



Забабахинские научные чтения
18-22 марта 2019
Снежинск, Россия

ОПИСАНИЕ СДВИГОВОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛИ 30ХГСА НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ MTS

Р. М. Кичигин^{1,2}, Д. М. Шалковский², А. В. Караваев², А. В. Петровцев²,
Е. А. Козлов², А. М. Брагов³, А. К. Ломунов³

¹ Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет),
Челябинск, Россия

² Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

³ НИИ механики Нижегородского государственного университета Н. И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия



Цель:

Определение параметров модели сдвиговой прочности для описания поведения конструкционной стали 30ХГСА в условиях ударно-волнового и взрывного нагружения

Поставленные задачи:

- Анализ результатов исследования поведения образцов стали 30ХГСА при высокоскоростном деформировании
- Определение параметров модели MTS конструкционной стали 30ХГСА для скоростей деформации до 10^4 с^{-1}
- Определение параметров для высокоскоростной ветви деформации в условиях ударно-волнового нагружения (УВН)
- Модификация исходной MTS модели для описания изменения сдвиговой прочности стали 30ХГСА претерпевшей полиморфное α - ϵ превращение при взрывном нагружении

Сталь 30ХГСА

Состав по ГОСТ 4543-71

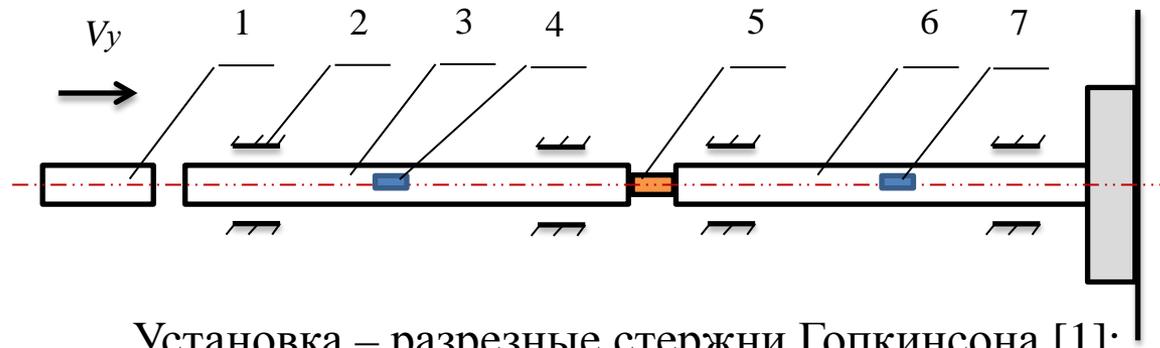
Хим. элемент	Содержание, %
Основные элементы	
C	0.29
Si	1.11
Mn	0.99
Cr	0.97
Примеси	
P	0.016
S	0.005
Mo	0.01
Ni	0.07
V	0.01
T	0.01
Cu	—



Механические свойства стали по ГОСТ 8479-70, сечение 100-300 мм, закалка (860-880°C) и отпуск (600°C вода или масло)

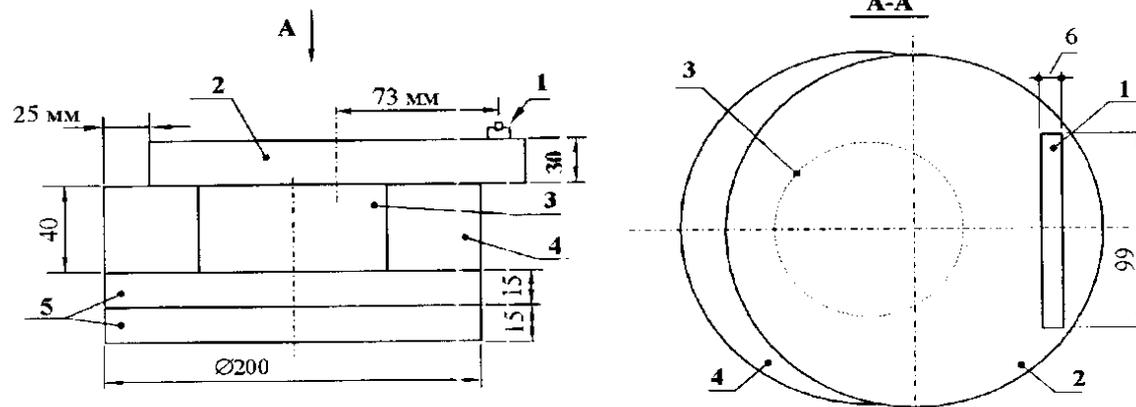
$t_{отп.}$	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²	Твердость, НВ
600	490	655	13	40	54	212-248

Постановка экспериментов



Установка – разрезные стержни Гопкинсона [1]:

1- ударник; 2- подшипники; 3 и 6 – стержни; 4 и 7 – тензодатчики; 5 – испытываемый образец

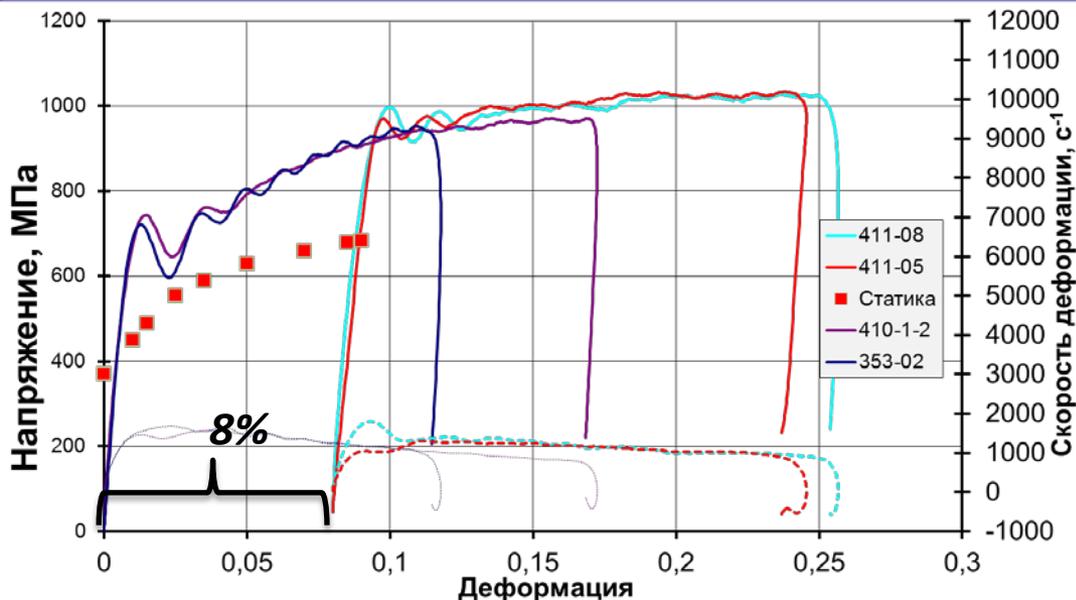


Постановка взрывных экспериментов с сохранением образцов [2]

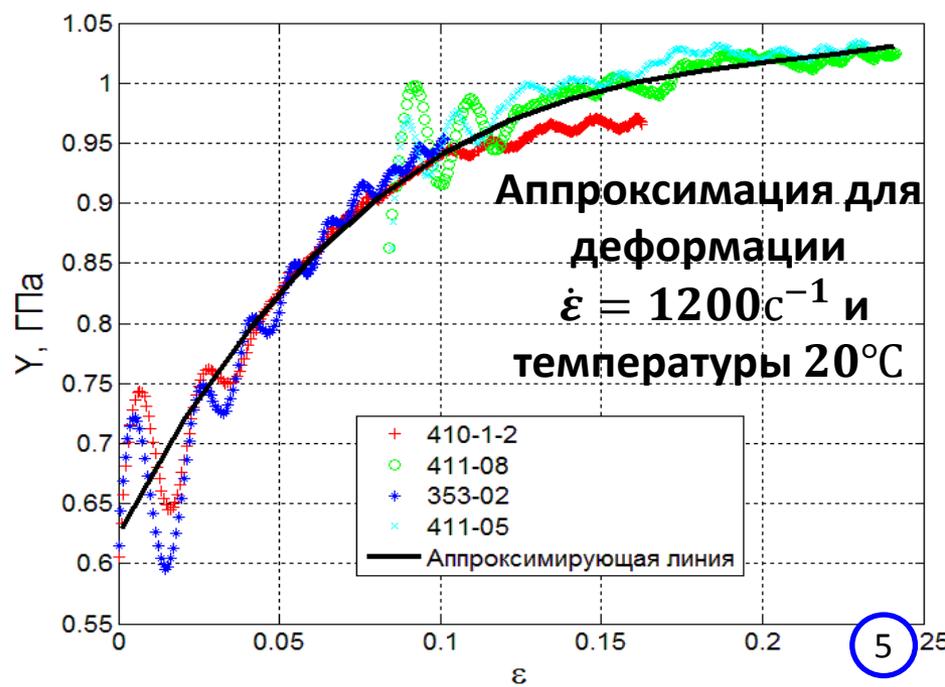
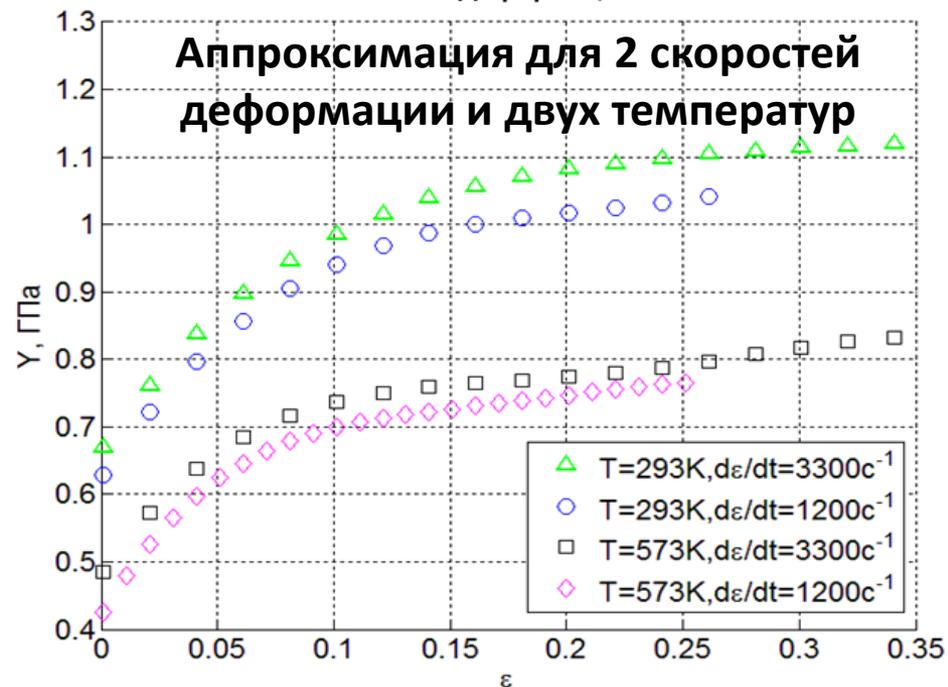
1 – устройство инициирования; 2 – шашка ВВ; 3 – сохраняемый образец; 4 – охрannое стальное кольцо; 5 – приставные пластины искусственного откола

1. Кольский Г. Исследования механических свойств материалов при больших скоростях нагружения. Механика, вып. 4. М.: ИЛ, 1950, 108-119 с.
2. А.М. Bragov, G.T. Gray III, E.A. Kozlov, A.K. Lomunov, A.V. Petrovtsev, et al., J. Phys. France IV, 2003, vol. 110, pp. 761-766.

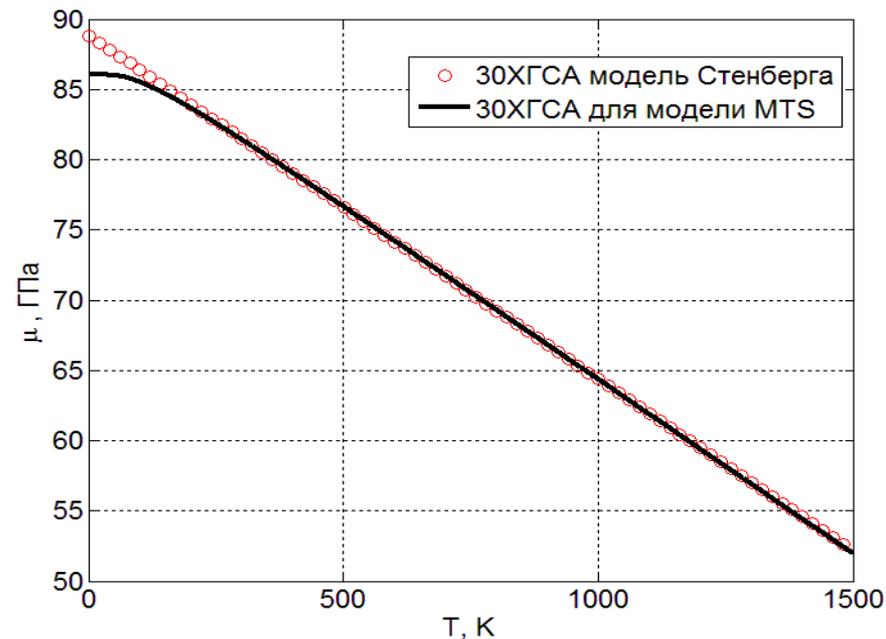
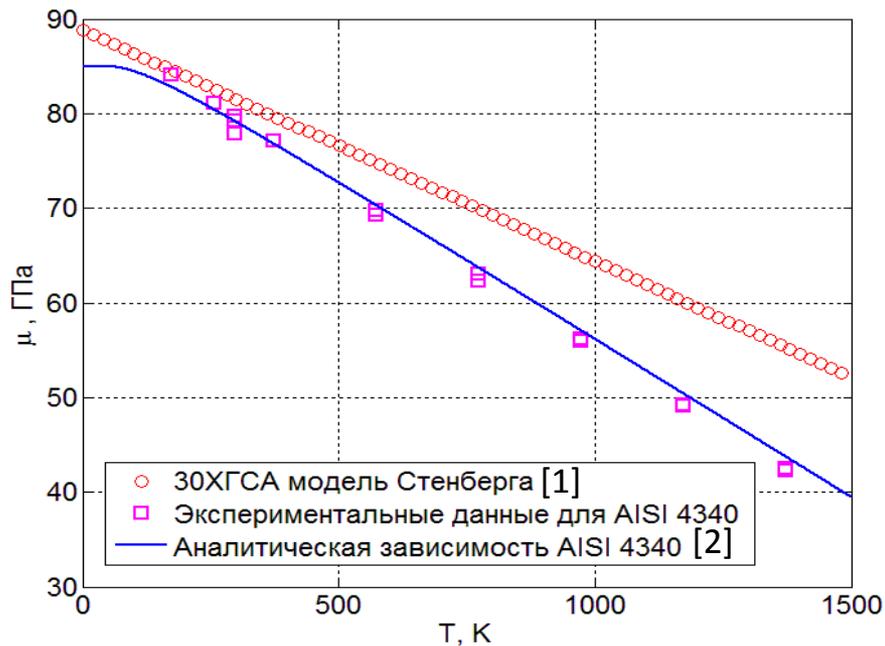
Анализ экспериментальных данных



Объединённые динамические диаграммы деформирования образцов из исходного состояния и после УВН в области α -фазы для скорости деформации $\dot{\epsilon} = 1200 \text{с}^{-1}$ и температуры 20°C , а также квазистатическое испытание



Определение модуля сдвига



$$\mu(P, \rho, T) = \mu_0 \left(1 + A_p \frac{P}{\delta^3} - \frac{B_T}{\exp\left(\frac{T_0}{T}\right) - 1} \right) - \text{MTS модель} \quad (1)$$

Введем дополнительный коэффициент C_μ для лучшего согласования моделей

$$\text{При } P = 0, \mu(T) = \mu_0 \left(1 - \frac{B_T}{\exp\left(C_\mu \frac{T_0}{T}\right) - 1} \right)$$

$B_T = 0,081, C_\mu = 0,9323, \mu_0 = 86,028$ ГПа - модуль сдвига при 0К.

1. A constitutive model for metals applicable at highstrain rate./ D. J. Steinberg, S. G. Cochran, and M. W. Guinan. J. Appl. Phys. 51, 1980.
2. Banerjee B. The Mechanical Threshold Stress model for various tempers of AISI 4340 steel. International Journal of Solids and Structures 44 834-859(2007).

Модель сдвиговой прочности MTS

$$Y = Y_a + \frac{\mu(P, \rho, T)}{\mu_0} \max\{[Y_i(\dot{\varepsilon}, T) + Y_\varepsilon(\dot{\varepsilon}, T)], Y_R(\dot{\varepsilon}, T)\}, \quad (2)$$

Y_a — независящая от температуры компонента; Y_i — передает зависимость сдвиговых напряжений в соответствии с термофлуктуационным режимом движения дислокаций; Y_ε — учитывает изменение плотности дислокаций и связанное с этим деформационное упрочнение; Y_R — учитывает изменение сдвиговых напряжений на высокоскоростной ветви деформации (будет рассмотрено далее).

$$Y_i = W_i(\dot{\varepsilon}, T)\hat{Y}_i; \quad Y_\varepsilon = W_\varepsilon(\dot{\varepsilon}, T)\hat{Y}_\varepsilon(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T), \quad (3)$$

$$W_i(\dot{\varepsilon}, T) = \left\{ 1 - \left(\frac{T \ln \frac{\varepsilon_0 i}{\dot{\varepsilon}}}{\mu G_{0i}} \right)^{\frac{1}{q_i}} \right\}^{\frac{1}{p_i}}, \quad W_\varepsilon(\dot{\varepsilon}, T) = \left\{ 1 - \left(\frac{T \ln \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\dot{\varepsilon}}}{\mu G_{0\varepsilon}} \right)^{\frac{1}{q_\varepsilon}} \right\}^{\frac{1}{p_\varepsilon}}. \quad (4)$$

С помощью введения G_{0i} и $G_{0\varepsilon}$ объединяют ряд констант для упрощения записи:

$$G_{0i} = \frac{g_{0i} b^3}{k}; \quad G_{0\varepsilon} = \frac{g_{0\varepsilon} b^3}{k}. \quad (5)$$

1. P. S. Follansbee and U. F. Kocks - A constitutive description of the deformation of copper on the use of the mechanical threshold stress as an internal state variable. / Acta metal. Vol. 36, No. 1, pp. 81-93, 1988.
2. U. F. Kocks- Realistic constitutive relations for metal plasticity/ Materials Science and Engineering A 317 (2001), pp. 181-187

Модель сдвиговой прочности, деформационное упрочнение

$$\frac{d\hat{Y}_\varepsilon}{d\varepsilon} = \theta_0 \left[1 - C_{1\varepsilon} \frac{\tanh\left(\alpha_1 \frac{\hat{Y}_\varepsilon}{\hat{Y}_{\varepsilon S}(\dot{\varepsilon}, T)}\right)}{\tanh(\alpha_1)} - C_{2\varepsilon} \frac{\hat{Y}_\varepsilon}{\hat{Y}_{\varepsilon S}(\dot{\varepsilon}, T)} \right]^{\alpha_2}, \quad (6)$$

θ_0 – начальное значение модуля упрочнения;

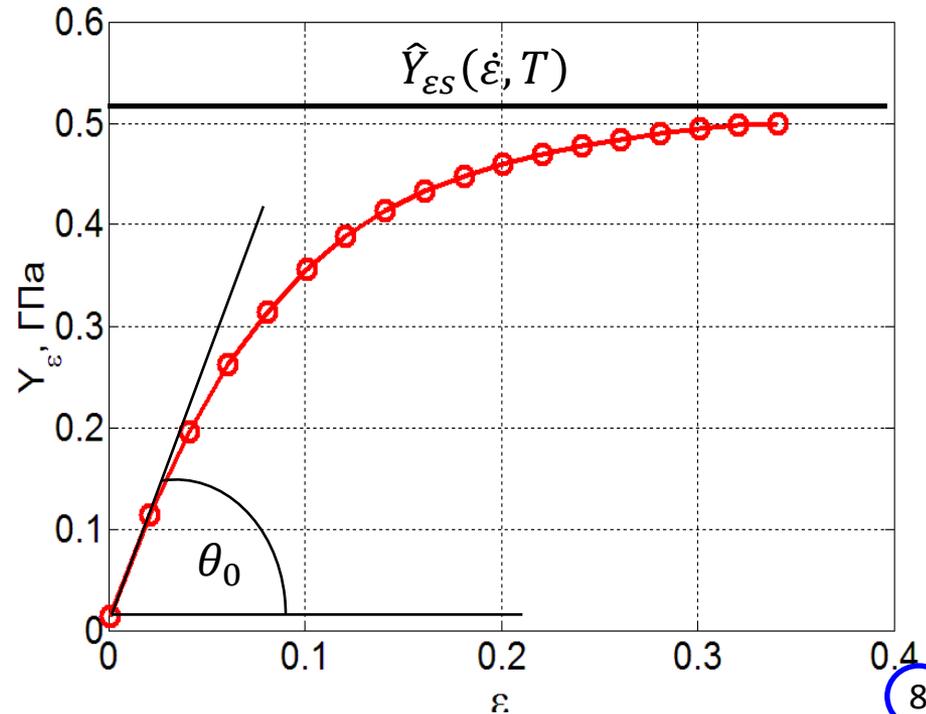
$$\Theta_0 = \Theta_{00} + C_{1\Theta} \ln(\dot{\varepsilon}) + C_{2\Theta} \dot{\varepsilon} - C_{3\Theta} \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right), \quad (7)$$

$$\hat{Y}_{\varepsilon S} = \hat{Y}_{0\varepsilon S} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{0\varepsilon S}} \right)^{\frac{T}{\mu G_{0\varepsilon S}}}, \quad (8)$$

$\hat{Y}_{\varepsilon S}(\dot{\varepsilon}, T)$ – предельное напряжение насыщения.

$\hat{Y}_{0\varepsilon S}$ – напряжение насыщения при 0 К.

$\dot{\varepsilon}_{0\varepsilon S}, G_{0\varepsilon S}$ – константы $G_{0\varepsilon S} = \frac{g_{0\varepsilon S} b^3}{k}$.



Определение независимой компоненты Y_a

Y_a – MTS (Mechanical Threshold Stress – Пороговое Механическое Напряжение)

$$Y_a = \left(Y_{0a} + k \left(\frac{\sqrt{d_0} - \sqrt{d}}{\sqrt{d_0 d}} \right) \right)$$

где d_0 – принятый за «эталонный» размер зерна;

Y_{0a} – типичное для данного металла с выбранным «эталонным» зерном значение;

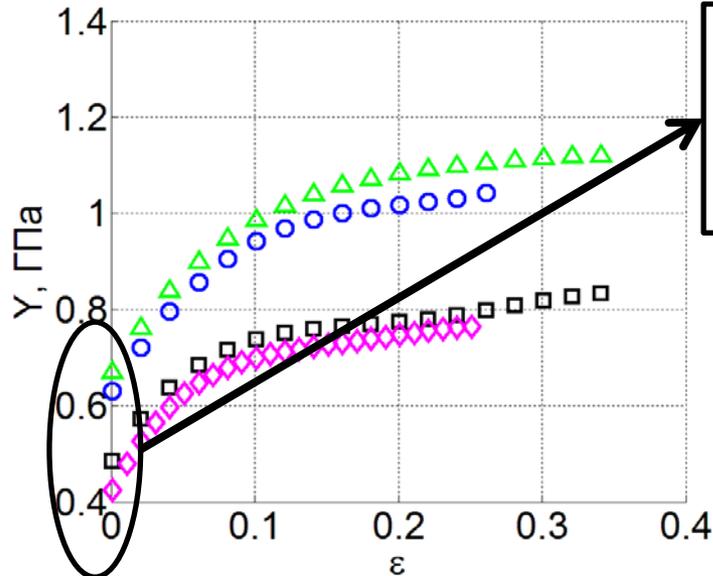
k – константа.

Хим. элемент	30ХГСА	AISI-4340	HY-100
C	0.29	0.3–0.38	0.1–0.18
Cr	0.97	1.3–1.7	1.0–1.9
Mn	0.99	0.5–0.8	0.1–0.4
Si	1.11	≤0.4	0.08–0.38
P	0.016	≤0.035	<0.015
S	0.005	≤0.035	<0.04
Mo	≤0.01	0.15–0.3	0.2–0.65
Ni	≤0.07	1.3–1.7	2.25–3.5
V	<0.01	–	<0.03
T	<0.01	–	<0.02
Cu	–	–	<0.25

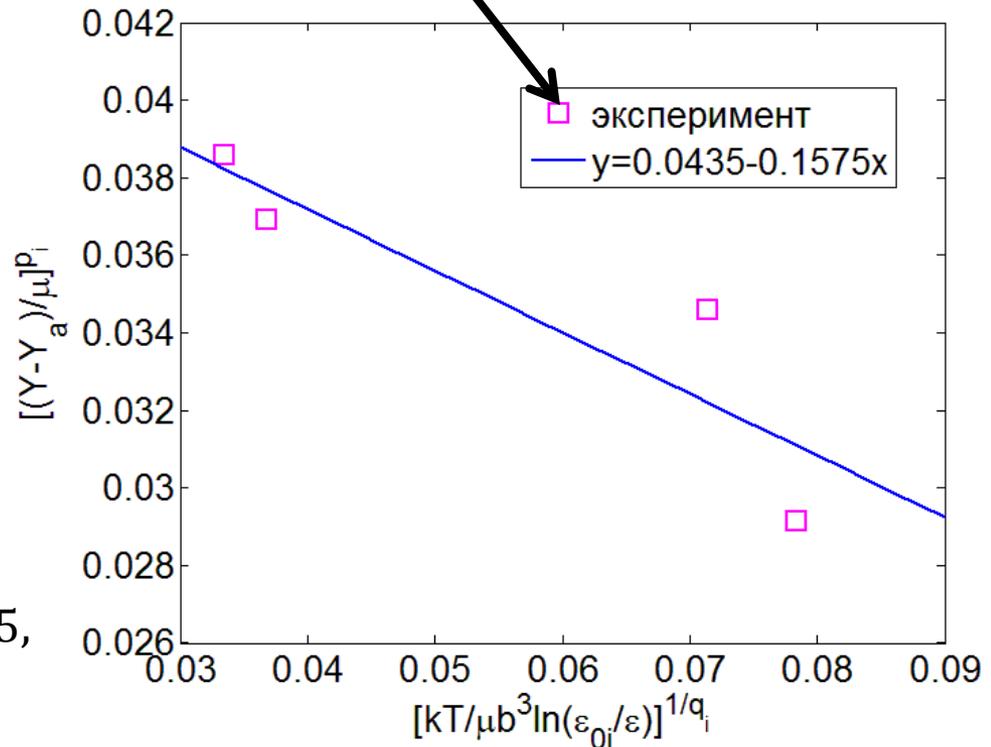
Примем значение $Y_a = 50 \text{ МПа}$ основываясь на величине, используемой для материалов со схожим составом: стали AISI 4340 (в работе [1]) и стали HY-100 (в работе [2])

- Banerjee B. The Mechanical Threshold Stress model for various tempers of AISI 4340 steel. International Journal of Solids and Structures 44 834-859(2007).
- Goto D.M. Mechanical Threshold Stress constitutive strength model description of HY-100 steel. / Indian Head Division Naval Surface Warfare Center, Indian Head, MD 20640-5035, 1999.

Определение \hat{Y}_i, g_{0i}



$$\left(\frac{Y - Y_a}{\mu}\right)^{p_i} = \left(\frac{\hat{Y}_i}{\mu_0}\right)^{p_i} \left\{ 1 - \left(\frac{1}{g_{0i}}\right)^{\frac{1}{q_i}} \left(\frac{kT}{\mu b^3} \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_{0i}}{\dot{\epsilon}}\right)\right)^{\frac{1}{q_i}} \right\}$$



Значения констант необходимых для определения \hat{Y}_i, g_{0i} из [1]

$$\dot{\epsilon}_{0i} = 10^8 \text{ c}^{-1}, p_i = 2/3 \text{ И } q_i = 1$$

$$\left(\frac{\hat{Y}_i}{\mu_0}\right)^{p_i} = 0,0435, \quad \left(\frac{\hat{Y}_i}{\mu_0}\right)^{p_i} \left(\frac{1}{g_{0i}}\right)^{\frac{1}{q_i}} = 0,1575,$$

$$\hat{Y}_i = 781,0369 \text{ МПа}, \quad g_{0i} = 0,2763$$

1. Banerjee B. The Mechanical Threshold Stress model for various tempers of AISI 4340 steel. International Journal of Solids and Structures 44 834-859(2007).

Определение $Y_{0\epsilon s}$, $g_{0\epsilon s}$

Графики деформационного упрочнения

$$\hat{Y}_\epsilon = \frac{1}{W_\epsilon} \left[\frac{\mu_0}{\mu} (Y - Y_a) - W_i \hat{Y}_i \right]$$

Напряжение насыщения $\hat{Y}_{\epsilon s}$

Из работы [1], возьмем следующие значения

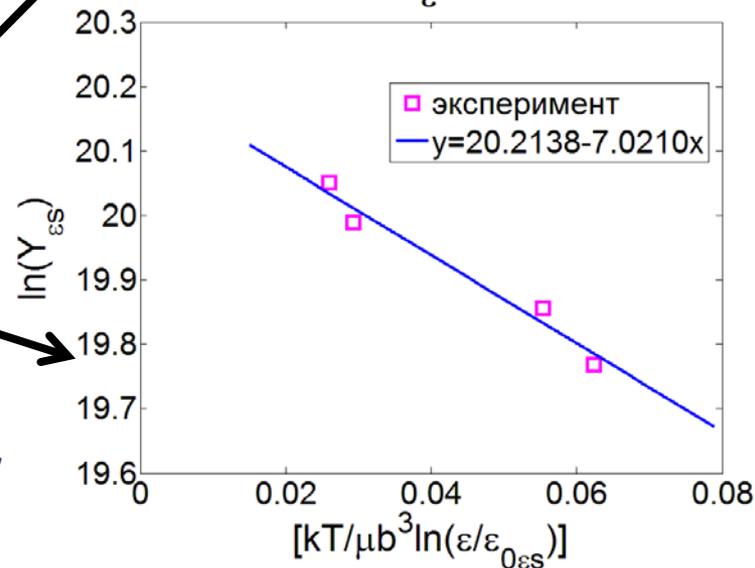
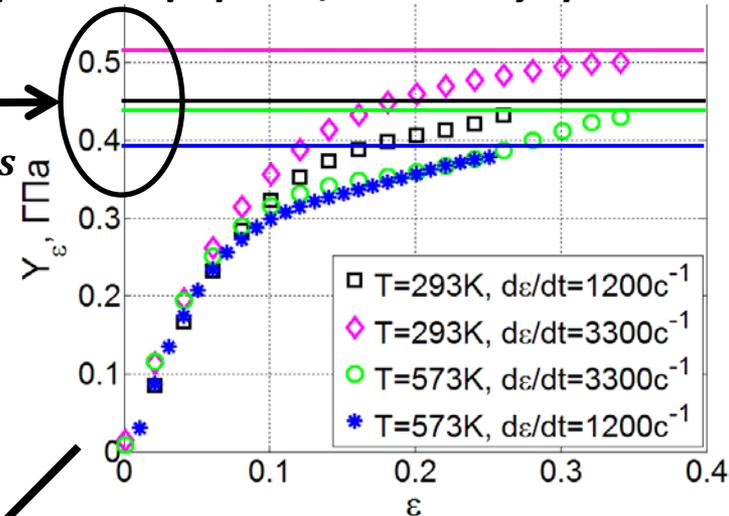
переменных: $\dot{\epsilon}_{0e} = 10^7 c^{-1}$, $\dot{\epsilon}_{0\epsilon s} = 10^7 c^{-1}$,

$p_e = 2/3$, $q_e = 1$, $q_{0e} = 1,6$.

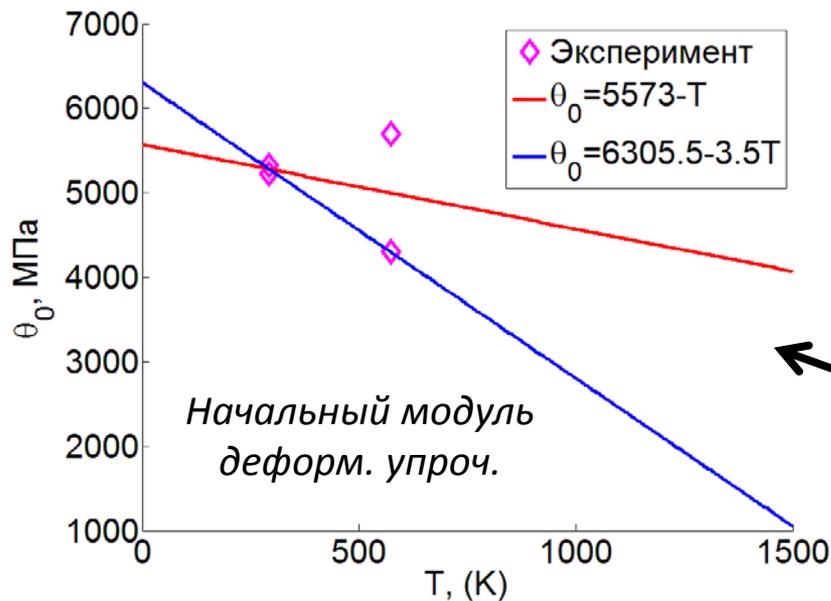
Из $\hat{Y}_{\epsilon s} = \hat{Y}_{0\epsilon s} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{0\epsilon s}} \right)^{\frac{T}{\mu g_{0\epsilon s} b^3}}$ получим

$$\ln \hat{Y}_{\epsilon s} = \ln \hat{Y}_{0\epsilon s} - \frac{kT}{\mu g_{0\epsilon s} b^3} \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{0\epsilon s}} \right)$$

$$Y_{0\epsilon s} = e^{20.2138} \cdot [\text{МПА}] = 600,816, \quad g_{0\epsilon s} = \frac{1}{7.0210} = 0,1424$$

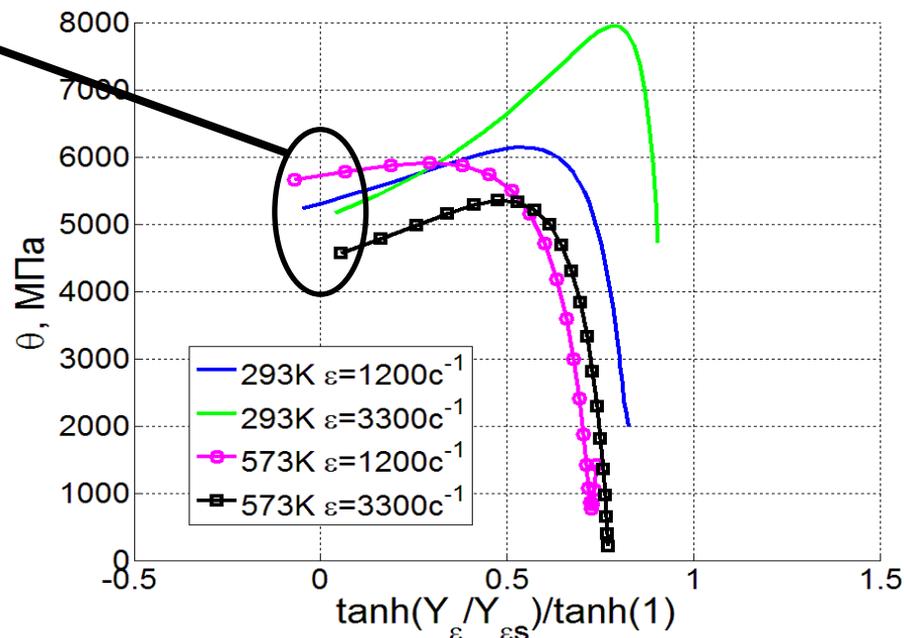


Деформационное упрочнение

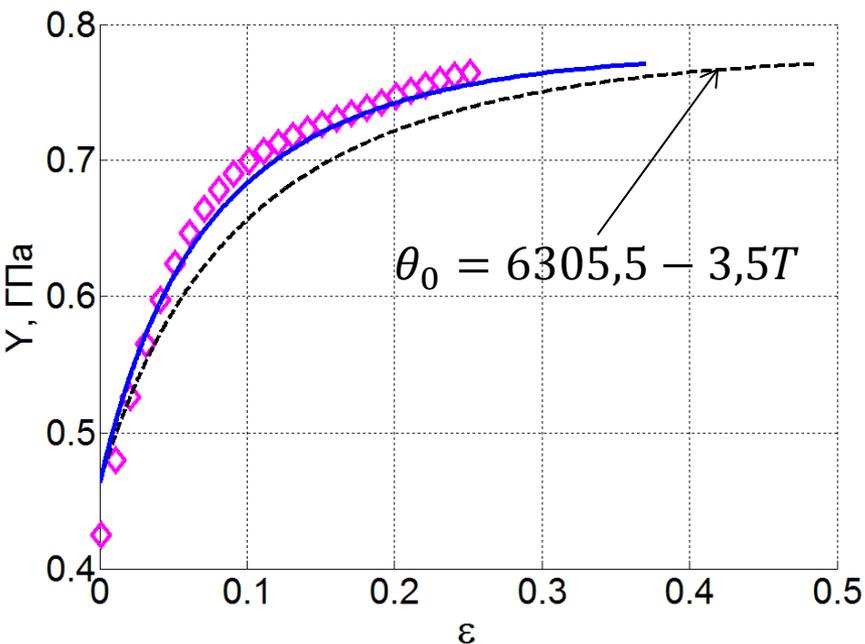


$$\frac{d\hat{Y}_\varepsilon}{d\varepsilon} = \theta_0 \left[1 - C_{1\varepsilon} \frac{\tanh\left(\frac{\hat{Y}_\varepsilon}{\hat{Y}_{\varepsilon S}(\dot{\varepsilon}, T)}\right)}{\tanh(1)} \right],$$

$$F = \tanh\left(\frac{\hat{Y}_\varepsilon}{\hat{Y}_{\varepsilon S}(\dot{\varepsilon}, T)}\right) / \tanh(1)$$

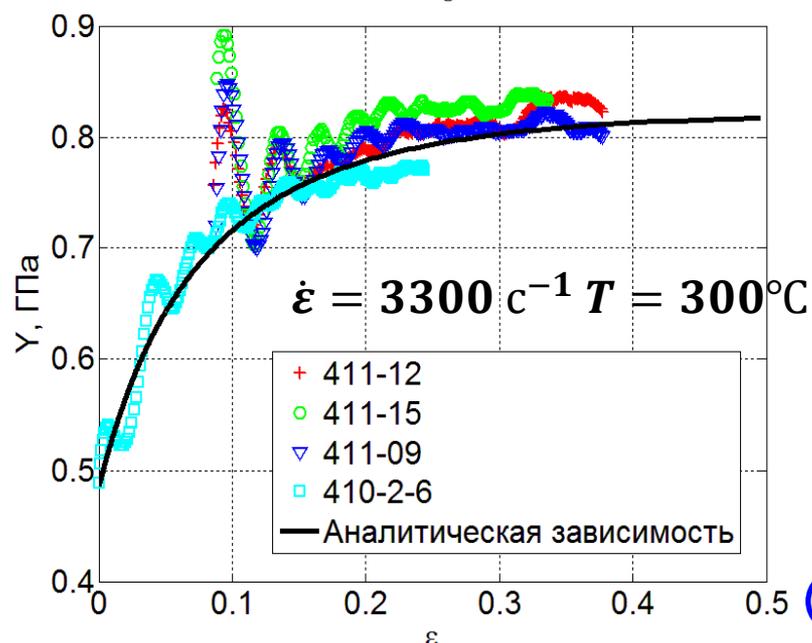
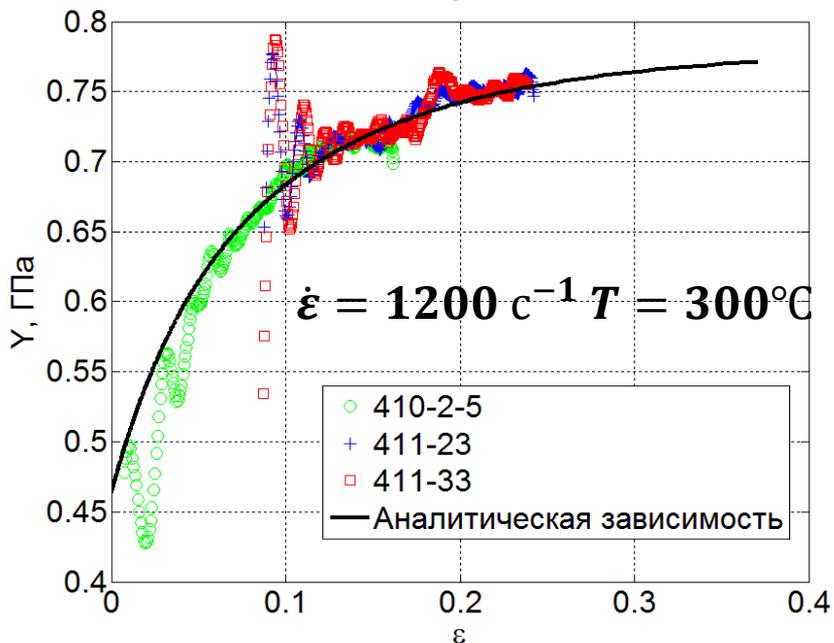
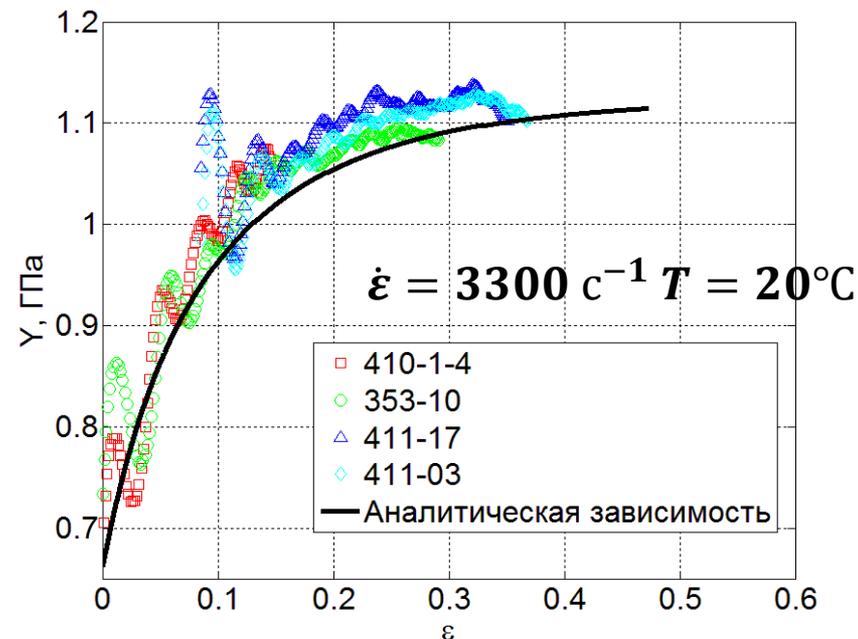
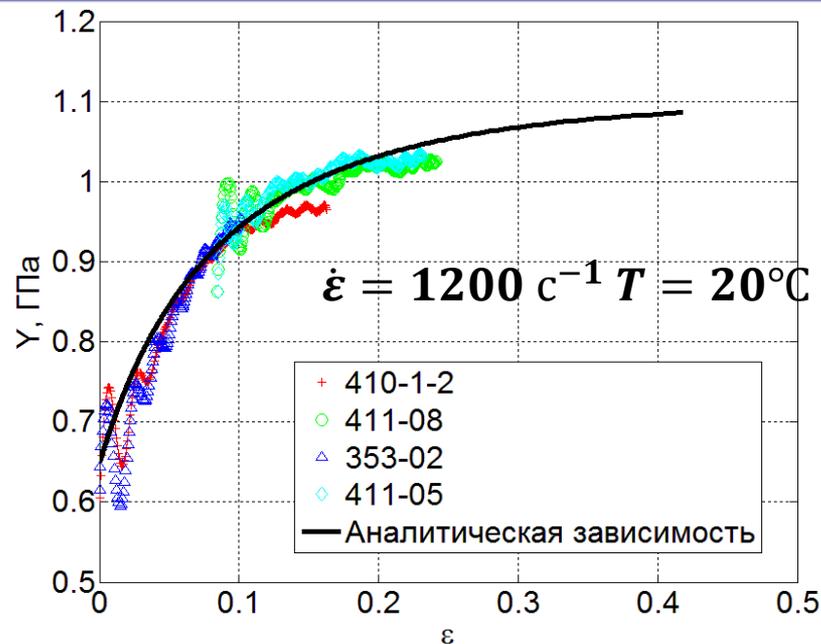


Графики зависимости модуля деформационного упрочнения от функции F



— $\theta_0 = 5148 + 150 \ln(\dot{\varepsilon}) - 630\left(\frac{T}{T_0} - 1\right)$

Сравнение результатов с экспериментом



Высокоскоростная ветвь деформации

Описание зависимости сдвиговых напряжений от скорости деформации на высокоскоростной ветви определяется

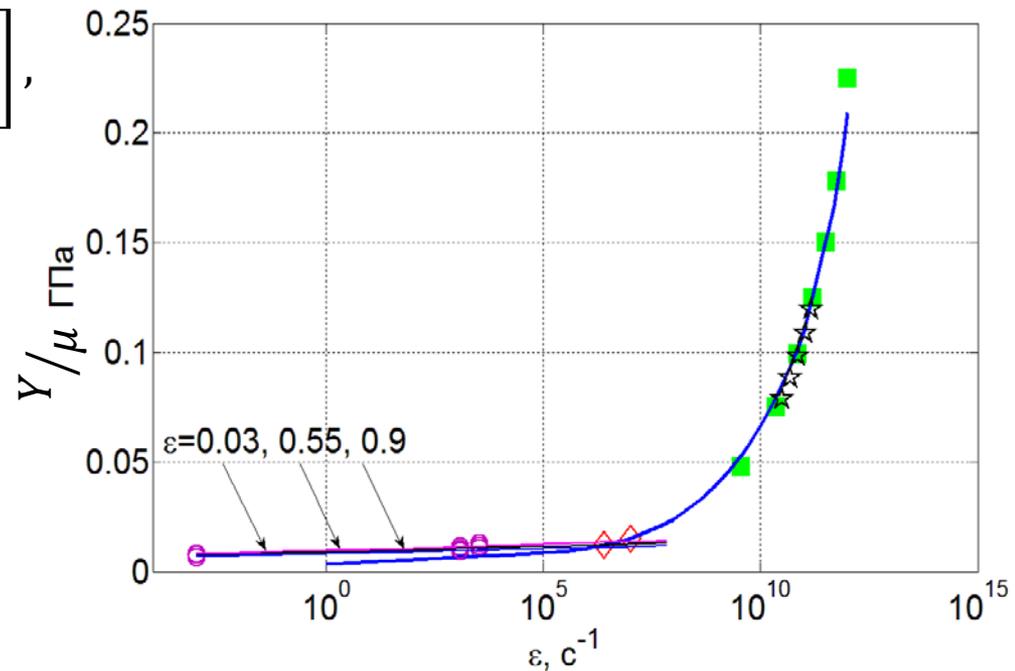
$$Y_R = Y_{Rs} - (Y_{Rs} - Y_{Ri}) \exp \left[- \left(\frac{\theta_R \varepsilon}{Y_{Rs} - Y_{Ri}} \right) \right],$$

$$Y_{Ri} = \hat{Y}_{0R1} \left[\left(\frac{\mu}{\mu_0} \right)^{C_{R1}} (\delta)^{C_{R2}} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{0R}} \right)^{C_{R3}} \right],$$

$$Y_{Rs} = \hat{Y}_{0R2} \left[\left(\frac{\mu}{\mu_0} \right)^{C_{R1}} (\delta)^{C_{R2}} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{0R}} \right)^{C_{R4}} \right],$$

$\delta = \frac{\rho}{\rho_0}$ – сжатие материала;

$\theta_R, \hat{Y}_{0R1}, \hat{Y}_{0R2}, \dot{\varepsilon}_{0R}, C_{R1}, C_{R2}, C_{R3}, C_{R4}$ – константы.

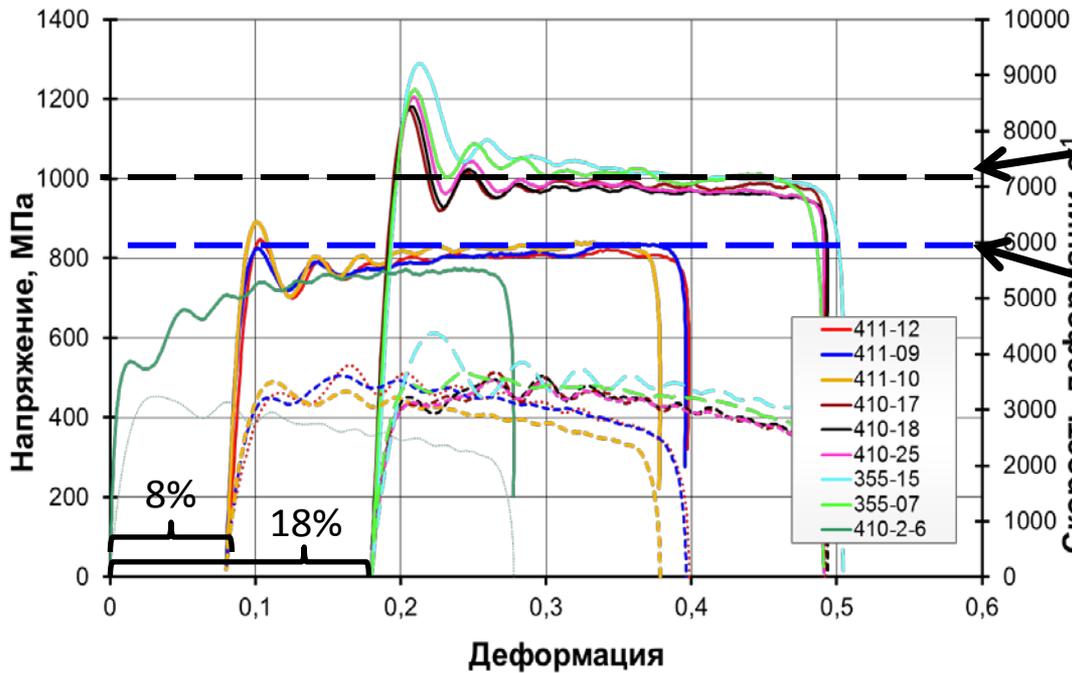


Расчет с использованием проводится в пределах области скоростей деформации, при которых $Y_{Ri} \leq Y_{Rs}$. При более высоких скоростях принимается $Y_{Ri} = Y_{Rs}$.

$\theta_R, \text{ГПа}$	$\hat{Y}_{0R1}, \text{ГПа}$	$\hat{Y}_{0R2}, \text{ГПа}$	$\dot{\varepsilon}_{0R}, \text{с}^{-1}$	C_{R1}	C_{R2}	C_{R3}	C_{R4}
90	1	14	10^{12}	0	4	1	0.136

1. Tonks D.L. The datashop: A database of weak-shock constitutive data., Los Alamos National Laboratory Report, LA-12068-MS, 1991.
2. A.M. Bragov, G.T. Gray III, EA. Kozlov, A.K. Lomunov, A.V. Petrovtsev, et al., J. Phys. France IV, 2003, vol. 110, pp. 761-766.

Полиморфное α - ϵ превращение

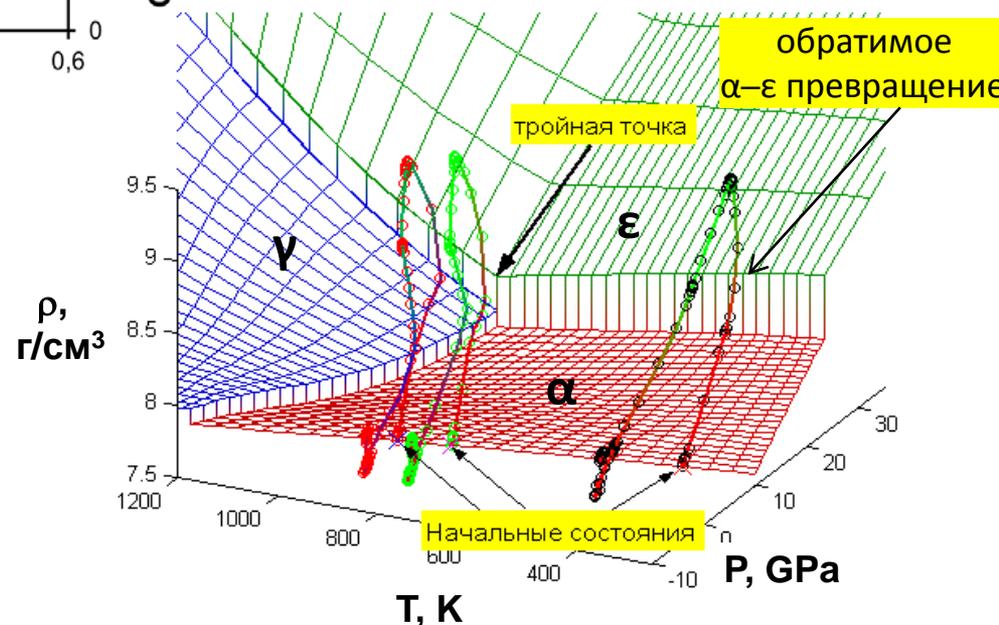


Предельное значение сдвиговых напряжений после α - ϵ перехода

Предельное значение сдвиговых напряжений при деформировании с сохранением исходной фазы

Для увеличения сдвиговых напряжений, вызванных протеканием обратимого α - ϵ превращения, необходимо повысить значение напряжения насыщения

$$\hat{Y}_{\epsilon S} = \hat{Y}_{0\epsilon S} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{0\epsilon S}} \right)^{\frac{T}{\mu G_{0\epsilon S}}}$$



Модификация модели для учета α - ε превращения

$$\widehat{Y}_{\varepsilon S} = (\widehat{Y}_{0\varepsilon S} + \widehat{Y}_{\xi S}) \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{0\varepsilon S}} \right)^{\frac{T}{\mu G_{0\varepsilon S}}}, \quad (9)$$

$$\widehat{Y}_{\xi S} = \left(C_{1\xi} \ln \dot{\varepsilon} + C_{2\xi} \frac{T}{T_0} \right) \cdot F(\xi) \quad (10)$$

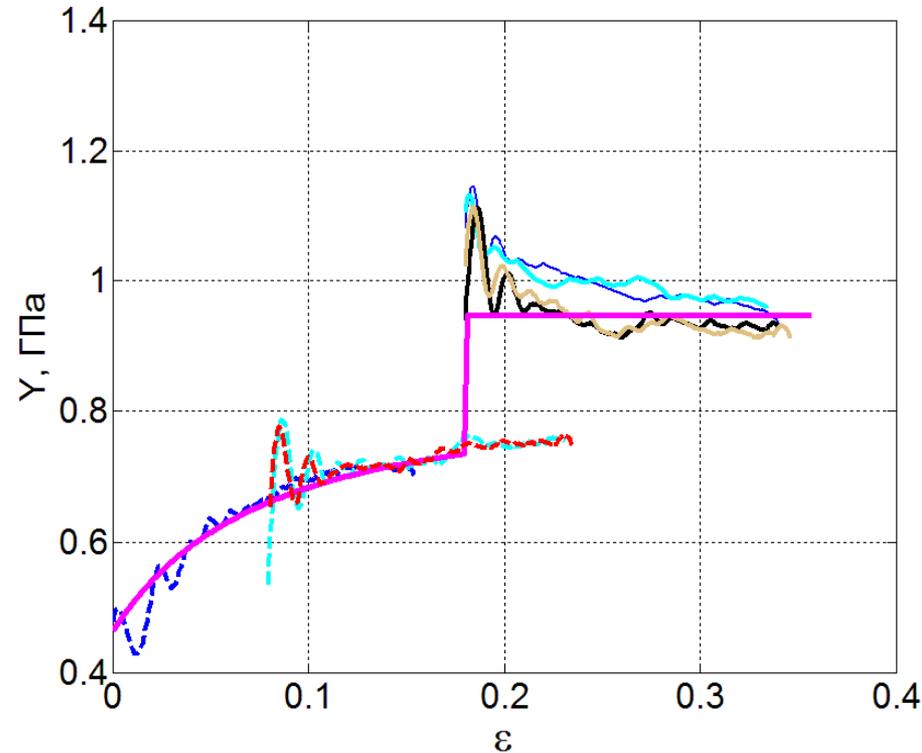
где $C_{1\xi}, C_{2\xi}$ – константы для материала;
 $F(\xi)$ – множитель, зависящий от количества наработанной ε -фазы $\xi(t)$:

$$F(\xi) = \begin{cases} \xi(t), & d\xi \geq 0 \\ const, & d\xi < 0 \end{cases}.$$

$$\widehat{Y}_{\varepsilon} = \widehat{Y}_{\varepsilon}^{\alpha} + \widehat{Y}_{\varepsilon}^{\xi}, \quad (11)$$

где $\widehat{Y}_{\varepsilon}^{\alpha}$ – рассчитывается по выражениям;
 $\widehat{Y}_{\varepsilon}^{\xi}$ – характеризует увеличение предела текучести в результате α - ε превращения.

$$\widehat{Y}_{\varepsilon}^{\xi} = \left(C_{3\xi} \ln \dot{\varepsilon} + C_{4\xi} \frac{T}{T_0} \right) \cdot F(\xi), \quad \text{где } C_{3\xi}, C_{4\xi} \text{ – константы.}$$



Важно отметить, что при $\widehat{Y}_{\varepsilon} > \widehat{Y}_{\varepsilon S}$, принимаем $\widehat{Y}_{\varepsilon} = \widehat{Y}_{\varepsilon S}$.

В ходе выполнения работы:

1. Проанализированы и систематизированы экспериментальные данные по исследованию поведения стали 30ХГСА при высокоскоростном деформировании
2. Подобраны параметры для задания зависимости модуля сдвига от температуры
3. Откалибрована модель для низкоскоростной ветви деформации (до 10^4 с^{-1})
4. Подобраны параметры для описания высокоскоростной ветви (до 10^{12} с^{-1}) и плавного перехода от низкоскоростной к высокоскоростной ветви
5. Произведена модификация исходной модели с целью учета изменения сдвиговых напряжений в результате протекания обратимого полиморфного α - ϵ превращения

Результат

Получена широкодиапазонная модель для стали 30ХГСА, которая позволяет описывать и прогнозировать поведение материала при различных температурах (от криогенных – до температуры плавления), скоростях деформации (от 10^{-3} с^{-1} до 10^{12} с^{-1}), а также учитывать фазовое α - ϵ превращение.

Спасибо за внимание

