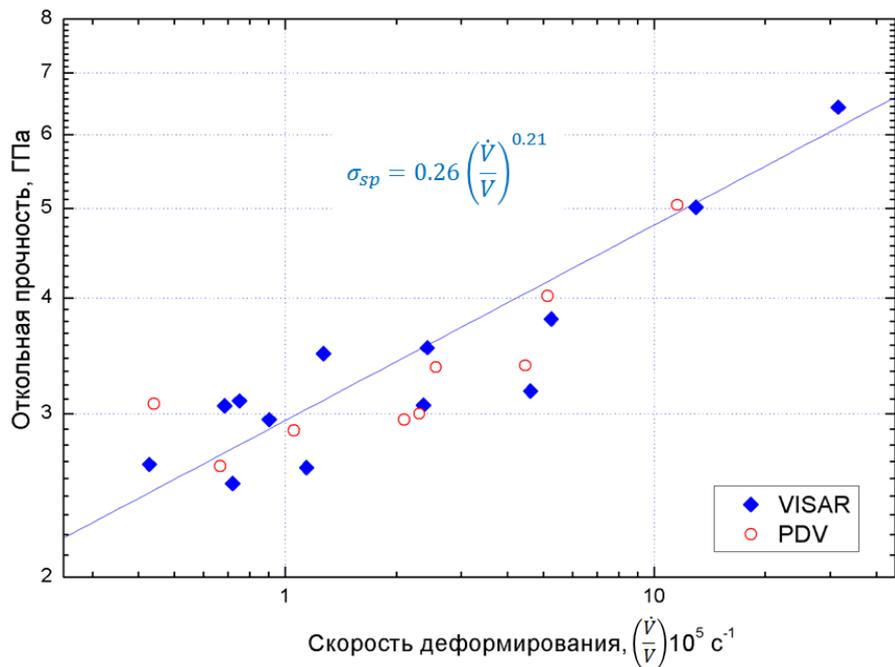
\dot{W}_2 - производная скорости св. поверхности в откольном импульсе,

c_F - скорость фронта откольного импульса,

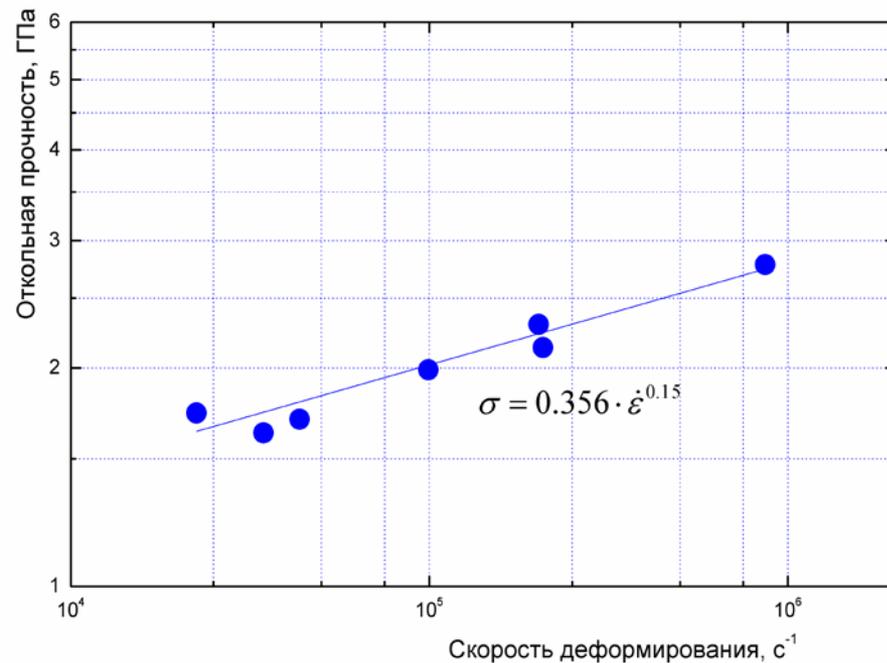
$\frac{\dot{V}}{V_0}$ - скорость деформации в волне разрежения

σ_{hel} - динамический предел упругости

Откольная прочность при нормальных условиях

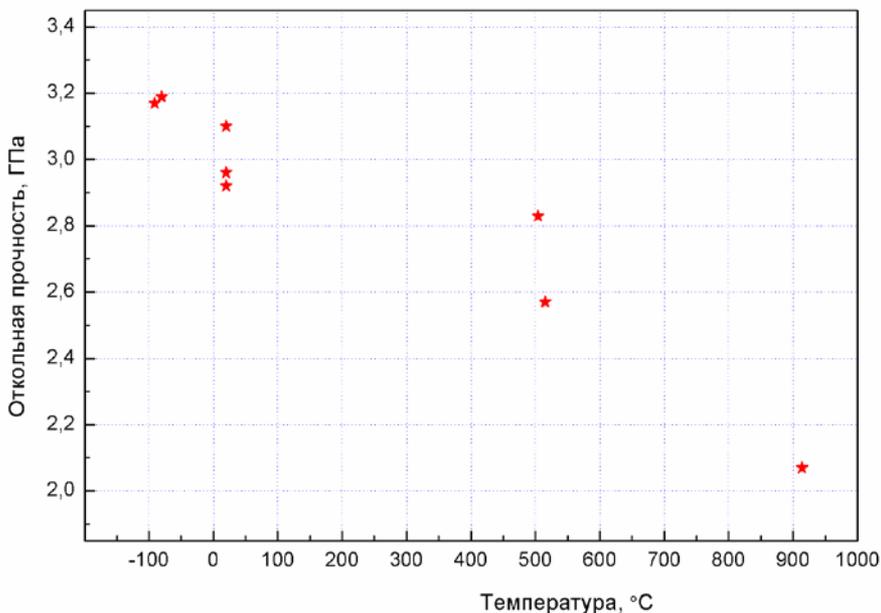


Зависимость откольной прочности X16N15M3T1 от скорости деформирования (от $4 \cdot 10^4$ до $3 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$) при нормальных начальных условиях

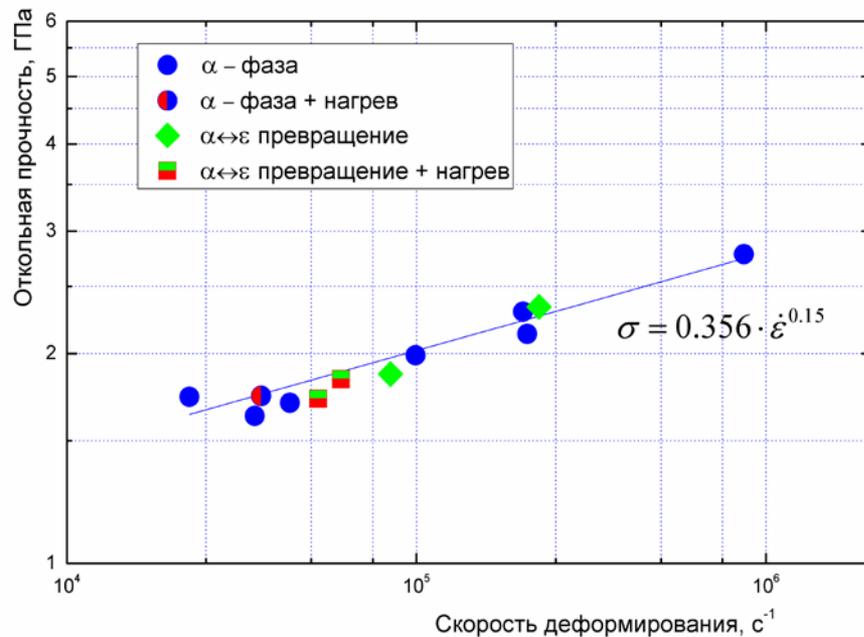


Зависимость откольной прочности X13B2 от скорости деформирования (от $2 \cdot 10^4$ до $8 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$) при нормальных начальных условиях

Температурная зависимость откольной прочности

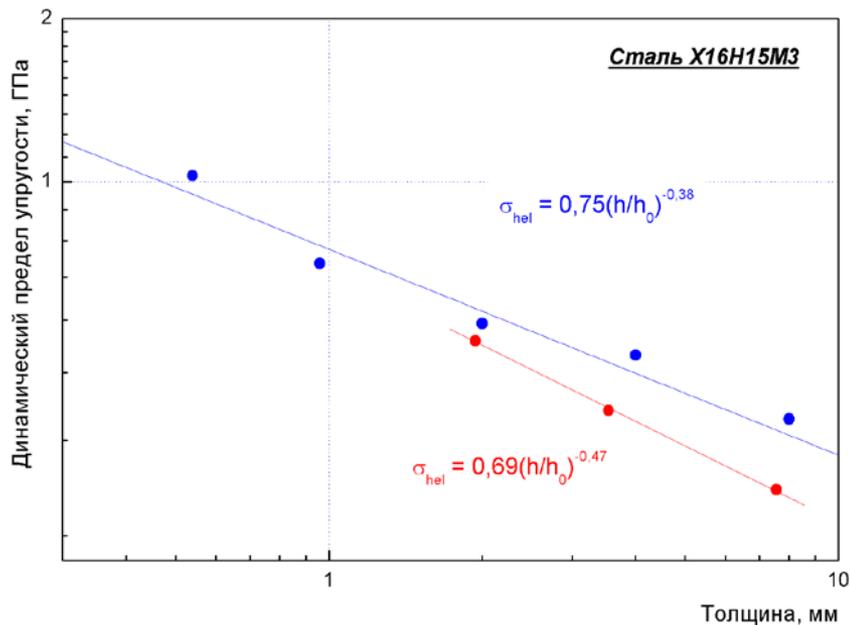


Температурная зависимость откольной прочности X16H15M3T1 при скорости деформирования $\sim 10^5 \text{ c}^{-1}$. Диапазон температур от -90 до $+910^\circ\text{C}$

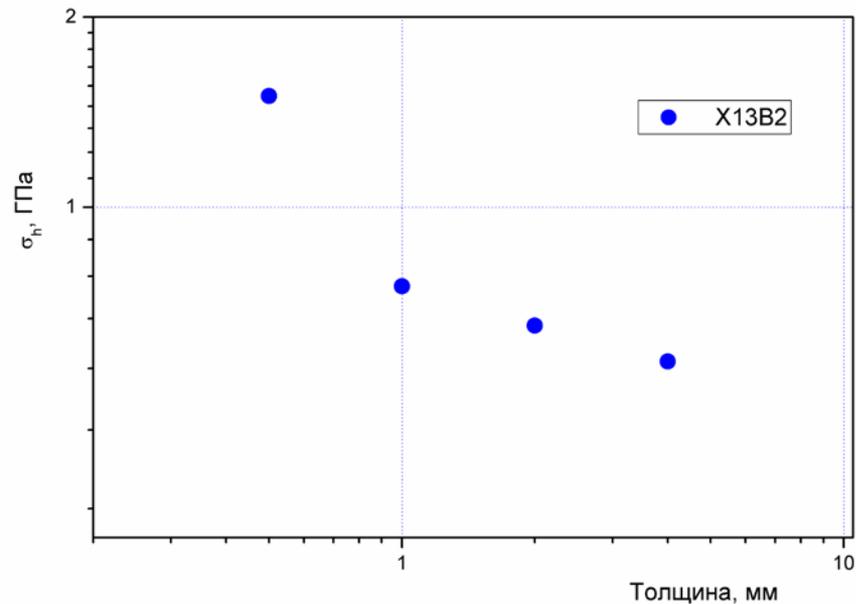


Зависимость откольной прочности стали X13B2 от скорости деформирования, совмещены данные опытов с образцами, претерпевавшими $\alpha \leftrightarrow \epsilon$ превращение и образцами нагретыми до 500°C

Динамический предел упругости

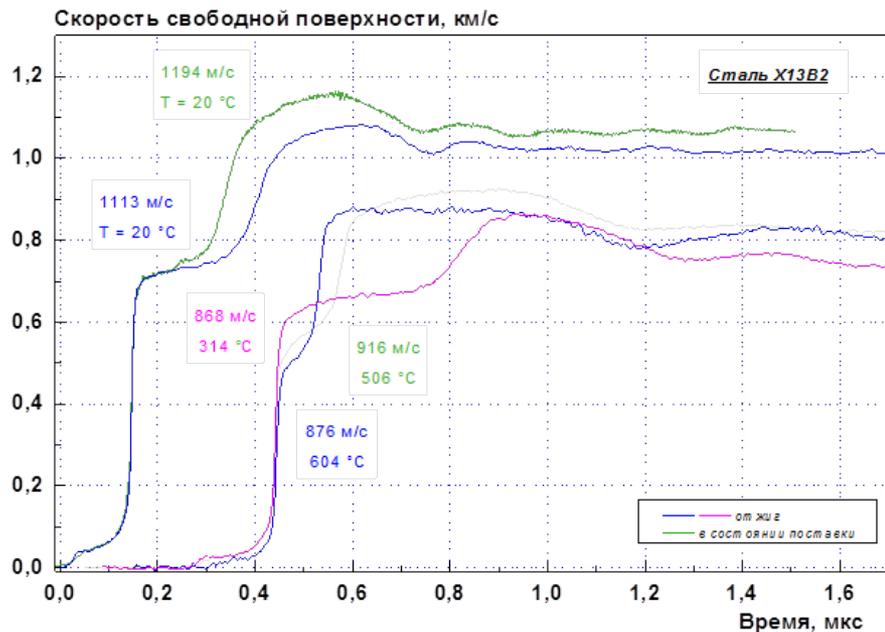


Зависимость релаксации динамического предела упругости от пройденного расстояния упругим предвестником для стали X16H15M3T1. Зависимость выделенная **синим цветом** – при нормальных начальных условиях. Зависимость выделенная **красным цветом** – при начальной температуре $\sim 500^\circ\text{C}$

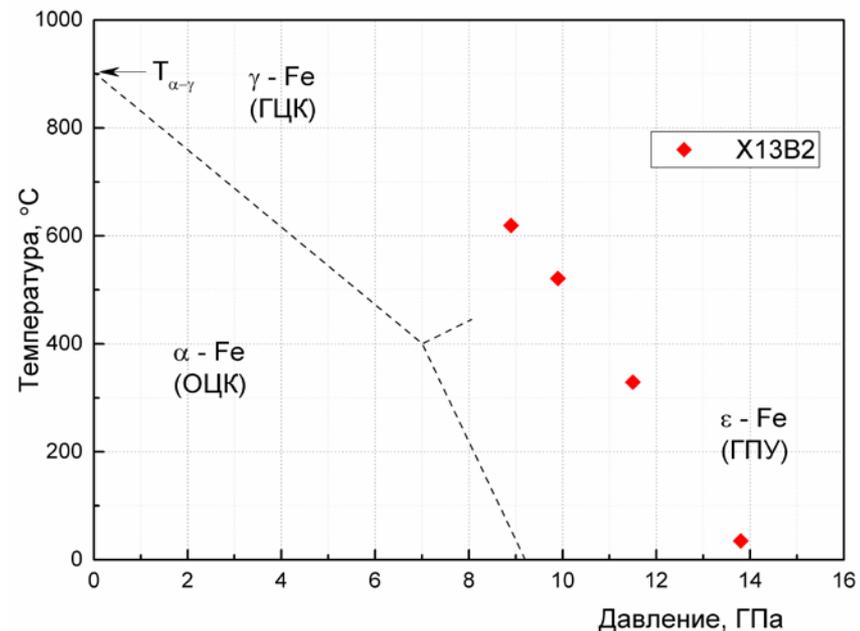


Релаксация динамического предела упругости в образцах стали X13B2 после отжига

Фазовый переход в стали X13B2

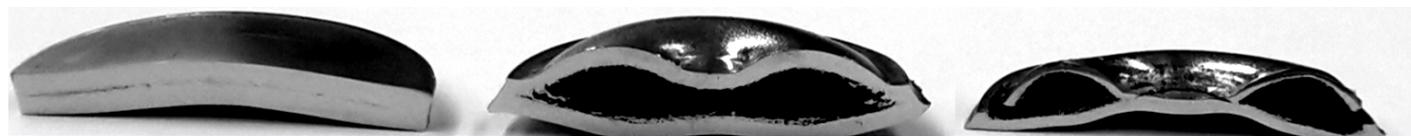


Профили скорости свободной поверхности образцов стали X13B2 в опытах с интенсивным уровнем нагружения, скорость ударника и температура образца указаны с профилем



Фазовая диаграмма. Показаны экспериментальные значения амплитуд фазовых предвестников. Пунктиром приведены равновесные значения границ фазового превращения железа..

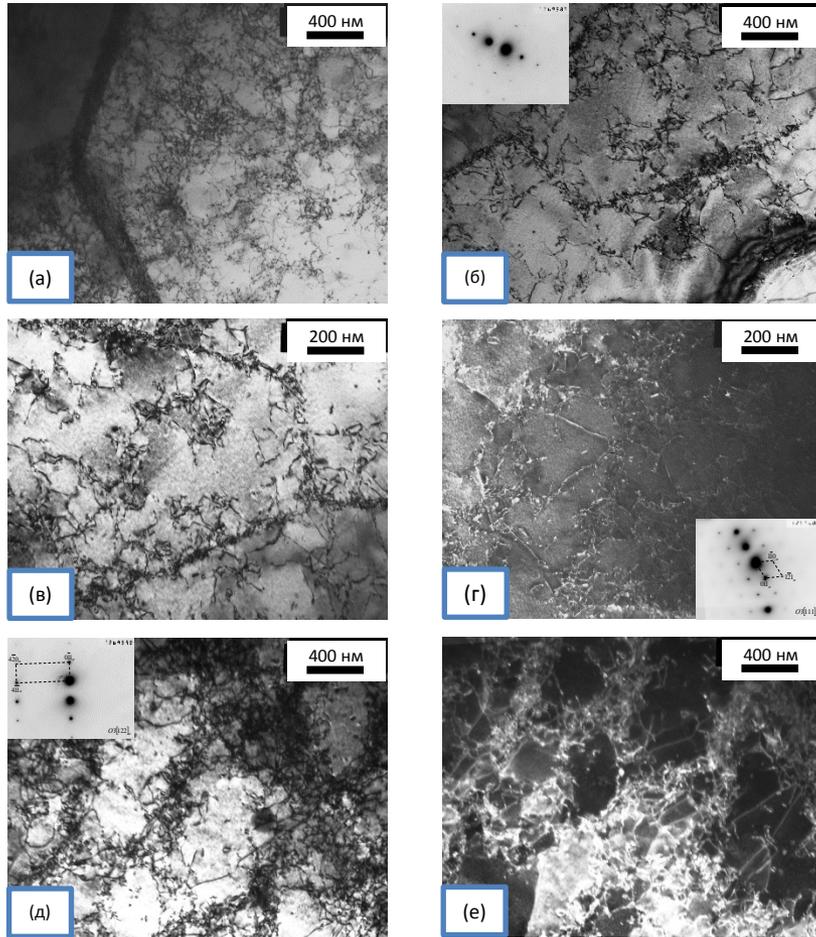
Металлографические исследования сохраненных образцов X16H15M3T1



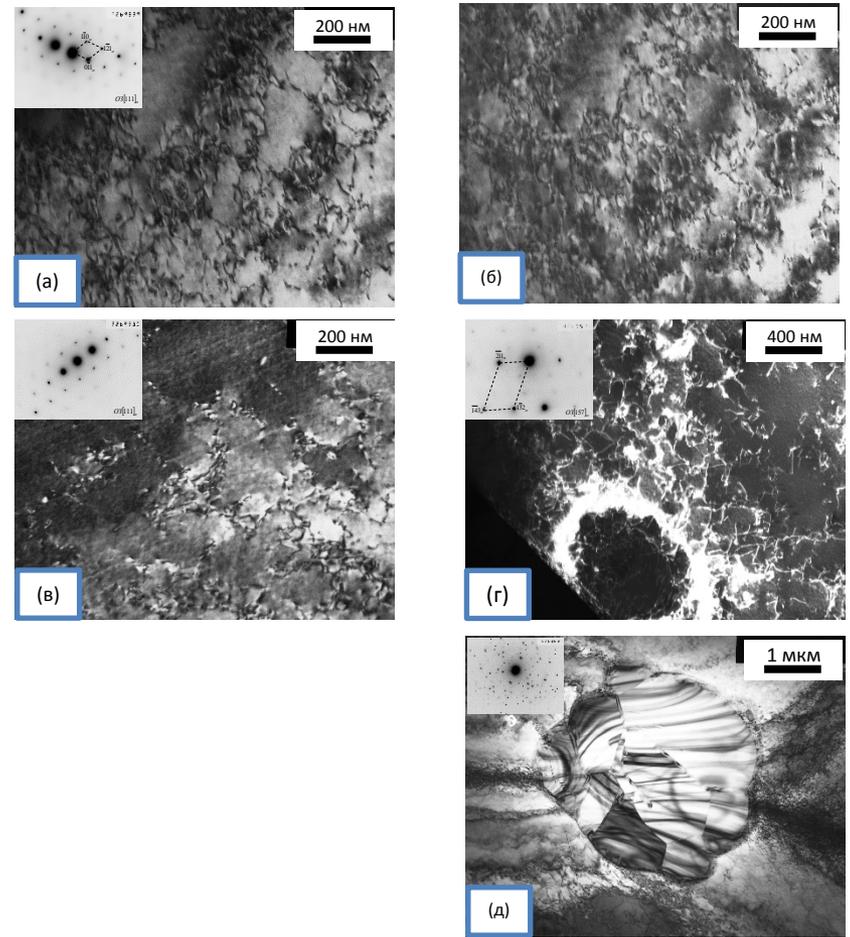
Разрезанные по диаметру сохраненные после нагружения образцы из X16H15M3T1

| Условия | 210 м/с (Удар.2 мм/Образ.4 мм) | 650 м/с (Удар.2 мм/Образ.4 мм) | 830 м/с (Удар.1 мм/Образ.2 мм) |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Изменение микроструктуры при ударно-волновом нагружении | Нарушение сплошности с образованием пор и трещин. Характер откольных повреждений по вязкому механизму. | Завершенное откольное разрушение по средней части образца за счет объединения пор и трещин. Отличие – образование множества трещин и пор вокруг включений. Зеренная структура сохранилась | Откольное разрушение по средней части образца. Размер зерна сохранился |
| Изменение микротвёрдости | Повышение твердости по всему сечению от 2,2 до 2,5 ГПа с повышением до 4,3 ГПа в средней части образца вблизи формирующейся поверхности откольного разрушения | Повышение микротвердости по всему сечению расслоившихся пластин – от 2,7 до 3,0 ГПа. Максимальное значение 3,5 ГПа в средней части образца у поверхностей откола | Повышение микротвердости по всему сечению расслоившихся пластин – от 3,0 до 3,3 ГПа. Максимальное значение 4,1 ГПа в средней части образца |
| Механизмы деформирования (тонкая структура) | Отдельные дислокации, отдельные частицы интерметаллидной или карбидной фаз. Плотность дислокаций $1,8 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ | Большое количество дислокаций и формирование тонких двойников деформации. Плотность дислокаций $2,5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ | Образование большого количества двойников в двух пересекающихся плоскостях двойникования. Плотность дислокаций $6,4 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ |

Микроструктура сплава X13B2 после ударно-волнового нагружения



Параметры нагружения: $V = 215,0$ м/с, $T = 25,0$ °С.
 а, б, в, д – светлопольные изображения;
 г – темнопольное изображение в рефлексе $(0 \bar{1}1)_{\alpha}$;
 е - темнопольное изображение в рефлексе $(4 \bar{1}1)_{\alpha}$.



Параметры нагружения: $V = 215,0$ м/с, $T = 509,0$ °С.
 а, в, д – светлопольные изображения;
 б – темнопольное изображение в рефлексе $(0 \bar{1}1)_{\alpha}$;
 г – темнопольное изображение в рефлексе $(1 \bar{3}2)_{\alpha}$;
 д – темнопольное изображение в рефлексе $(0 \bar{1}1)_{\alpha}$.

Заключение

- Откольная прочность сплава X16H15M3T1 возрастает с увеличением скорости деформирования как:
$$\sigma_{sp} = 0,26 \left(\frac{\dot{v}}{v}\right)^{0,21}$$
 и уменьшается с нагревом.
- Прогнозирование динамической прочности стали X13B2 при температурах, которым материал может подвергаться в процессе эксплуатации, в диапазоне скоростей деформирования от 10^4 до 10^6 с⁻¹ возможно с использованием зависимости вида: $\sigma_{sp} = 0,256 \left(\frac{\dot{v}}{v}\right)^{0,15}$ (ГПа).
- Зависимости релаксации динамических пределов упругости в образцах X16H15M3T1 описывается как:
$$\sigma_{hel} = 0,75 \left(\frac{h}{h_0}\right)^{-0,38}$$
 при нормальной температуре и при повышенной до $\sim 500^\circ\text{C}$: $\sigma_{hel} = 0,69 \left(\frac{h}{h_0}\right)^{-0,47}$
- Увеличение интенсивности нагружения X16H15M3T1 (скорости деформирования во фронте ударной волны) приводит к росту плотности дислокаций и повышению микротвердости с $\sim 2,2$ ГПа до $\sim 3,3$ ГПа по всему сечению образцов. Снижение начальной температуры приводит к росту плотности дислокации и развитию механизма деформационного двойникования в аустенитной стали X16H15M3T1 наряду с обычным дислокационным скольжением. Дислокационное скольжение характерно для второго и третьего уровня нагружения, за исключением повышенных температур образцов. При нормальной температуре третьего уровня нагружения образуются двойники в двух пересекающихся плоскостях.
- В процессе высокоскоростной пластической деформации (215,0 м/с) при 25 и 509°C в ферритной стали X13B2 деформация за счет дислокационного скольжения с образованием ячеистой и ячеисто-сетчатой дислокационной структуры. Повышение температуры от 25 до 509°C приводит почти к двукратному уменьшению размера дислокационных ячеек.

Спасибо за внимание

