Снежинск, 22 марта 2017

МОДЕЛИ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ, ДВОЙНИКОВАНИЯ И МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ ПОДВЕРГНУТЫХ ИНТЕНСИВНЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

И. Н. БОРОДИН[1-3], А. Е. МАЙЕР[2], С. А. АТРОШЕНКО[1]

[1]*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия*
[2]*Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия*
[3]*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия*

Работа поддержана грантом РФФИ (проект 16-31-60051)

Экспериментальные исследования

- Ограниченный диапазон скоростей деформации
- Измерение макроскопических параметров

Молекулярно-динамические исследования

- Большие скорости деформации
- Измерение энергий активации и микроскопических характеристик

Аналитические модели

- Процессы в малых ансамблях дефектов
- ***Нельзя провести прямого сравнения с механическими испытаниями материала***

Эмпирические модели

- Обычно 5 и более подгоночных параметров
- Малая гибкость
- ***Не несут информации о развитии микроструктуры***

Структурные модели

- Усреднение «элементарных» процессов по представительному объему
- Параметры и физика процессов из МД моделирования и теоретических моделей
- Не более пары подгоночных постоянных из экспериментов

3 СТРУКТУРА ДОКЛАДА

1. Модели пластичности
2. Механические эффекты
3. Микроструктурные эффекты

Уравнения механики сплошной среды

1. Уравнение непрерывности $$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho \upsilon_i)}{\partial x_i}$$

2. Уравнение движения $$\rho \frac{d\upsilon_i}{dt} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \qquad \sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + s_{ij}$$

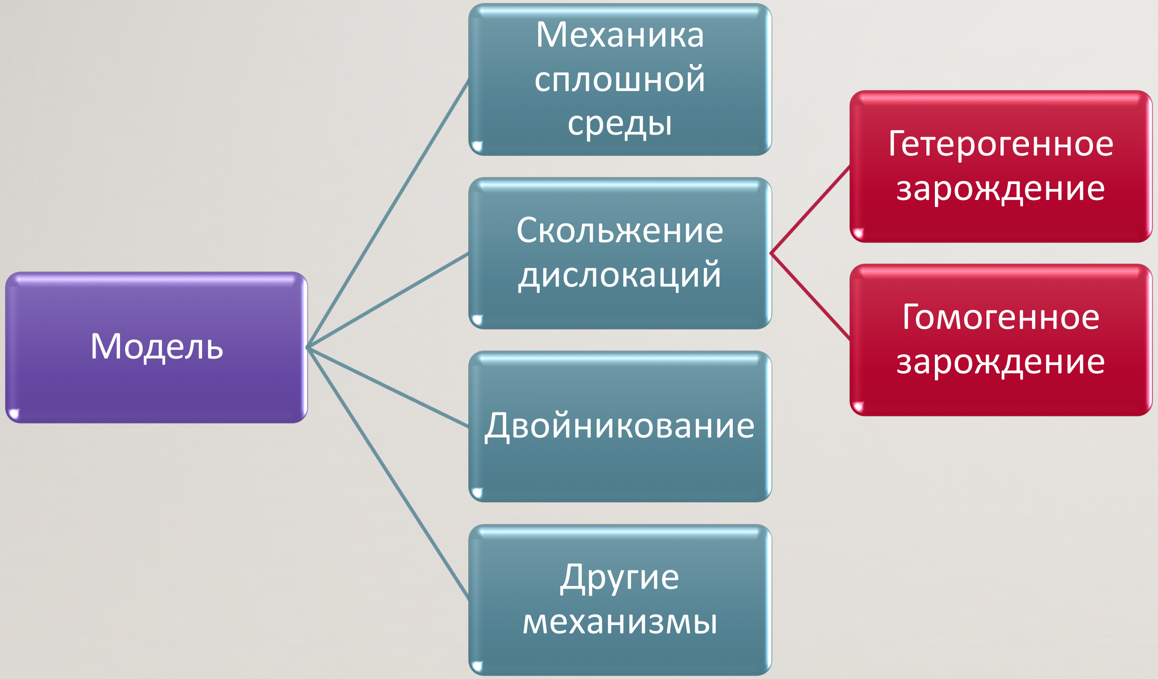
3. Закон сохранения энергии $$\rho \frac{dU}{dt} = \frac{P}{\rho}\frac{d\rho}{dt} + s_{ik}\frac{dw_{ik}}{dt} - \frac{d}{dt}\left[\rho_D \varepsilon_D + N_{TW} S_{TW}^{(1)} \gamma_{SF}\right]$$

4. Девиаторы напряжения $$\frac{ds_{ik}}{dt} = 2G\left(\upsilon_{ik} - \frac{1}{3}\delta_{ik}\upsilon_{ll} - \frac{dw_{ik}^D}{dt} - \frac{dw_{ik}^{gb}}{dt}\right)$$

5. Уравнение состояния $$p = p(\rho, U)$$

*С.Н. Колгатин, А.В. Хачатурьянц // ТВТ, 20 (3) 447 (1982)

5 МОДЕЛЬ ПЛАСТИЧНОСТИ



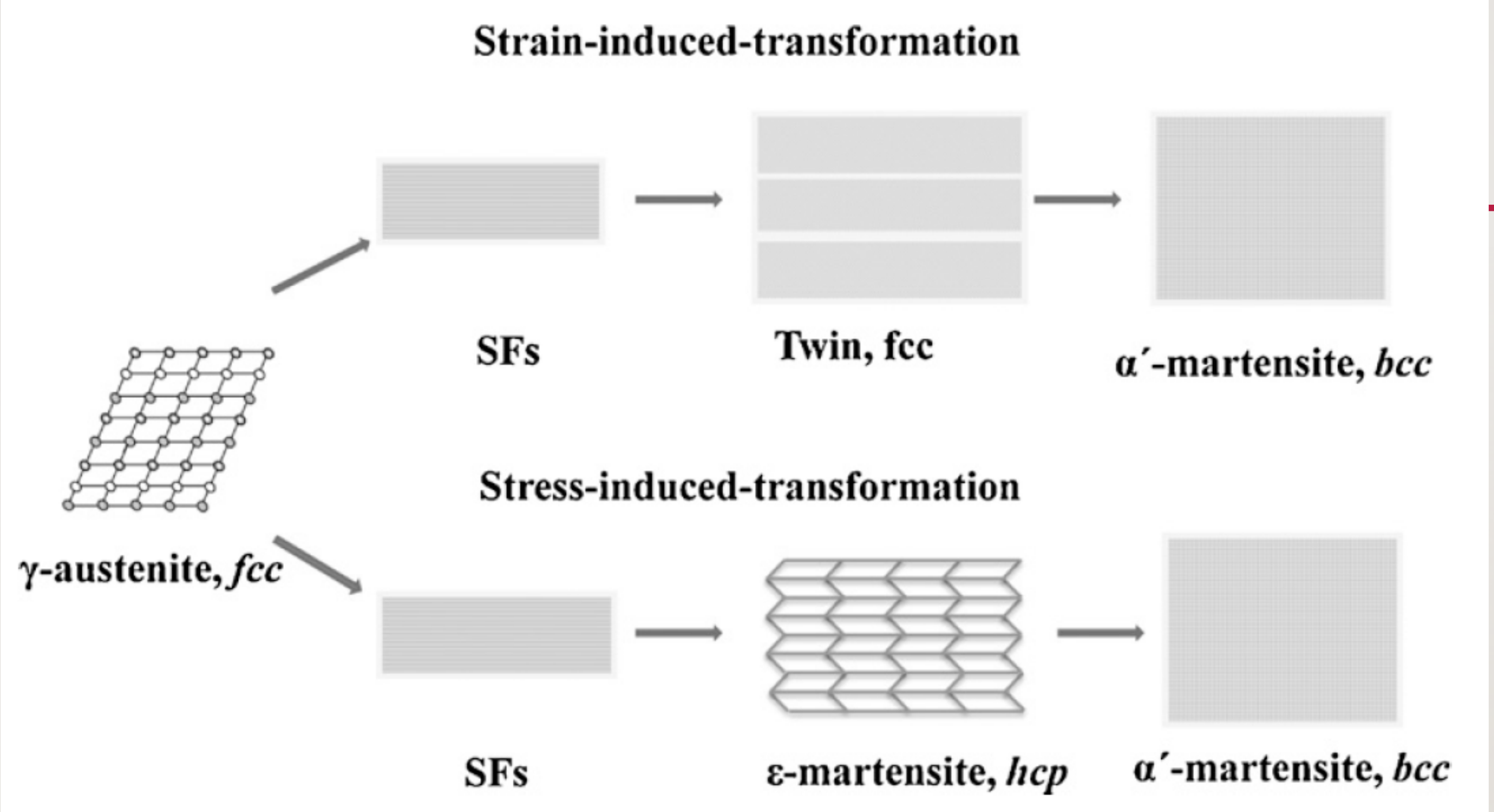
V.S. Krasnikov, A.E. Mayer, A.P. Yalovets // Int. J. Plasticity, 27, 1294 (2011)
V.S. Krasnikov, A.E. Mayer //Serf. Tech. 212, 79 (2012)
A.E. Mayer, K.V. Khishchenko, P.R. Levashov, P.N. Mayer// J. Appl. Phys., 113, 193508 (2013)
E.N. Borodin, A.E. Mayer, P.N. Mayer // Int. J. Plasticity, 51, 188 (2013)
E.N. Borodin, A.E. Mayer //Tech. Phys., 58, 1159 (2013)
A.E. Mayer, E.N. Borodin, V.S. Krasnikov, P.N. Mayer //JPCS, 552, 012002 (2014)
V.S. Krasnikov, A.E. Mayer //MSaEA, 619, 354 (2014)
E.N. Borodin, S.A. Atroshenko, A.E. Mayer //Tech. Phys., 59, 1163 (2014)
E.N. Borodin, A.E. Mayer // Int. J. Plasticity, 74, 141 (2015)
A.E. Mayer, E.N. Borodin //EPJC, 94, 04041 (2015)
E.N. Borodin, A.E. Mayer // JPCS, 653, 012042 (2015)
E.N. Borodin, A.E. Mayer //MSMSE, 24, 025013 (2016)

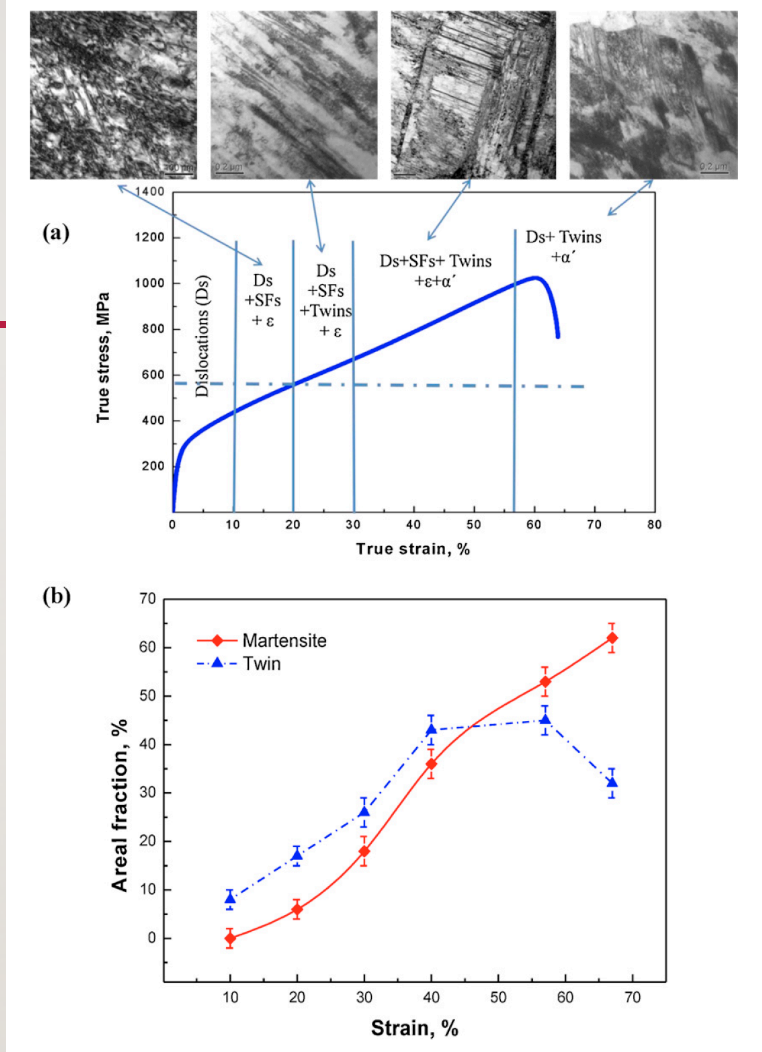
- Дислокации

$$\frac{dw^D_{ik}}{dt} = \frac{1}{2}\sum_{\beta} \rho^{\beta}_D \left(b^{\beta}_i n^{\beta}_j + b^{\beta}_j n^{\beta}_i\right) V^{\beta}_D$$

- Двойники, мартенсит

$$\frac{dw^{gb}}{dt} = \sum_{\gamma} \frac{d\alpha^{\gamma}_{tw}}{dt}\left(\tau^{\gamma}_i n^{\gamma}_k + \tau^{\gamma}_k n^{\gamma}_i\right)\varepsilon_{TW}$$





Y.F. Shen, X.X. Li, X. Sun, Y.D. Wang, L. Zuo Twinning and martensite in a 304 austenitic stainless steel. //Mat.Sci.Engi. A 552 (2012) 514– 522.

7 КИНЕТИКА ДИСЛОКАЦИЙ И ДВОЙНИКОВ

- Дислокации

$$\frac{d\rho_D^\beta}{dt} = Q^+ - Q^-, \quad Q^- = k_\alpha b\left|V_D^\beta\right|\left(\rho_D^\beta\right)^2 - \left|V_D^\beta\right|\rho_D^\beta / d$$

$$Q^+ = \frac{\eta_E}{\varepsilon_\mathrm{D}}\left\{2B\cdot c_\mathrm{t}^2\cdot\left[\frac{1}{\sqrt{1-\left(V_\mathrm{D}^\beta / c_\mathrm{t}\right)^2}}-1\right]+bY^\beta\left|V_\mathrm{D}^\beta\right|\right\}\cdot\rho_\mathrm{D}^\beta$$

- Двойники

$$\alpha^\gamma = \pi\left(R_{TW}^\gamma\right)^2 h_{TW}^\gamma N_{TW}^\gamma$$

$$\dot{N}_{TW} = \frac{Q^-}{4\pi\gamma_{SF}R_0}$$

η_E - доля работы пластической деформации, запасаемая в структуре дефектов

*Ч. Киттель. Введение в физику твердого тела //Наука, М. (1978) 789с

МОДЕЛЬ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ

$$\frac{dw_{ik}^{D}}{dt} = \frac{1}{2}\sum_{\beta} \rho_D^{\beta}\left(b_i^{\beta} n_j^{\beta} + b_j^{\beta} n_i^{\beta}\right) V_D^{\beta}$$

Динамика дислокаций

$$\frac{m_0}{\left[1-\left(V_{\mathrm{D}}^{\beta}/c_{\mathrm{t}}\right)^2\right]^{3/2}} \frac{d_{\mathrm{D}} V_{\mathrm{D}}^{\beta}}{dt} = \left(F_{\mathrm{D}}^{\beta} - \frac{b\sigma_y^{\beta}}{2} \cdot \mathrm{sign}\left(F_{\mathrm{D}}^{\beta}\right)\right) - \frac{B_f \cdot V_{\mathrm{D}}^{\beta}}{\left[1-\left(V_{\mathrm{D}}^{\beta}/c_{\mathrm{t}}\right)^2\right]^{3/2}}$$

Кинетическое уравнение

$$\frac{d\rho_{\mathrm{D}}^{\beta}}{dt} = Q^{+} - \left(\vec{\chi}^{\beta}, \nabla\right)\left[\rho_{\mathrm{D}}^{\beta} \cdot V_{\mathrm{D}}^{\beta}\right] - k_a b \cdot \left|V_{\mathrm{D}}^{\beta}\right| \cdot \left(\rho_{\mathrm{D}}^{\beta}\right)^2 - \frac{\rho_D^{\beta}\left|V_D^{\beta}\right|}{d} + \frac{\rho_{\mathrm{D}}^{\beta}}{\rho}\frac{d\rho}{dt}$$

$$Q^{+} = \frac{\eta_E}{\varepsilon_{\mathrm{D}}}\left\{2B \cdot c_{\mathrm{t}}^2 \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{1-\left(V_{\mathrm{D}}^{\beta}/c_{\mathrm{t}}\right)^2}} - 1\right] + bY^{\beta}\left|V_{\mathrm{D}}^{\beta}\right|\right\} \cdot \rho_{\mathrm{D}}^{\beta}$$

И.Н. Бородин, А.Е. Майер // Физика твердого тела. 2012. Т. 54, № 4. С. 759-766.

A.E. Mayer, K.V. Khishchenko, P.R. Levashov, P.N. Mayer //Appl. Phys. J. 113, 193508, 2013.

МОДЕЛЬ МЕХАНИЧЕСКОГО ДВОЙНИКОВАНИЯ

$$\alpha^{\gamma} = \pi\left(R_{TW}^{\gamma}\right)^2 h_{TW}^{\gamma} N_{TW}^{\gamma}$$

$$\dot{N}_{TW} = \frac{\dot{E}_{TW}^{(-)}}{4\pi\gamma_{SF} R_0} - N_{TW}\dot{R}\left(\frac{1}{\Delta} + \frac{1}{d}\right)$$

$$\dot{E}_{TW}^{(-)} = k_{\alpha} b \left|V_D\right| \rho_D^2 + \rho_D \left|V_D\right| / d$$

$$R_0^{\gamma} = \frac{\gamma_{SF}}{K} + \frac{\Phi}{\pi K} h_0^{\gamma}, \qquad L = \frac{4\pi\gamma_{SF}^2}{3\Phi}\left(1 - \frac{2\Phi}{\pi K}\right)$$

$$h_0^{\gamma} = 0.5\left(\sqrt{L^2 + 4L/K} - L\right) \qquad K = \sum_i \sum_k S_{ik} n_i^{\gamma} \tau_k^{\gamma} \Big/ \sqrt{2}$$

Динамика роста двойников

$$F_R = \frac{4\pi}{\sqrt{2}} R_{tw}^{\gamma} h_{tw}^{\gamma} \sum_i \sum_k S_{ik} n_i^{\gamma} \tau_k^{\gamma} - 2\pi\gamma_{SF}\left(2R_{tw}^{\gamma} + h_{tw}^{\gamma}\right) - \Phi\left(h_{tw}^{\gamma}\right)^2$$

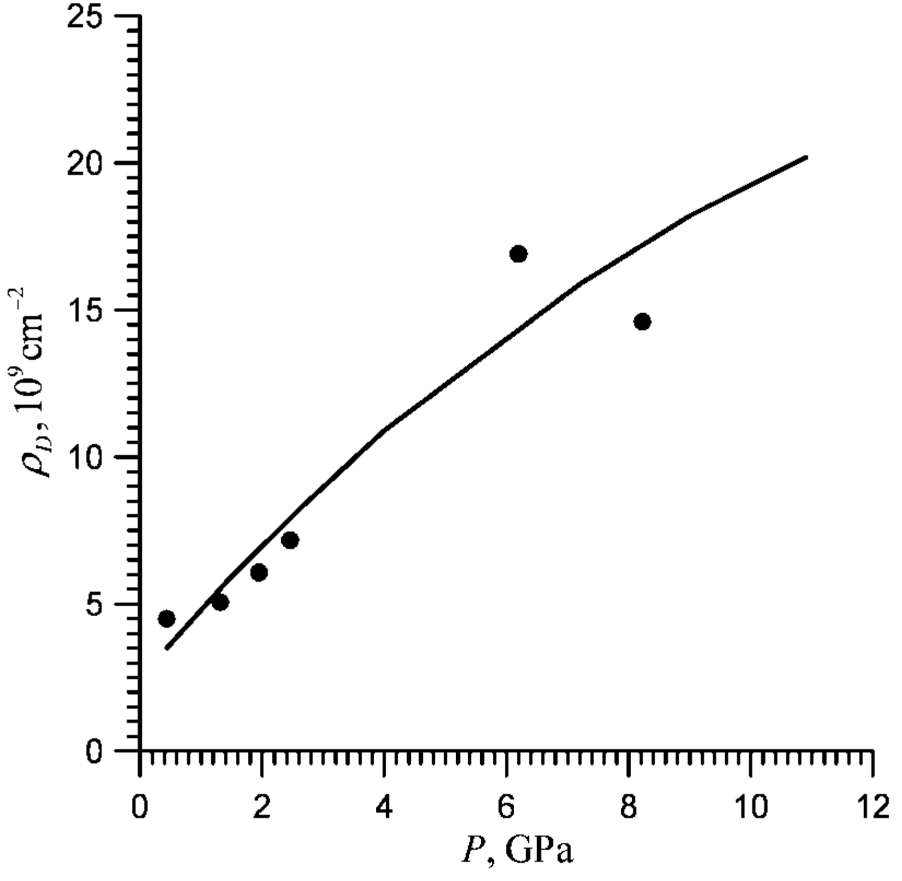
$$F_h = \frac{2\pi}{\sqrt{2}}\left(R_{tw}^{\gamma}\right)^2 \sum_i \sum_k S_{ik} n_i^{\gamma} \tau_k^{\gamma} - 2\pi\gamma_{SF} R_{tw}^{\gamma} - 2\Phi R_{tw}^{\gamma} h_{tw}^{\gamma}$$

$$\Phi = \frac{2\pi^2}{3\sqrt{2}} \frac{(2-\nu)}{(1-\nu)} G$$

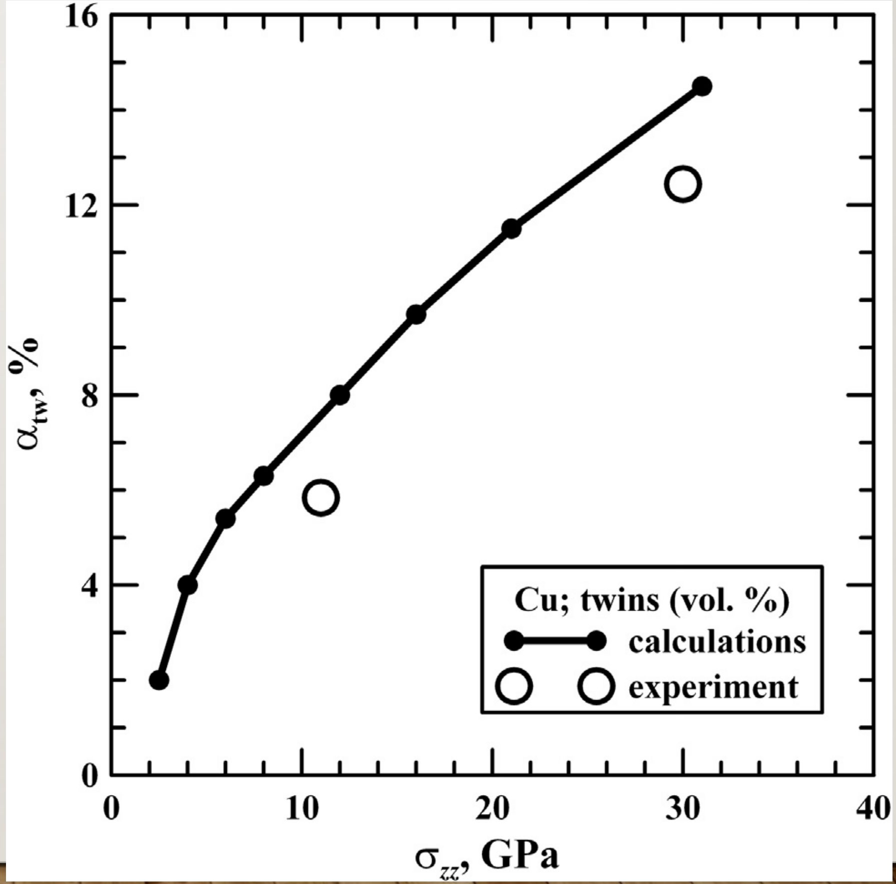
$$\dot{R}_{tw}^{\gamma} 2\left(1 - \left(\dot{R}_{tw}^{\gamma}/c_t\right)^2\right)^{-3/2} = bF_R^{\gamma}\left(2\pi R_{tw}^{\gamma} h_{tw}^{\gamma} B^{part}\right)^{-1}$$

$$\dot{h}_{tw}^{\gamma}\left(1 - \left(R_{tw}^{\gamma}\dot{h}_{tw}^{\gamma}\right)^2 / \left(bc_t\right)^2\right)^{-3/2} = bF_h^{\gamma}\left(\pi\left(R_{tw}^{\gamma}\right)^2 B^{part}\right)^{-1}$$

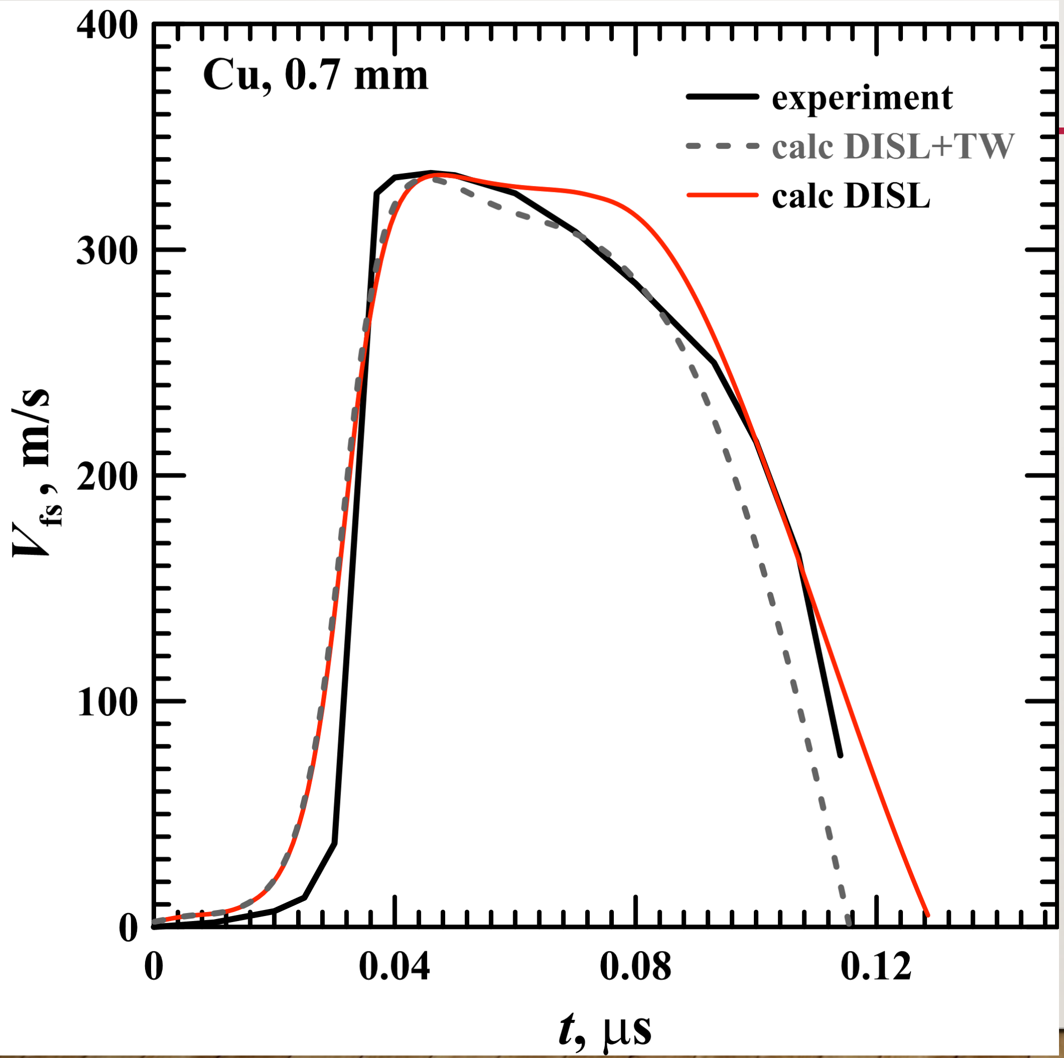
10 СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

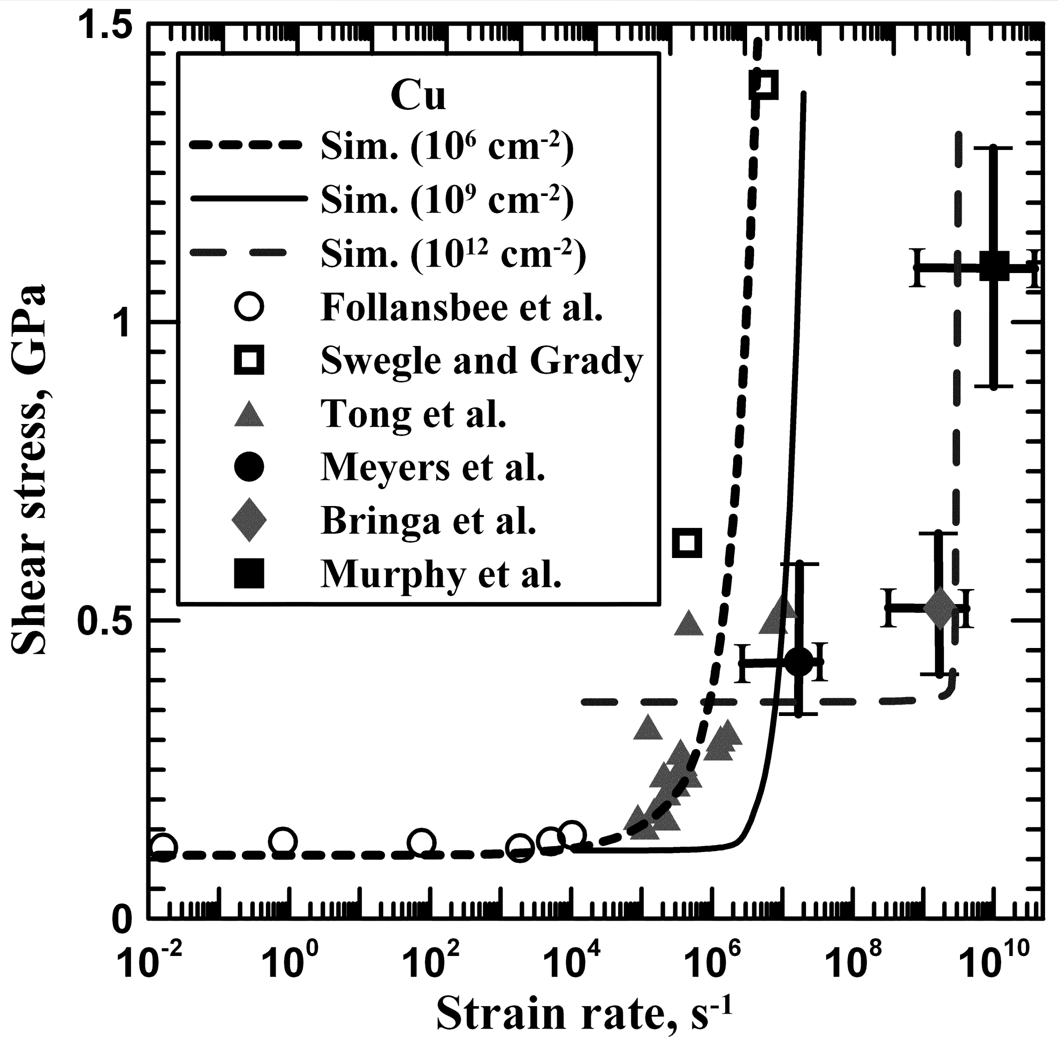


V.S. Krasnikov, A.E. Mayer, A.P. Yalovets // Int. J. Plasticity, 27, 1294 (2011)



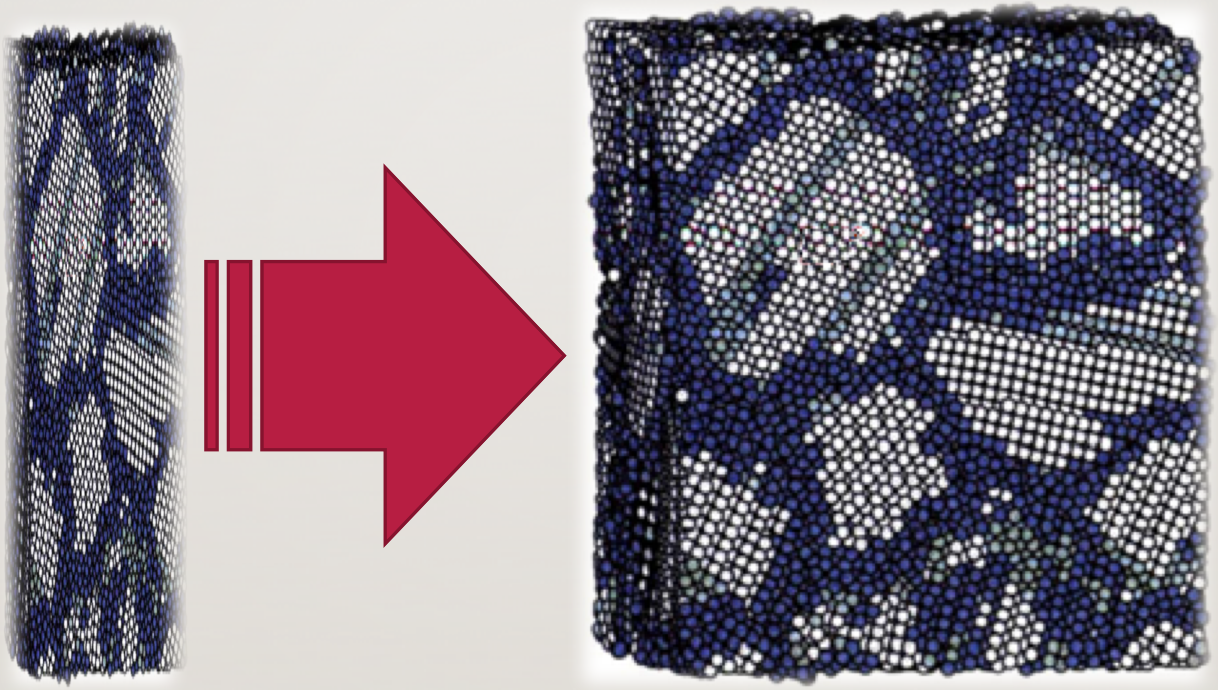
E.N. Borodin, A.E. Mayer // Int. J. Plasticity, 74, 141 (2015)



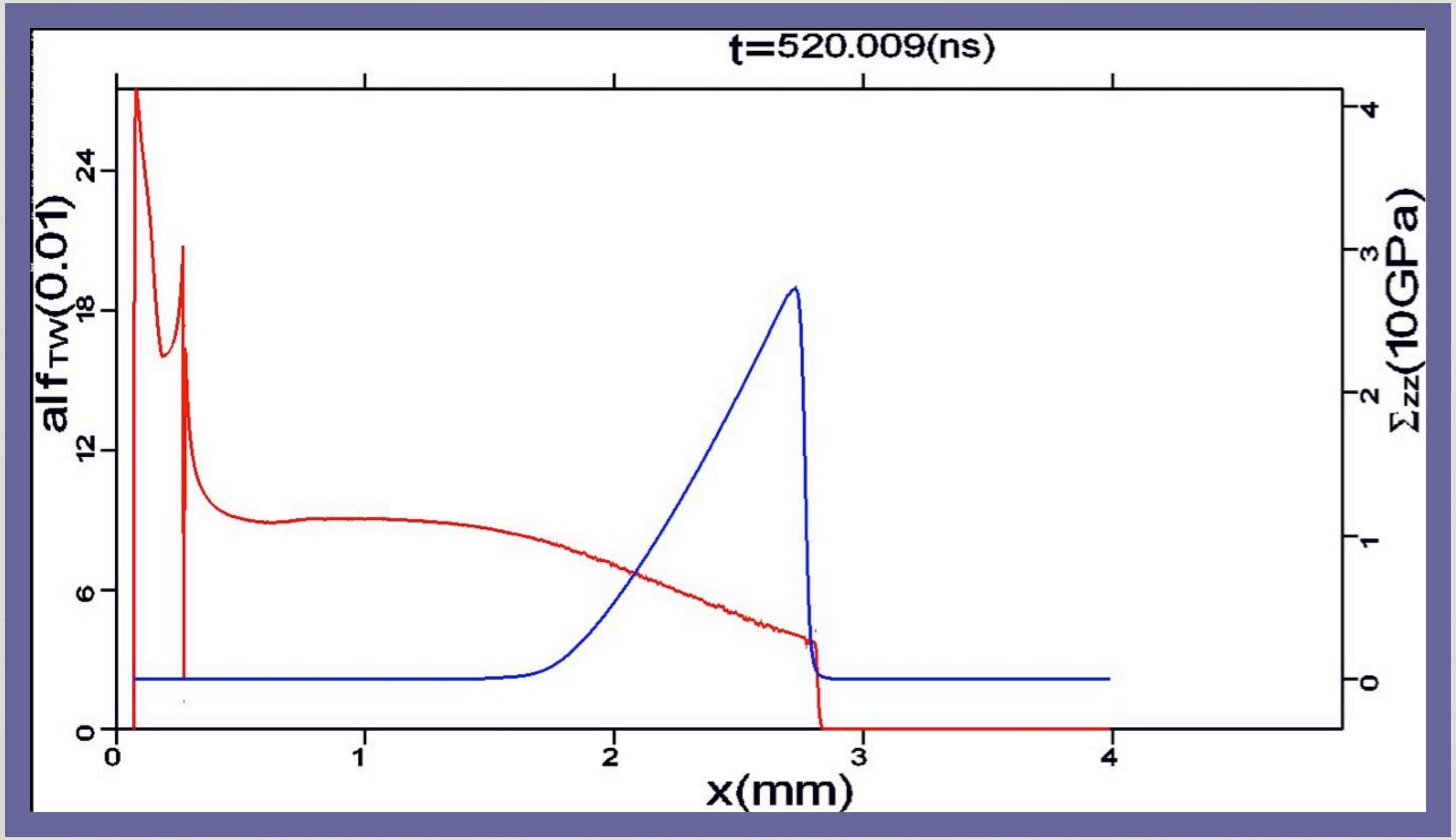


E.N. Borodin, S.A. Atroshenko, A.E. Mayer //Tech. Phys., 59, 1163 (2014)

Нагружение соударением с тонкими металлическими пластинами

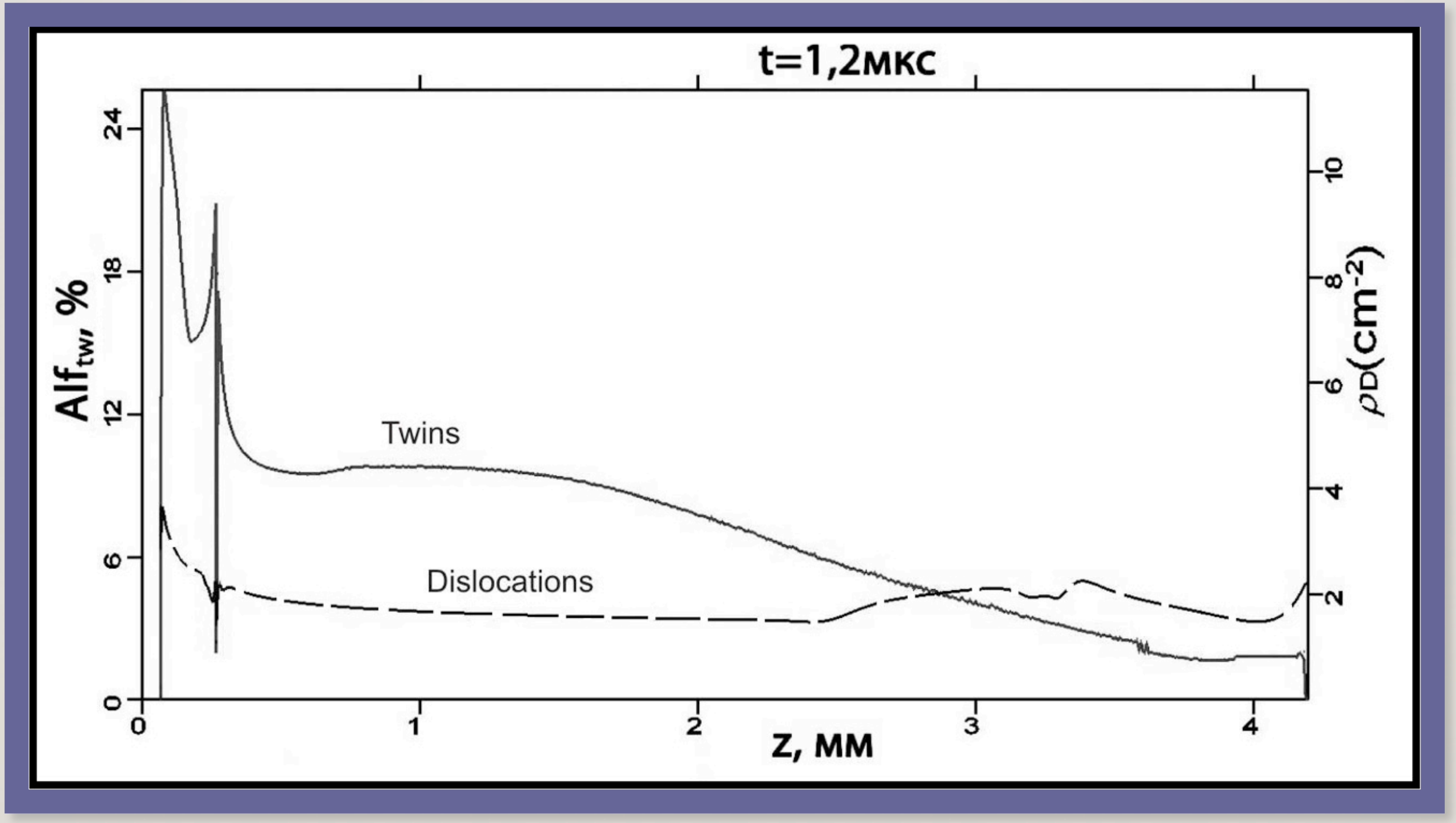


УДАРНАЯ ВОЛНА И ОБЪЕМНАЯ ДОЛЯ ДВОЙНИКОВ В МЕДИ

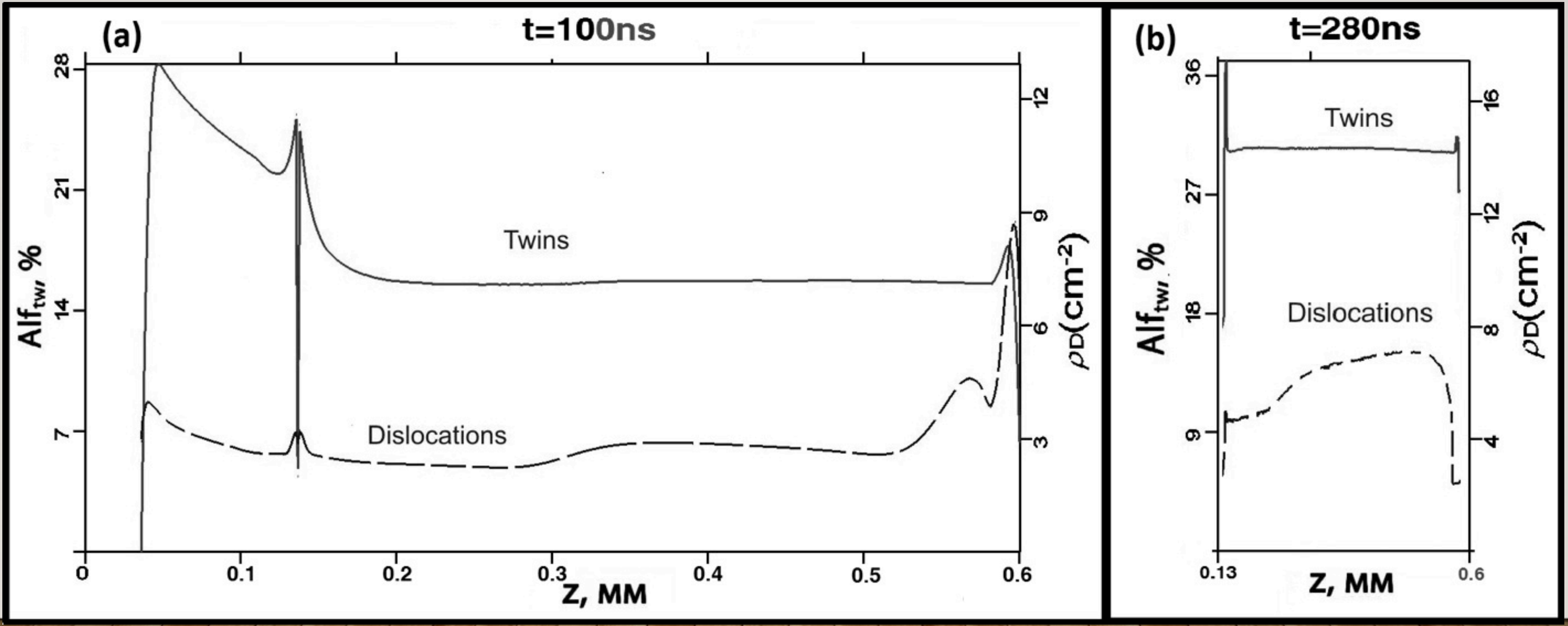


Медь, скорость ударника 1500 м/с, толщина ударника – 0.2мм, мишени – 4мм

ПЛОТНОСТЬ ДИСЛОКАЦИЙ И ОБЪЕМНАЯ ДОЛЯ ДВОЙНИКОВ В МЕДИ

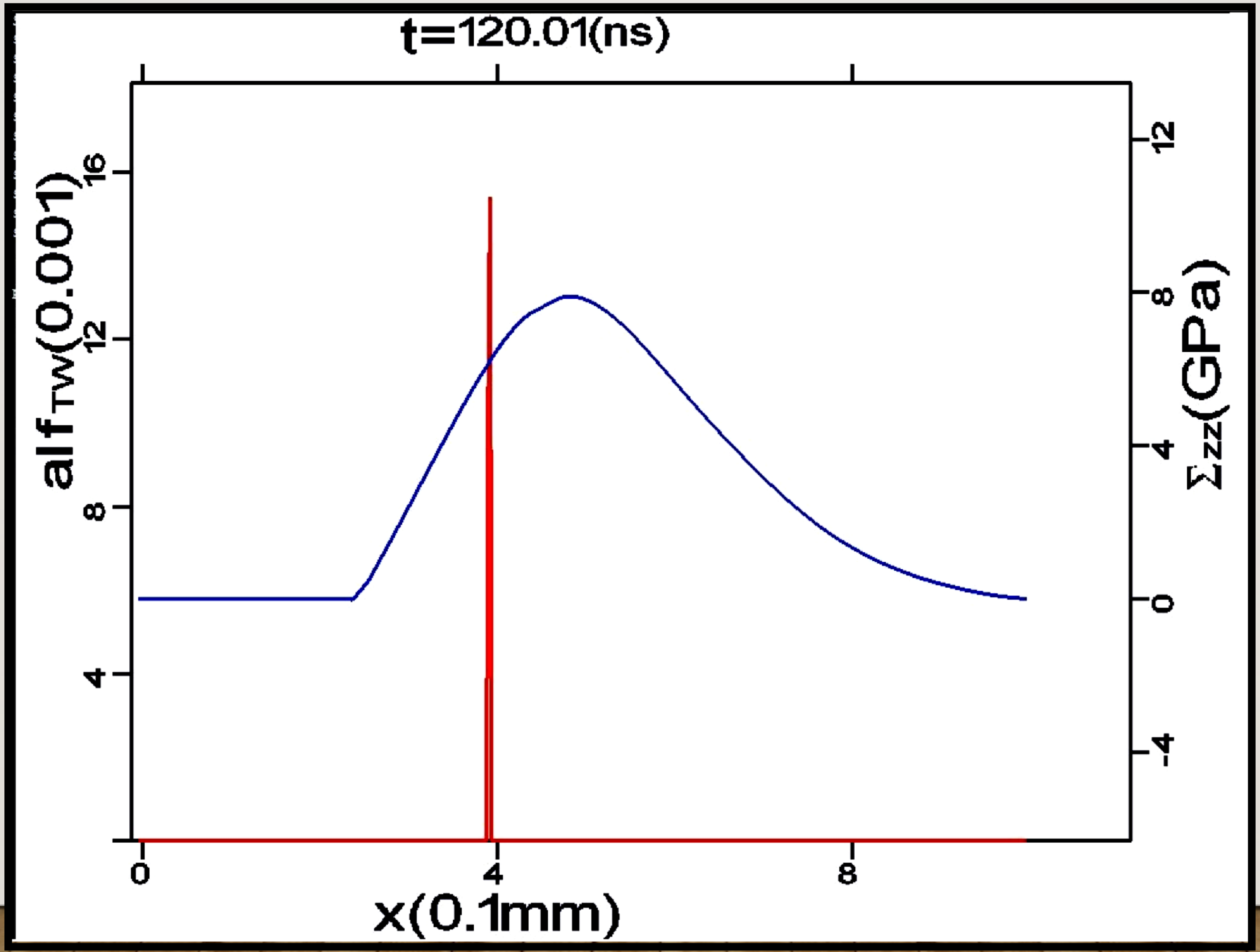


15 ЭФФЕКТ ОТРАЖЕНИЯ ВОЛНЫ НАПРЯЖЕНИЯ

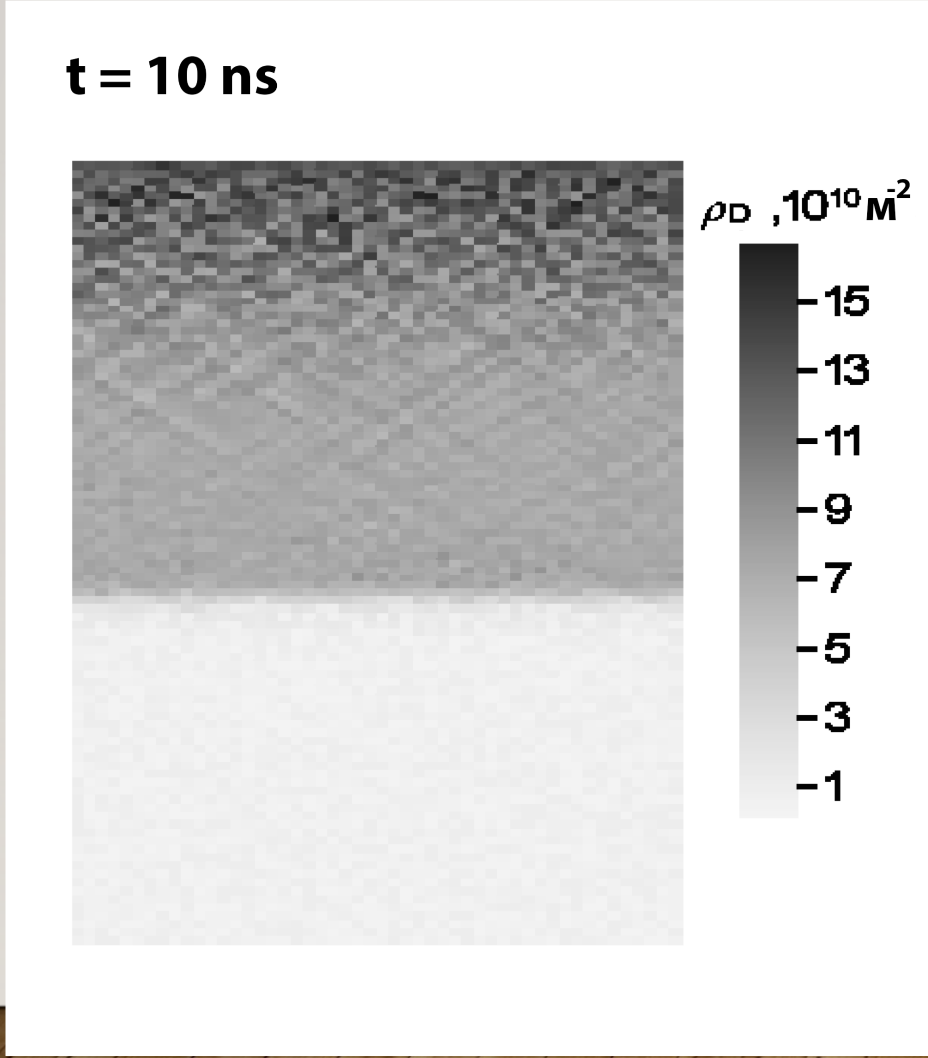


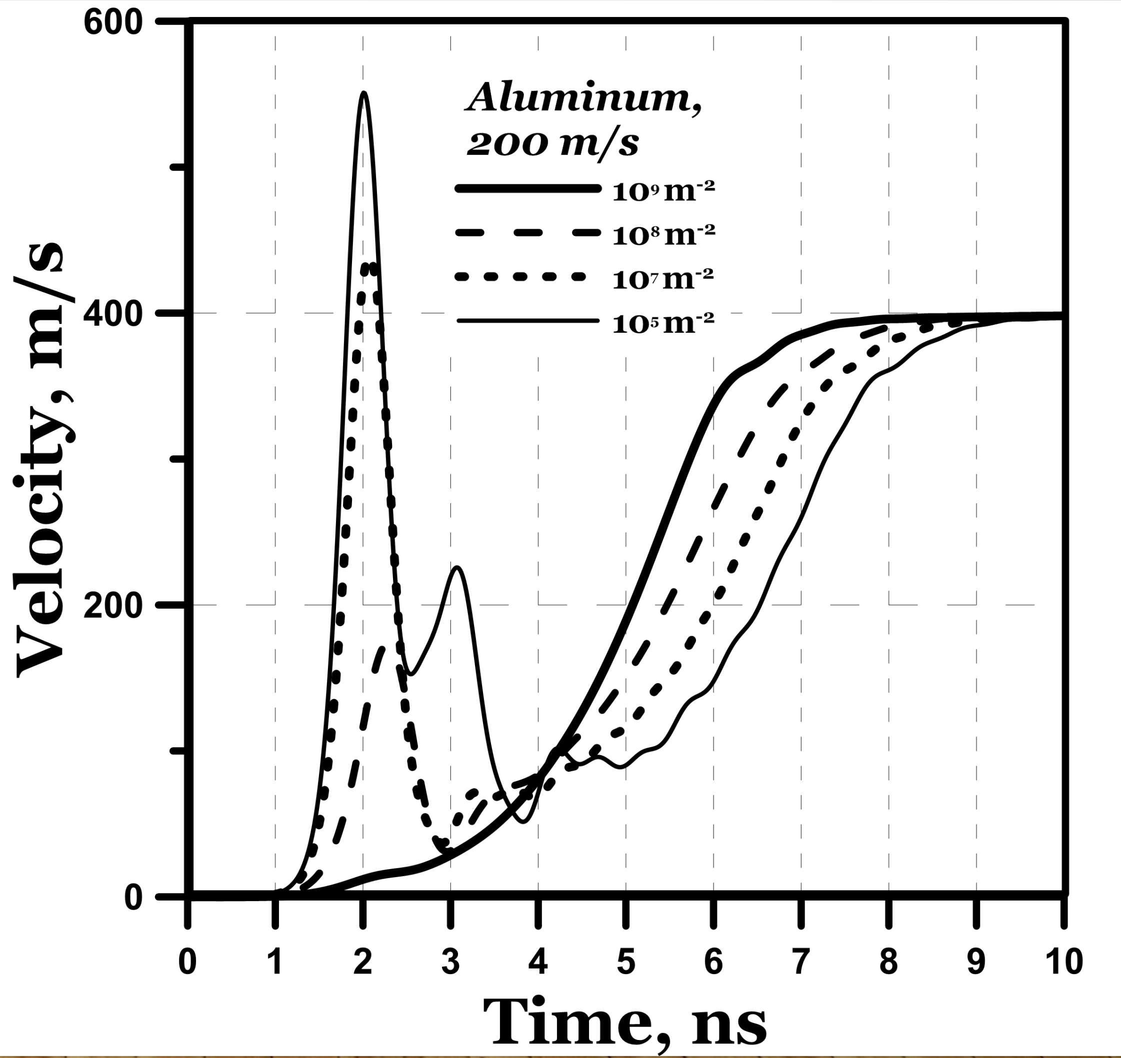
СЛУЧАЙ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

(аналогично облучению на *SINUS 7*, г.Томск)

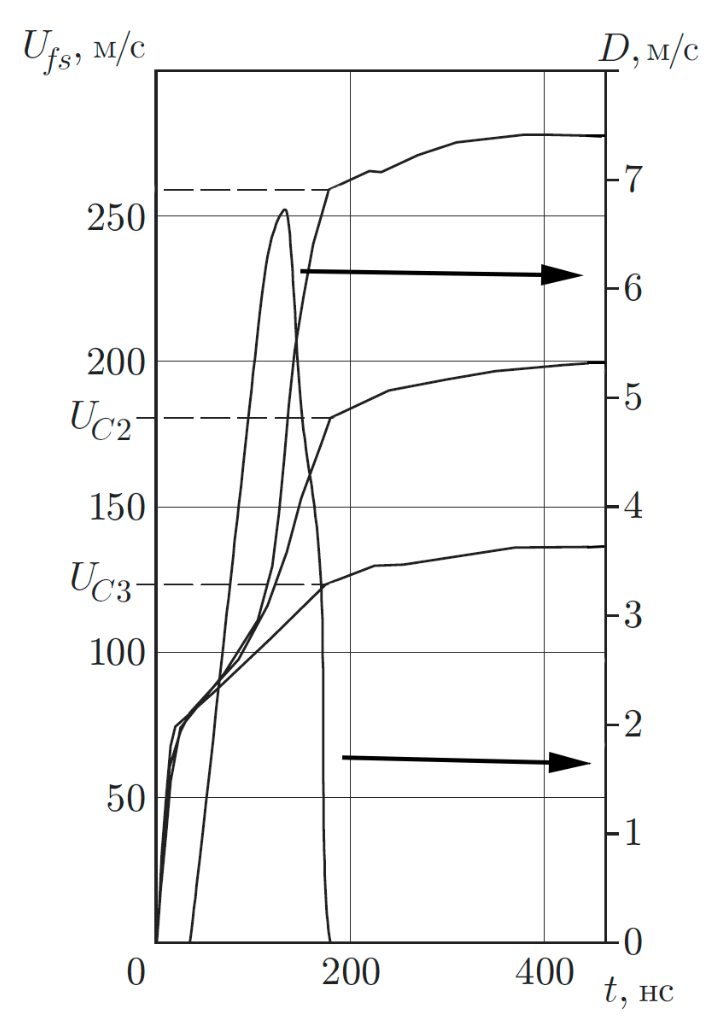


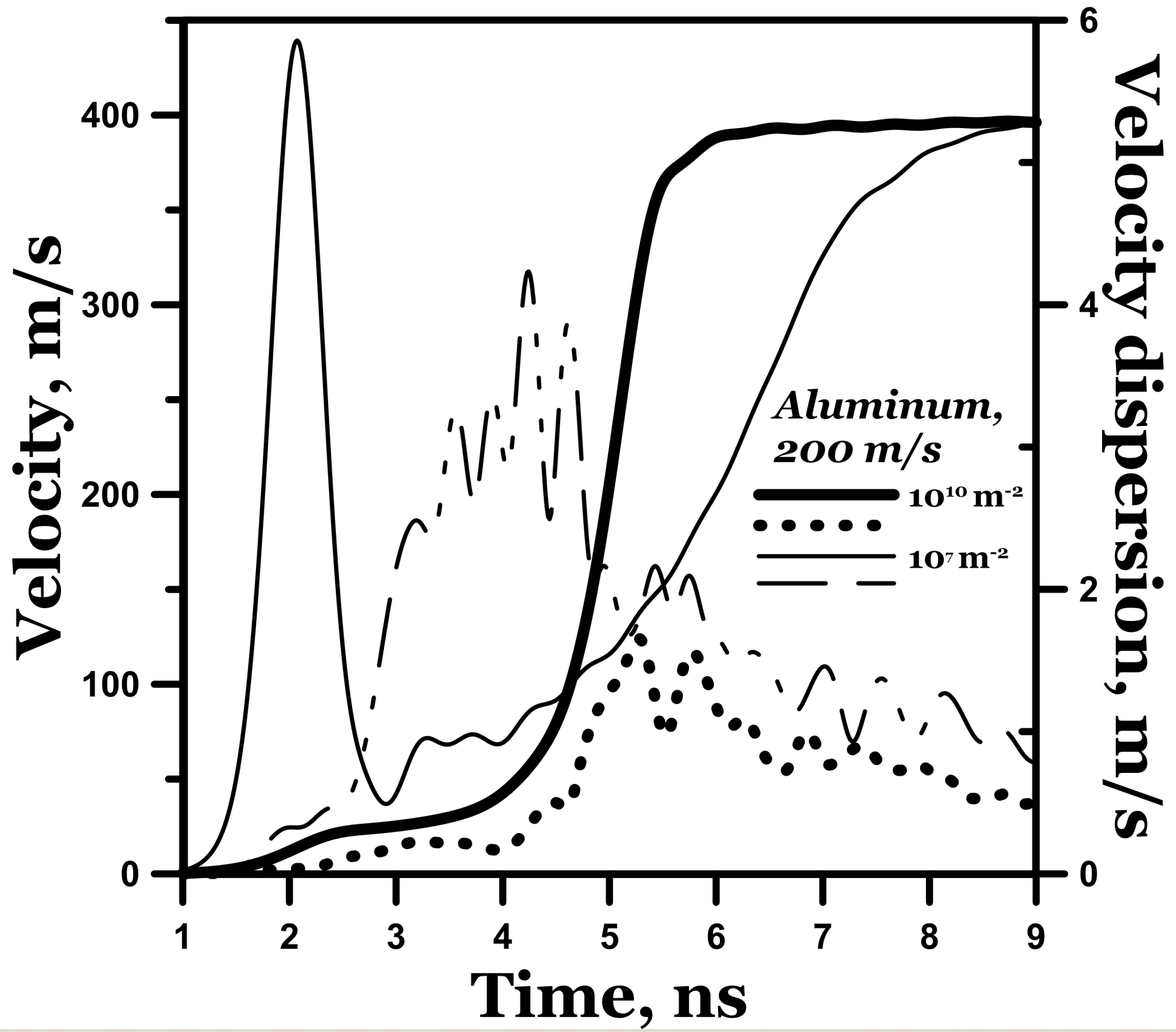
ЗАТУХАНИЕ УПРУГОГО ПРЕДВЕСТНИКА





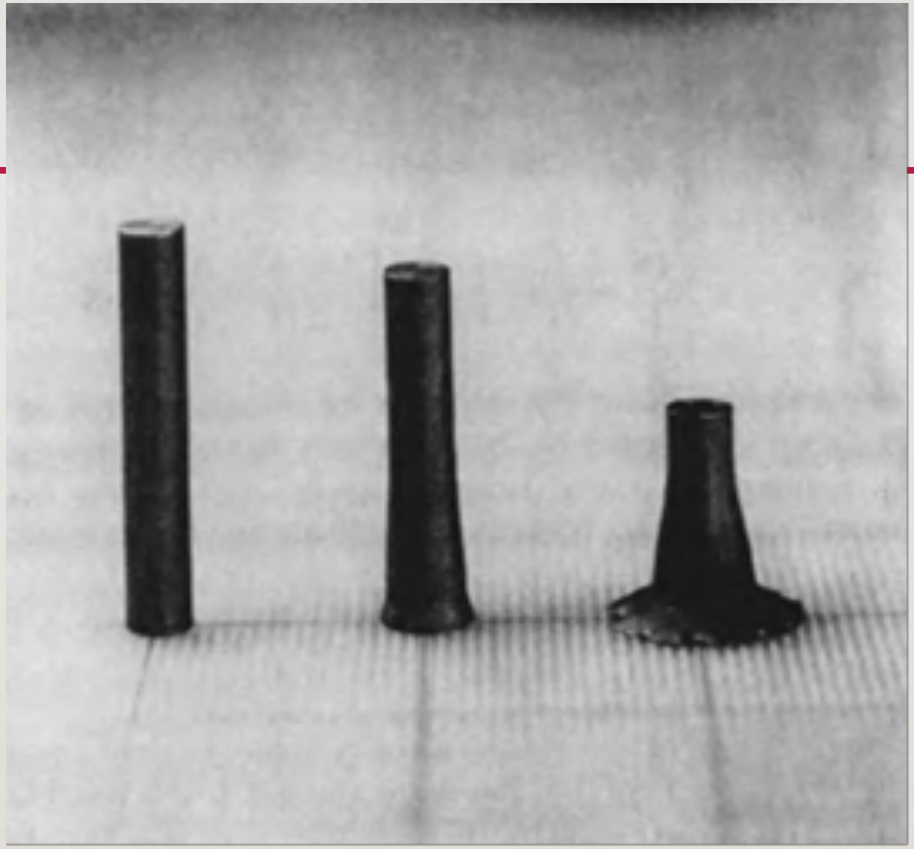
ДИСПЕРСИЯ СКОРОСТЕЙ НА ФРОНТЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ





Ю.И. Мещеряков, А.К. Диваков, Н.И. Жигачева, М.М. Мышляев Влияние размера зерна на макроскопический отклик алюминия на ударное нагружение. ПМТФ, 48(6) (2007) 135-146.

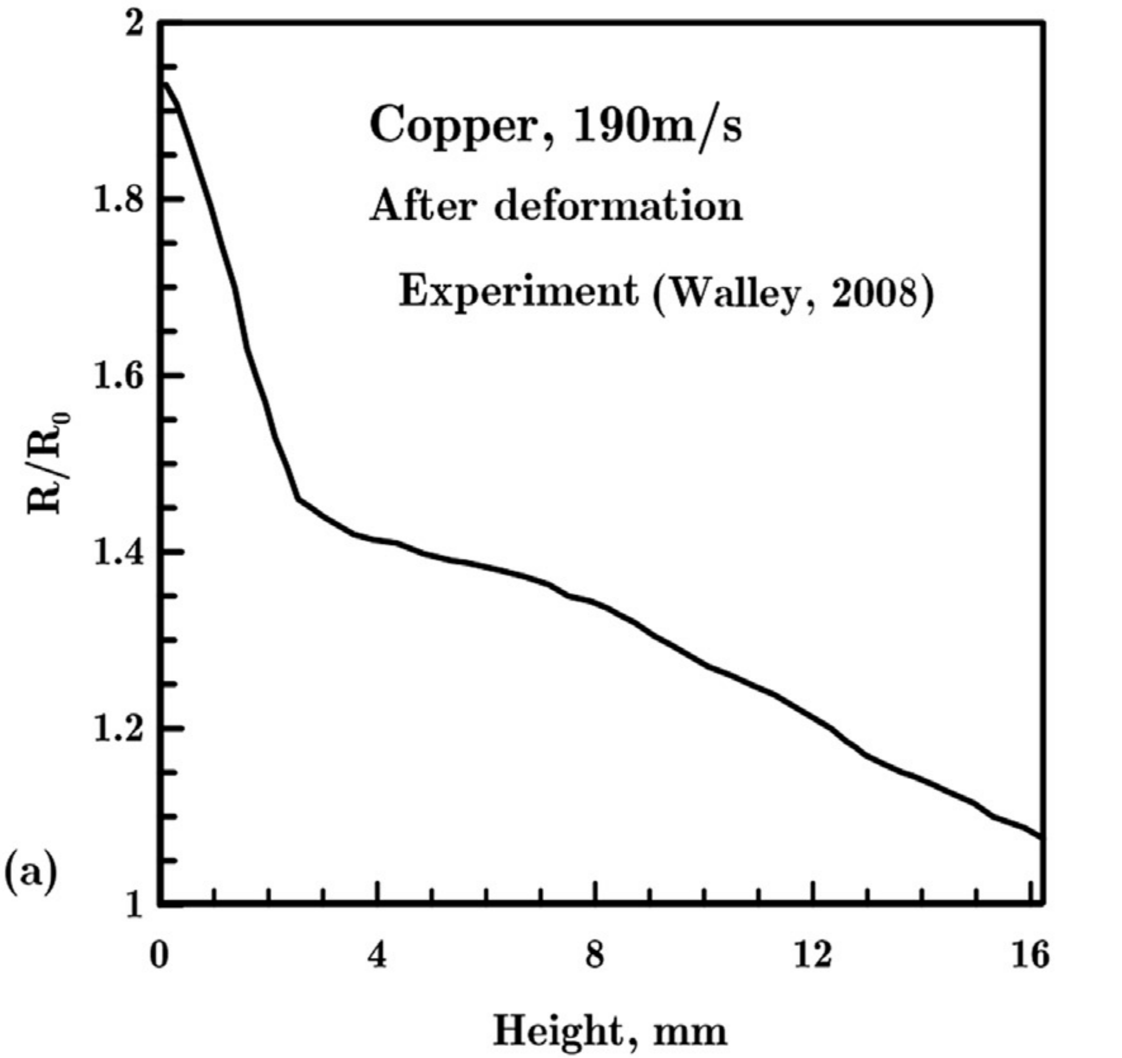
ТЕСТ ТЕЙЛОРА

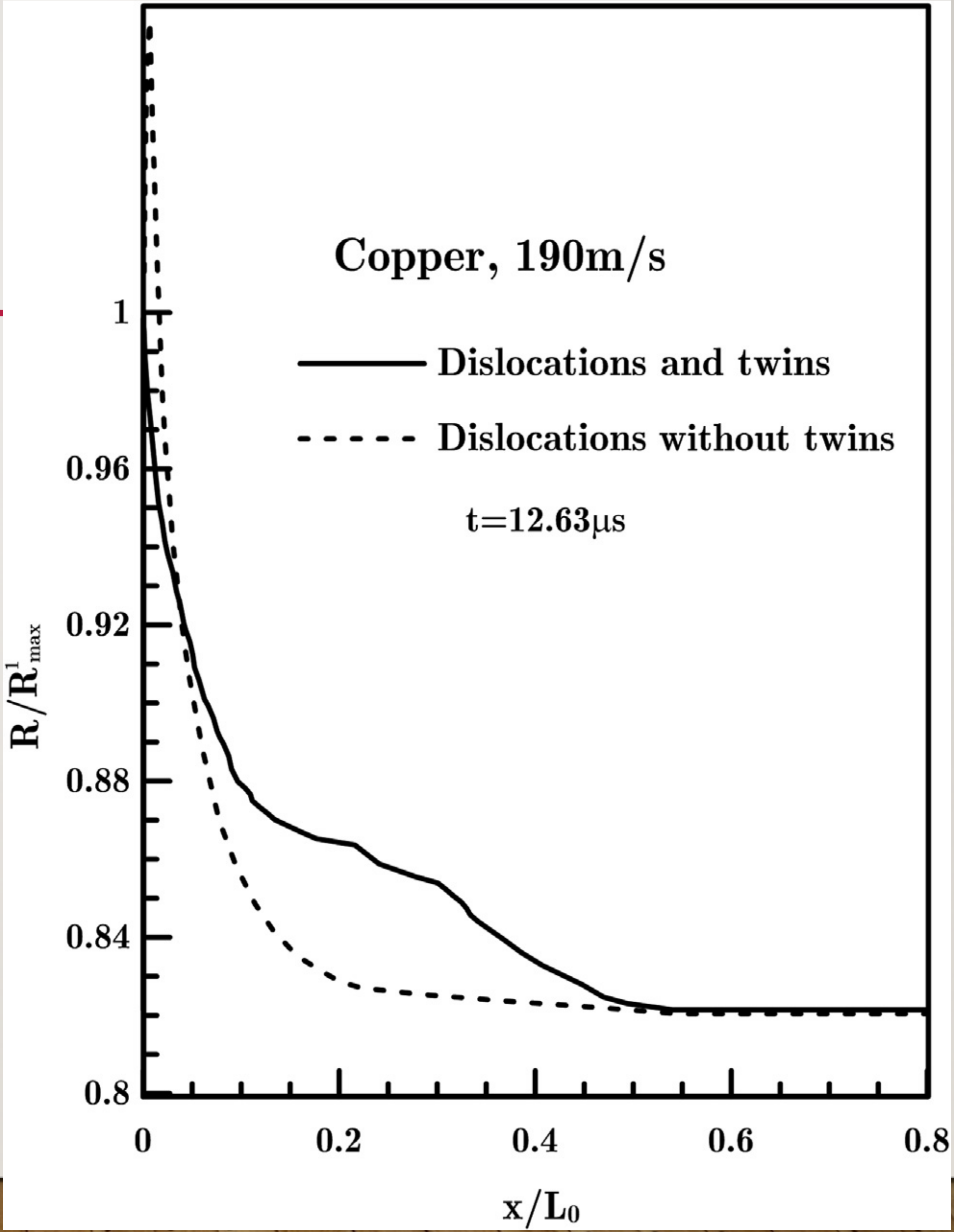


Металлический стержень со скоростью около 100 м/с налетает на твердую преграду и деформируется.

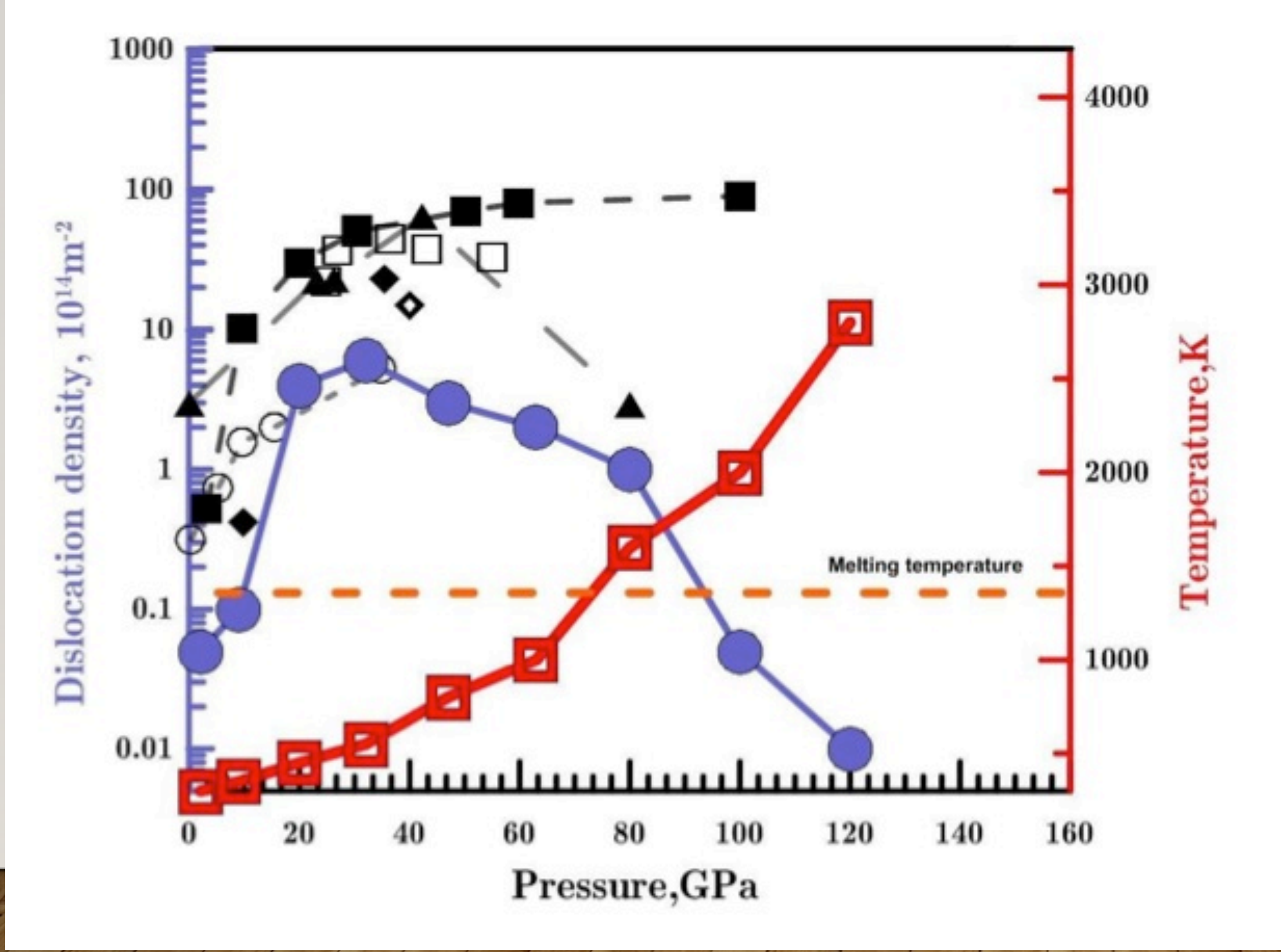
M.A. Meyers, K.K. Chawla. Mechanical Behavior of Materials. Cambridge University Press, 2009.

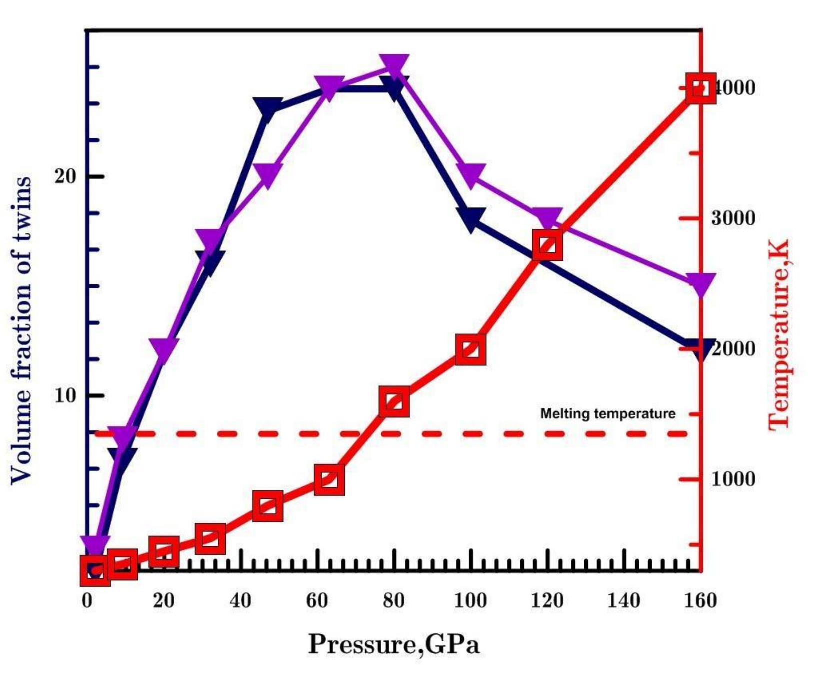
ВКЛАД РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ





21 СИЛЬНЫЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ



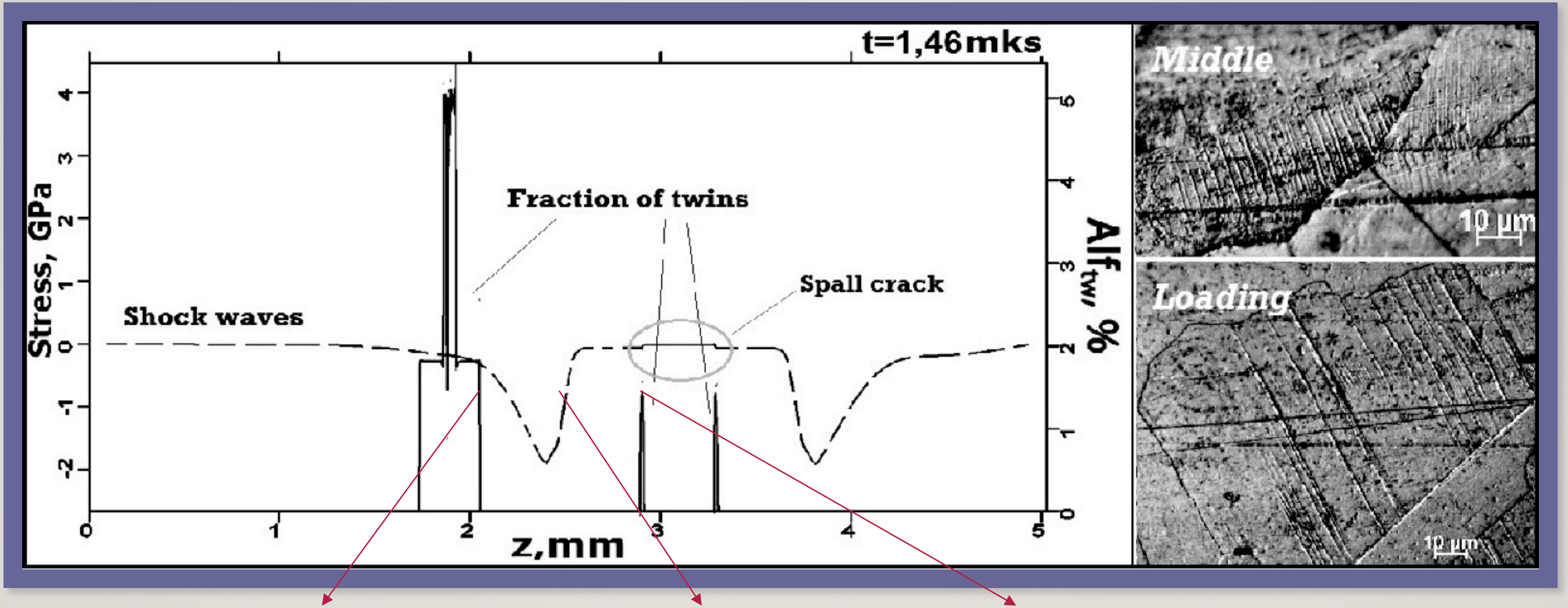


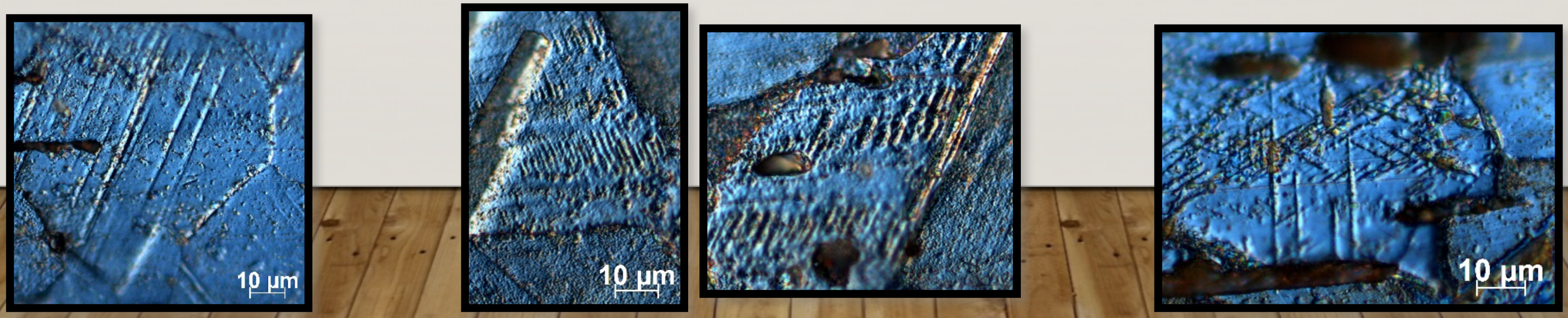
ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

- Материал: сталь 12Х18Н10Т
- Стальной ударник толщиной 1.8мм;
- Толщина мишени 5мм;
- Скорость ударника – от 146м/с до 450м/с;
- При скоростях более 200м/с наблюдалось откольное разрушение;
- Исследования нагруженных образцов проводились на оптическом микроскопе Axio-Observer-Z1-M после соответствующего химического травления;
- Средний размер зерна не превышает 65мкм.

*С.А. Атрошенко // Химическая физика, 2002, т.21, № 9
Yu.I. Mescheryakov, A.K. Divakov / /Dymat Journal. 1994. V. 1. No 4. P. 271-287

СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

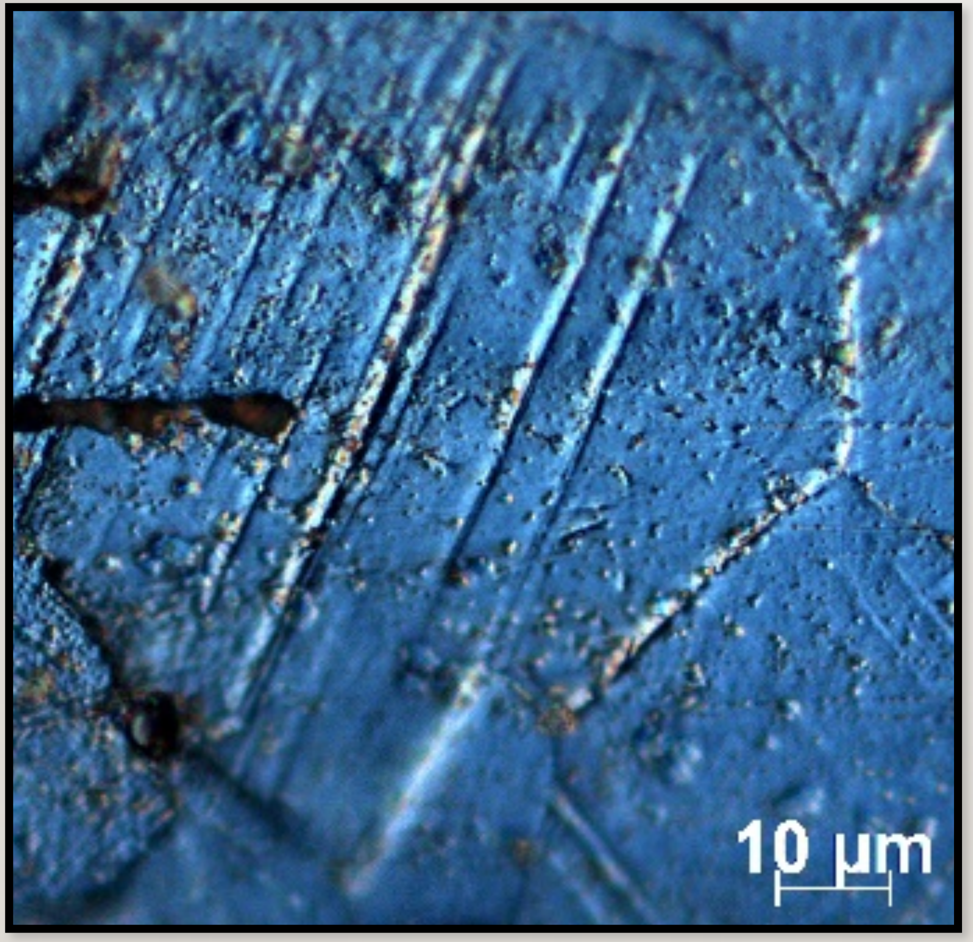


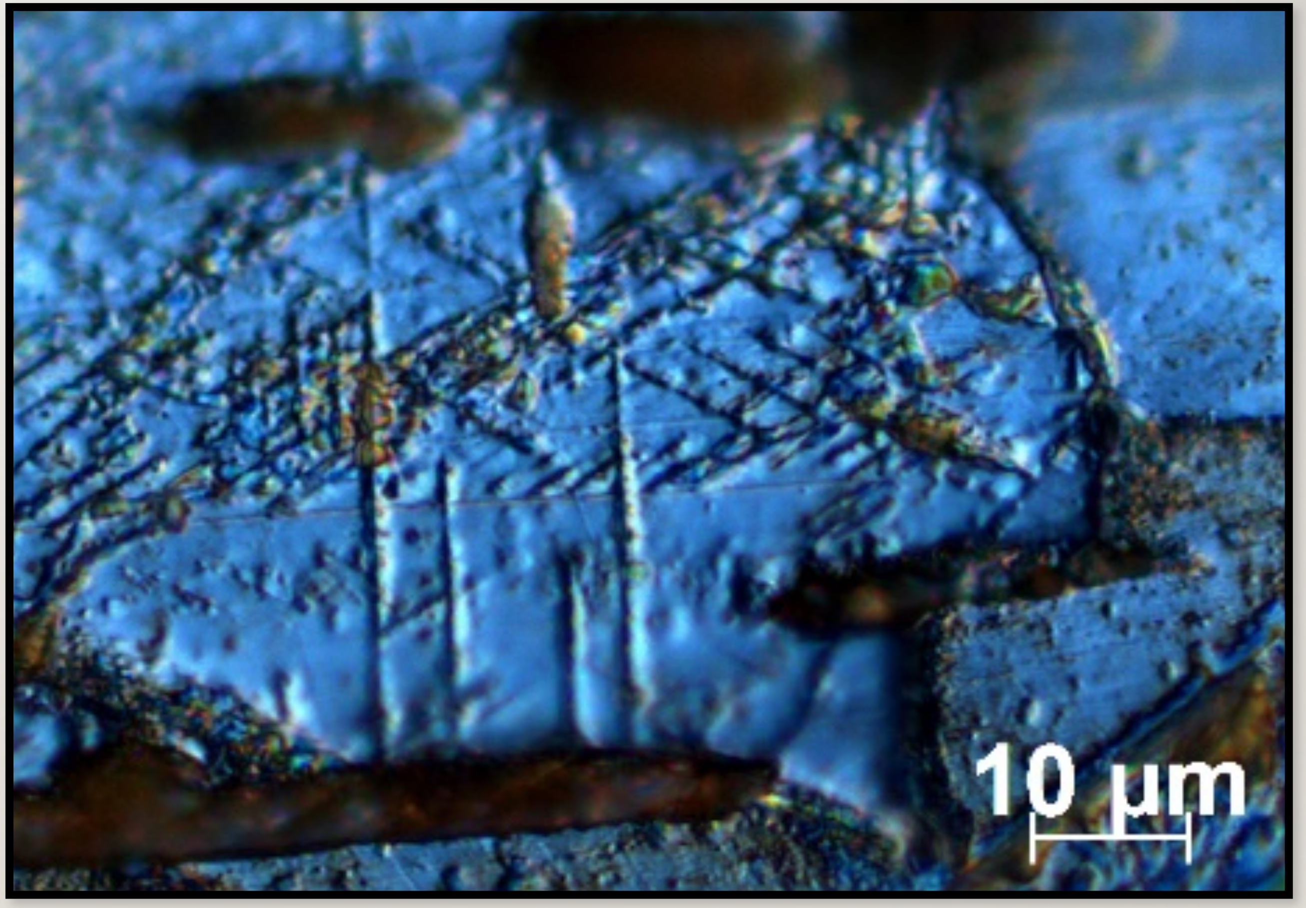


СКОРОСТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

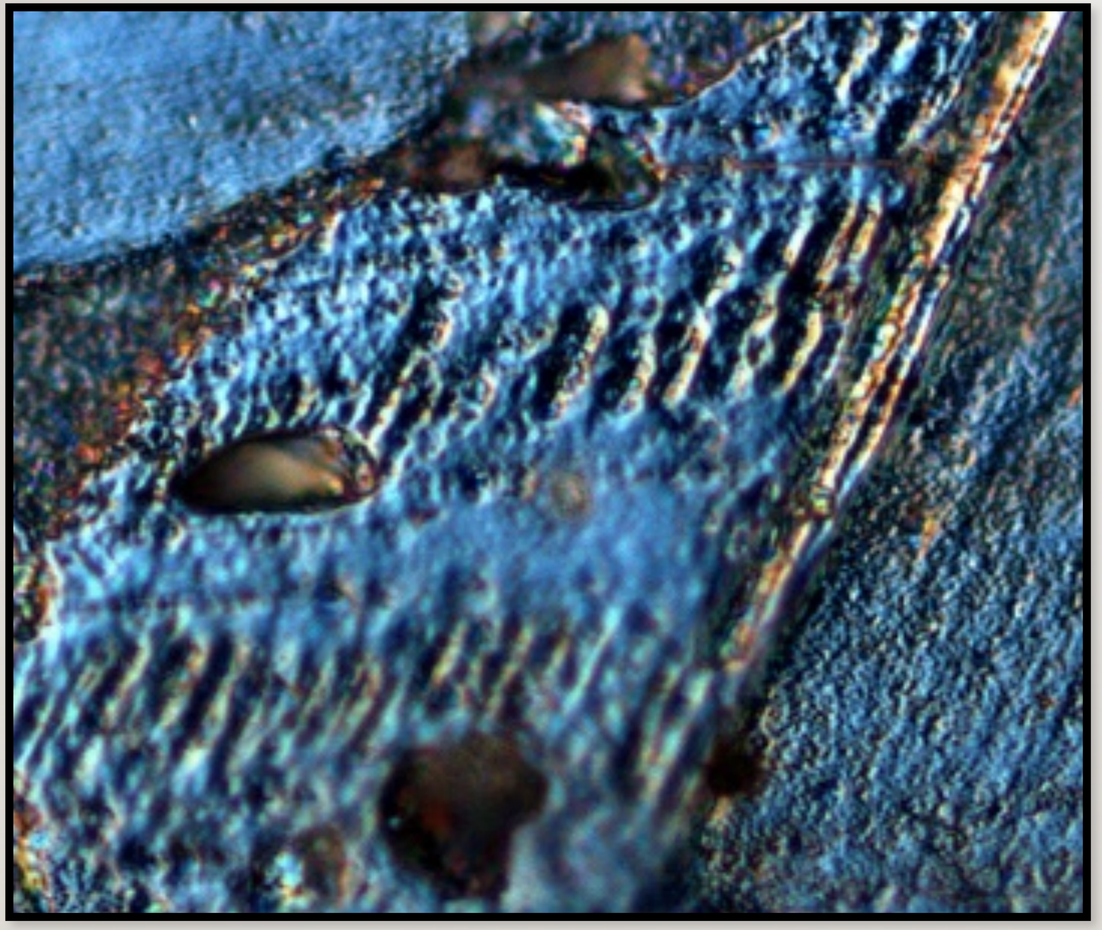
V_{imp}, м/с	<h>, мкм	<N_d>	D, мкм	σ_{ampl}, ГПа
146	3.6	3	55.7	3
229	0.9	6	62.1	4.6
246	0.78	7	63.5	4.9
298	0.66	10	63.5	5.9
450	1.1	9	43.6	8.9

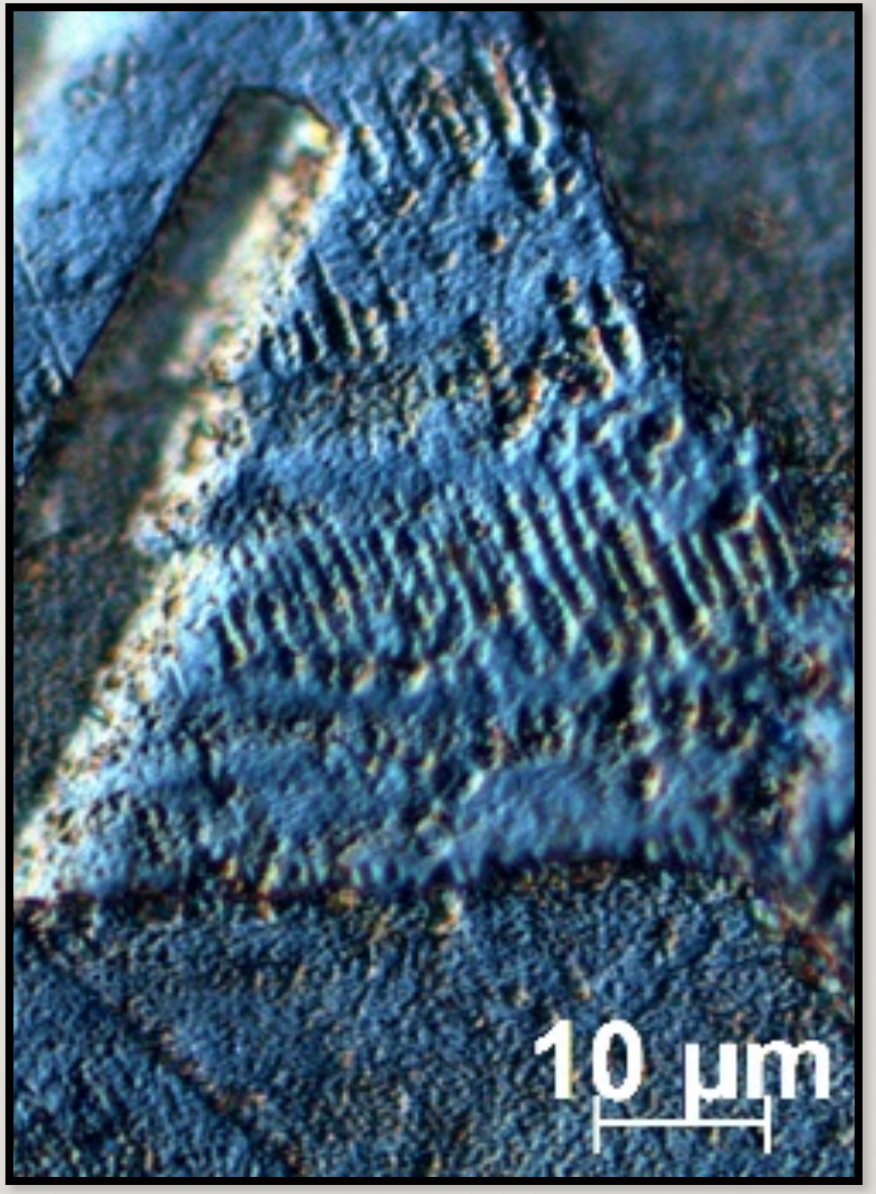
ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТЕЙ



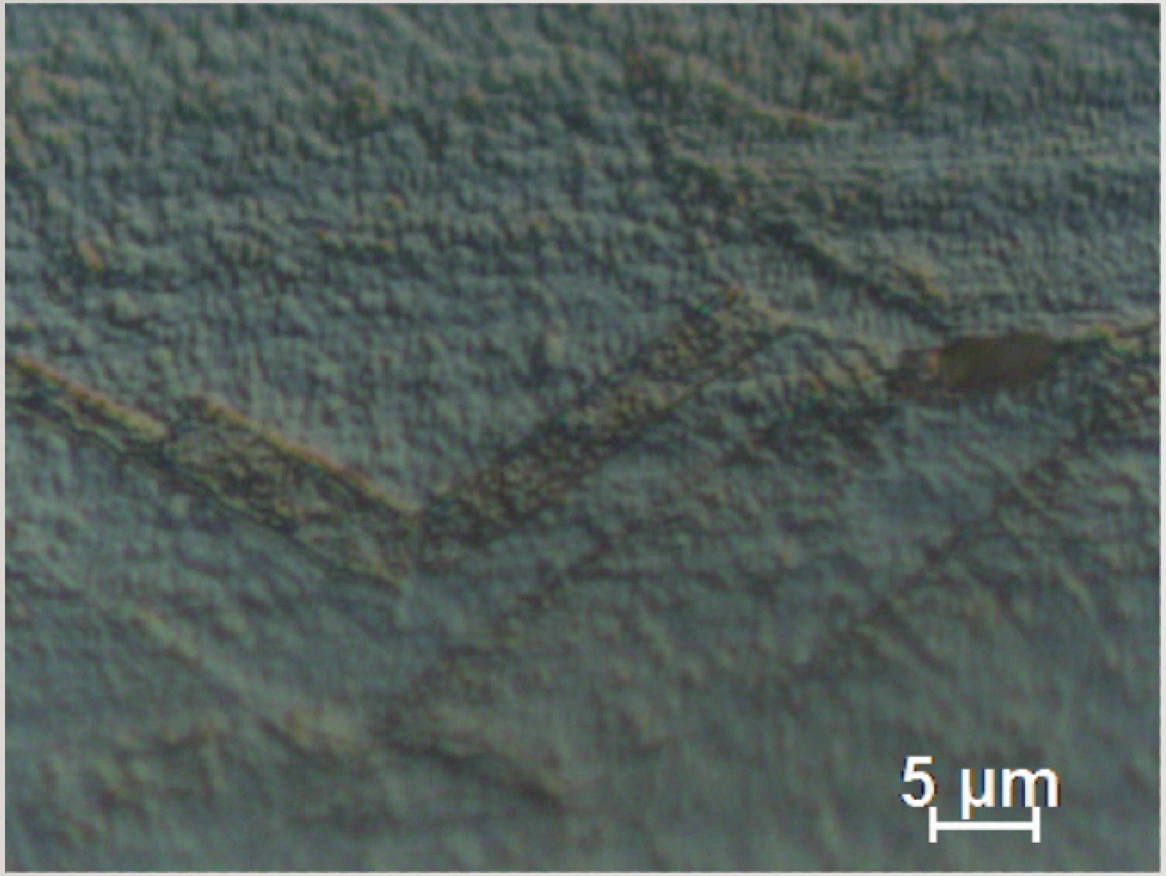


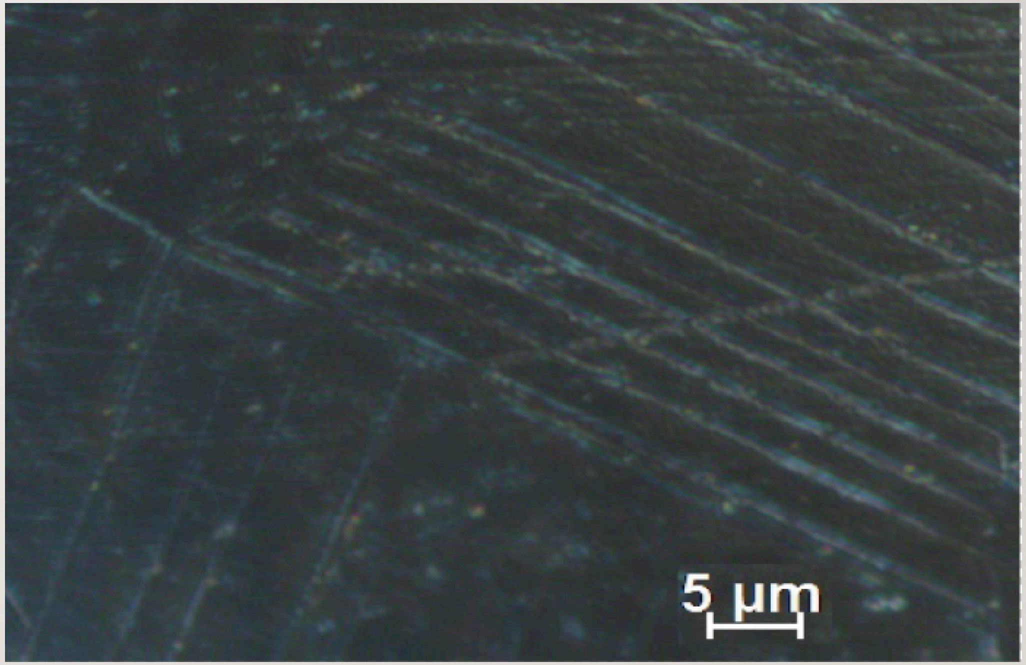
В ЦЕНТРЕ МИШЕНИ





$$U_{TW} \sim \Phi V_{TW}$$





149м/с

229м/с

ЭФФЕКТ ФОРМЫ

$$U_{Incl} = 2\pi\gamma_{SF} S_{TW} + \Phi V_{TW} - \varepsilon_{Incl} V_{TW} \Sigma$$

$$\Phi = 2G\eta\varepsilon_{Incl}^2$$

$$\eta_{Sp} = \frac{(7-5\nu)}{15(1-\nu)} \qquad \eta_L = \frac{\pi^2}{3}\frac{(2-\nu)}{(1-\nu)} \qquad \Rightarrow \qquad \eta_L/\eta_{Sp} = 5\pi^2\frac{(2-\nu)}{(7-5\nu)} \sim 15$$

$$\eta = \eta_L + \left(\eta_{Sp} - \eta_L\right) Exp(1 - Ar) \qquad r = R_{TW}/h_{TW}$$

$$F_R = \frac{4\pi}{\sqrt{2}} R_{tw}^{\gamma} h_{tw}^{\gamma} \sum_i \sum_k S_{ik} n_i^{\gamma} \tau_k^{\gamma} - 2\pi\gamma_{SF}\left(2R_{tw}^{\gamma} + h_{tw}^{\gamma}\right) - \Phi\left(h_{tw}^{\gamma}\right)^2$$

$$\dot{R}_{tw}^{\gamma}\, 2\left(1 - \left(\dot{R}_{tw}^{\gamma}/c_t\right)^2\right)^{-3/2} = bF_R^{\gamma}\left(2\pi R_{tw}^{\gamma} h_{tw}^{\gamma} B^{part}\right)^{-1}$$

ВЫВОДЫ

1. Структурные модели могут описывать и предсказывать механический отклик материалов на внешние нагрузки и имеют большой потенциал к описанию особенностей эволюции его микроструктуры;
2. Все коэффициенты этих моделей имеют четкую физическую интерпретацию, что позволяет определять их из экспериментов, теоретических оценок или молекулярно-динамического моделирования;
3. Микроструктурные исследования демонстрируют сложную зависимость вида двойников, формируемых в стали 12Х18Н10Т от скорости деформации и напряжения;
4. Интересно изменение аспектного отношения двойников от поверхностей к центру мишеней и наличие широких двойников при малых скоростях нагружения;
5. Предложенная модель двойникования, описывающая эти наблюдаемые особенности.

Благодарю за внимание!