

ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМОДЕЛЬНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПОВЕДЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД С ДЕФЕКТАМИ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

XVI Забабахинские научные чтения

29 мая-2 июня 2023 г.

О.Б.Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН

Содержание

- *Введение. Ударно-волновое нагружение конденсированных сред как “in-situ” конечно-амплитудное «зондирование» механизмов пластичности и разрушения*
- *Закономерности скейлинга при формировании пластических волновых фронтов*
- *Скейлинг при ударно-волновом разрушении*
- *О некоторых универсальных сценариях развития пластической неустойчивости в металлах и турбулентности в жидкостях (универсальность PDF, автомодельность волновых фронтов)*
- *Обсуждение результатов*

**Исследования поддержаны проектом Российского научного фонда № 21-79-30041*

Эксперименты А.Д. Сахарова. Barker-Swagle-Grady универсальность пластических волновых фронтов

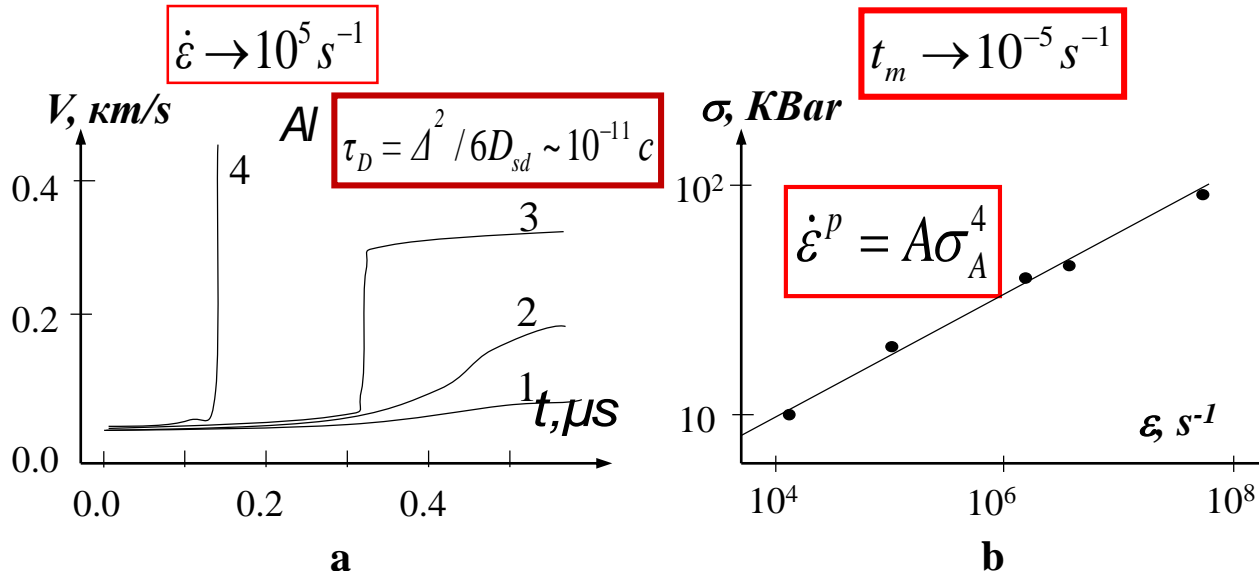
A.D Sakharov, R.M.Saidel, V.N.Mineev, A.G. Oleinik. *Sov.Phys.Doklady*, 159, 1019 (1964).

Substances	Pressure range, KBar	Viscosity, poises	Elastic modulus, MPa
Aluminum	31-202	$\sim 10^4$	74
Lead	35-250	$\sim 10^4$	47
Copper, Steel		$\sim 10^4$	
Water	8	$2 \cdot 10^4$	2
Mercury	15	$2 \cdot 10^3$	2.9



Андрей Дмитриевич Сахаров

Viscosity and elasticity of shocked condensed matter



Я.И.Френгель (Кинетическая теория жидкостей):

"..Жидкости, являясь конденсированными средами, должны обнаруживать механизмы течения более свойственные твердым телам, но не газам. ...Широко распространенная точка зрения, что текучесть жидкостей реализуется при отсутствии сдвиговой упругости, является ошибочной, за исключением, может быть, жидкого гелия II "

О термодинамике твердого тела с дефектами

- Термодинамика «пластического состояния»

Термодинамические переменные

$$a \Rightarrow (\varepsilon^e, b\rho S_D)$$

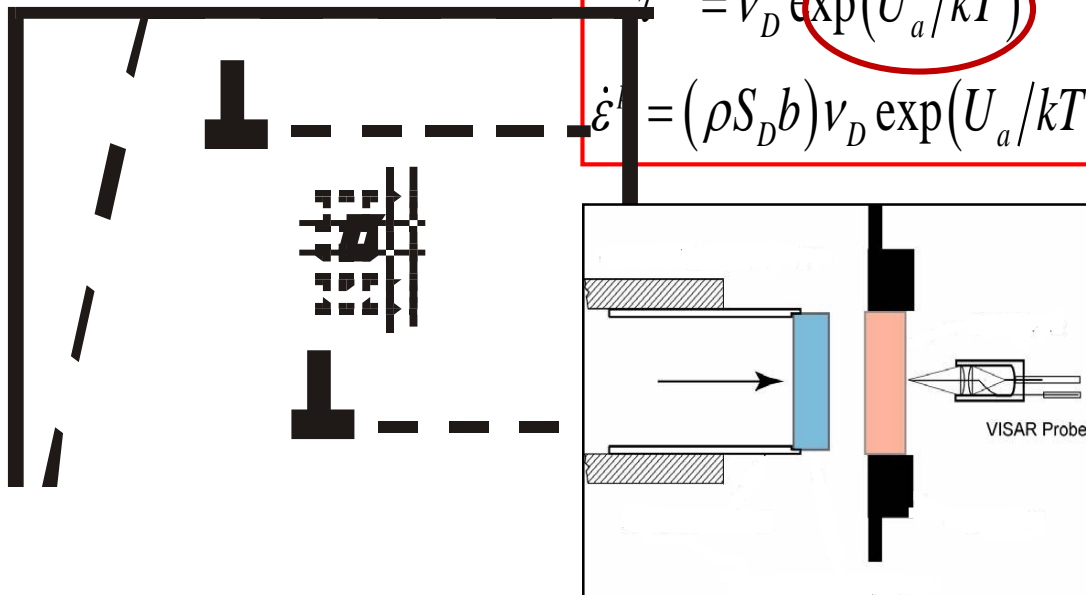
$$F = F(\varepsilon^e, b\rho S_D)$$

Флуктуационная природа пластичности (закон Орована)

$$\dot{\varepsilon}^p = \rho S_D b / \tau$$

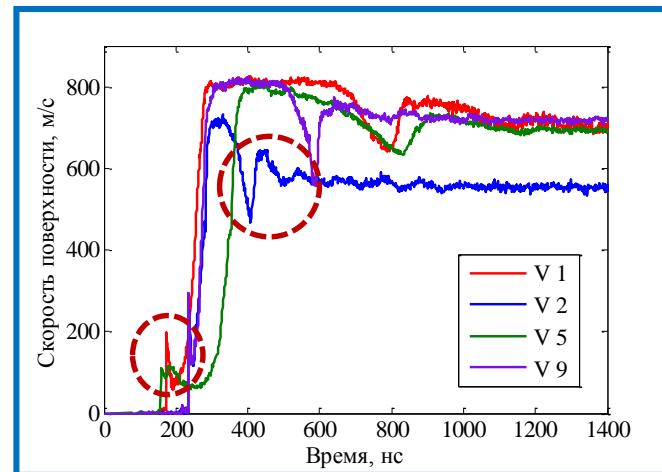
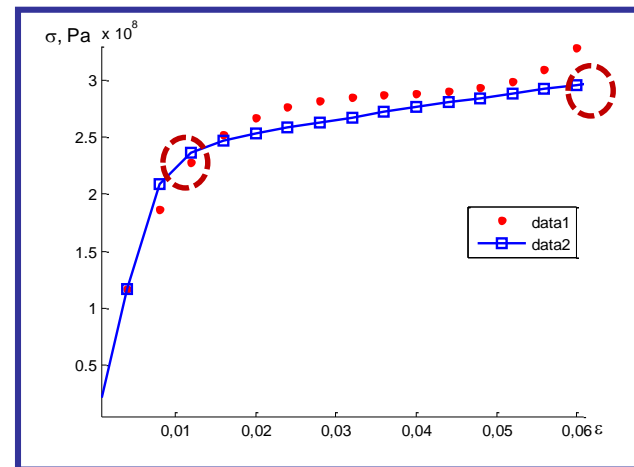
$$\tau^{-1} = v_D \exp(U_a / kT)$$

$$\dot{\varepsilon}^p = (\rho S_D b) v_D \exp(U_a / kT)$$



Vanadium

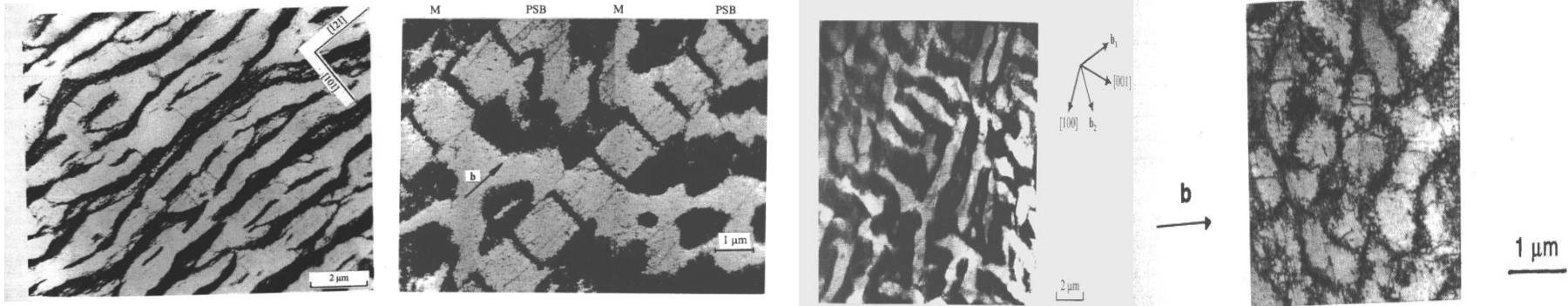
(quasi-static and shock wave test)



- V.Bulatov et al., Probing the limits of metal plasticity with molecular dynamic simulation. Nature, 550, 492-495 (2017)
- Argon, Kocks, and Ashby "Thermodynamics and Kinetics of Slip", 1975

EVOLUTION OF DISLOCATION SUBSTRUCTURES

- TEM image of fatigued crystal of Cu (courtesy H.Mughrabi)



matrix vein structure

ladder structure

labyrinth structure

cell structure

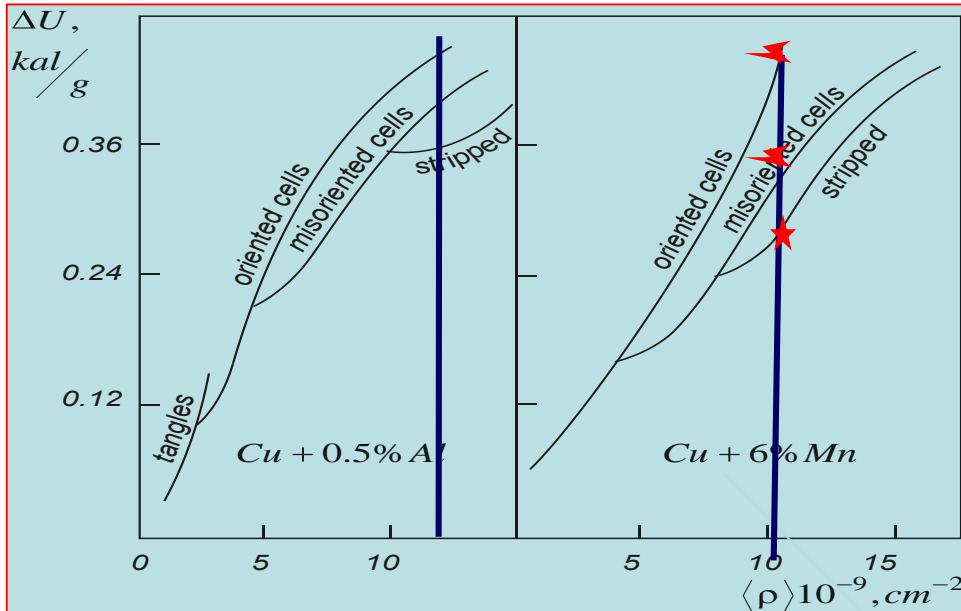
saturation

saturation, $\gamma_{pl} = 10^{-3}$

saturation, $\gamma_{pl} = 5 \cdot 10^{-3}$

saturation, $\gamma_{pl} = 1.45 \cdot 10^{-2}$

- Energy of dislocation substructures versus dislocation density (E.Kozlov, N.Koneva et al.)

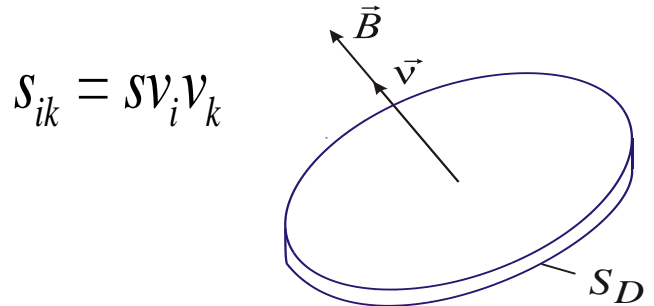


Koneva, N.A., Lychagin, S.P., Trishkova, L.T. and Kozlov, E.V., In: *Strength of Metals and Alloys, Proceedings of the 7-th International Conference, Montreal, Canada, v.1, 21 (1985).*

Hansen, N. and Kuhlmann-Wilsdorf, D., *Materials Science and Engineering*, 81, 141 (1986).

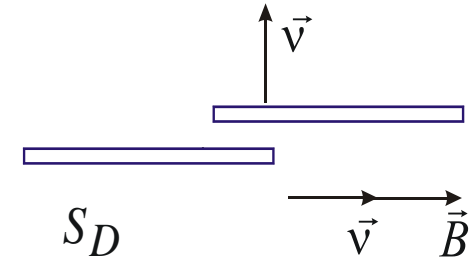
Structural-Statistical Model

- Mesodefects (microcracks, microshears):



$$S_{ik} = S v_i v_k$$

$$s_{ik} = \frac{1}{2} s (v_i l_k + l_i v_k)$$



$$p_{ik} = n \langle s_{ik} \rangle \quad n \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

- **Leontovich Effective Field Method, 1937** (Tsallis Statistics, Superstatistics for Out-of-Equilibrium Systems with Slow Dynamics)

$$dF^* = dU^* - T^* dS^* - A_\xi d\xi$$

$$E \rightarrow E, \quad Q \rightarrow kT$$

Generalization of the Boltzmann-Gibbs Statistics

$$W \sim Z^{-1} \exp\left(-\frac{E^*(...)}{Q}\right)$$

$$E^* = E_0 - H_{ik} s_{ik} + \alpha s_{ik}^2,$$

Effective Field

$$H_{ik} = \sigma_{ik} + \lambda p_{ik} = \sigma_{ik} + \lambda n s_{ik}.$$

CONSTITUTIVE EQUATION OF SOLID WITH MESODEFFECTS

- Self-Consistency Equation for Defect Density Tensor

$$p_{ik} = n \int s_{ik} W(s, \vec{v}, \vec{l}) ds_{ik}.$$

- Dimensionless Form

$$\tilde{p}_{ik} = \int \tilde{s}_{ik} Z^{-1} \exp\left((\tilde{\sigma}_{ik} + \frac{1}{\delta} \tilde{p}_{ik}) \tilde{s}_{ik} - \tilde{s}_{ik}^2 \right) d\tilde{s}_{ik}.$$

- General statistics

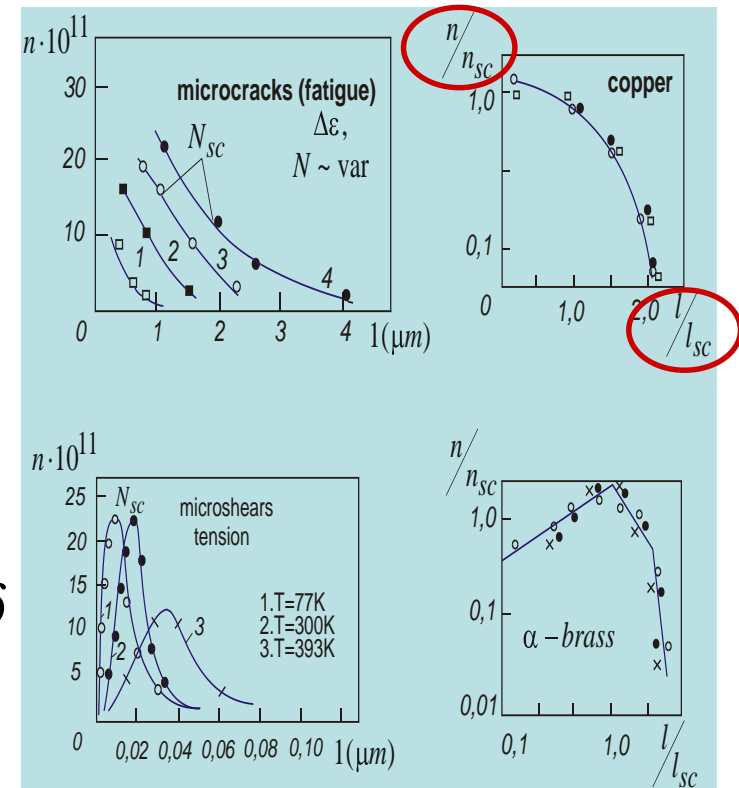
$$\tilde{p}_{ik} = \iint \tilde{s}_{ik} Z^{-1} \exp\left((\tilde{\sigma}_{ik} + \frac{1}{\delta} \tilde{p}_{ik}) \tilde{s}_{ik} - \tilde{s}_{ik}^2 \right) ds d\delta$$

- Dimensionless Material Parameter

$$\delta = \alpha / \lambda n \quad \alpha \sim \frac{G}{V_0}, \quad \lambda \sim G, \quad n \sim R^{-3},$$

G is the elastic modulus, $V_0 \sim r_0^3$ is the defect nuclei volume,

R is the distance between defects.

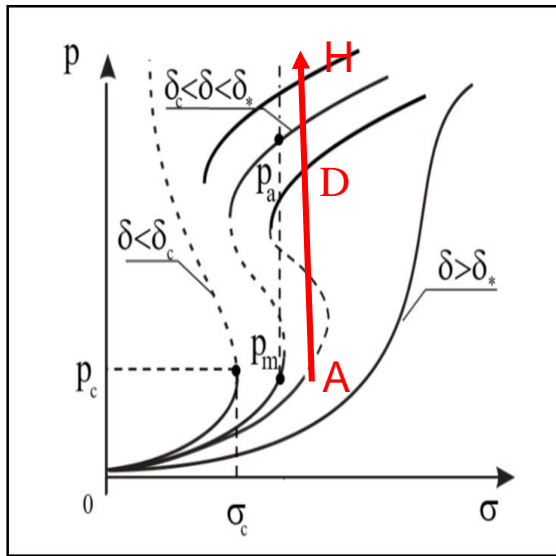


$$\delta \sim (R/r_0)^3.$$

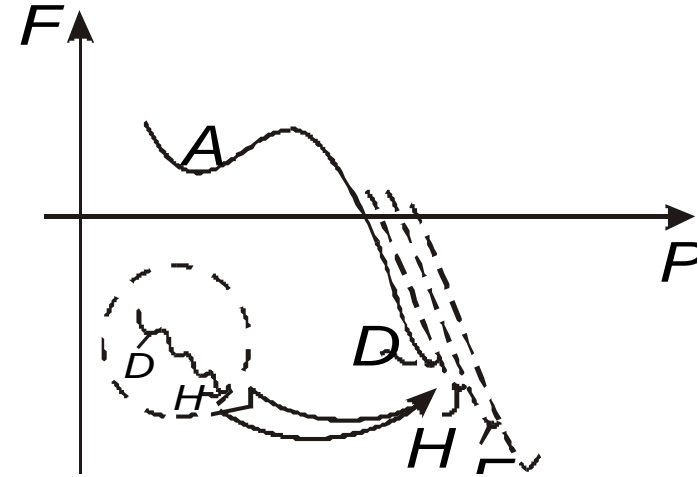
Феноменология твердых тел с мезодефектами. Структурно-скейлинговые переходы.

Non-Equilibrium Free Energy

$$F = \frac{1}{2} A(\delta, \delta_*) p^2 - \frac{1}{4} B p^4 + \frac{1}{6} C(\delta, \delta_c) p^6 - D \sigma p + \chi (\nabla_i p)^2.$$



$$\frac{\delta F}{\delta t} = \frac{\delta F}{\delta p} \frac{dp}{dt} + \frac{\partial F}{\partial \delta} \frac{d\delta}{dt} \leq 0$$



$$\frac{dp}{dt} = -L_p \left(A(\delta, \delta) p - B p^3 + C(\delta, \delta_c) p^5 - D \sigma - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\chi \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) \right)$$

- Квази-хрупкое

$$\delta < \delta_c = 1$$

- Вязкое

$$\delta_c < \delta < \delta_*$$

- Наноструктурное

$$\delta > \delta_* \approx 1.3$$

Автомодельные решения. Коллективные моды дефектов

- Solitary Wave:

$$\delta_c < \delta < \delta_*$$

$$p(x,t) = \frac{1}{2} p_a \left[1 - \tanh(\xi l^{-1}) \right]$$

$$\xi = x - Vt, \quad V = \chi A (p_a - p_m) / (2L_p^{-2})$$

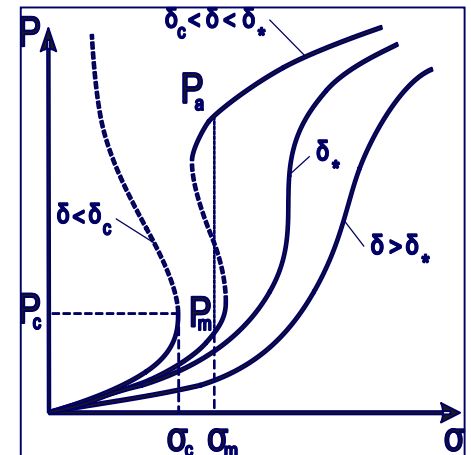
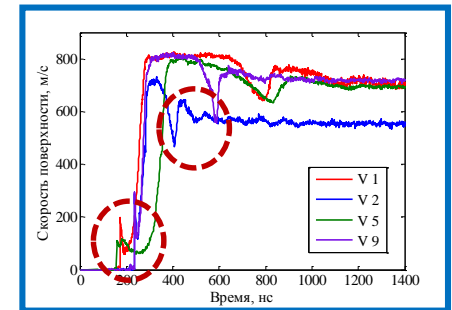
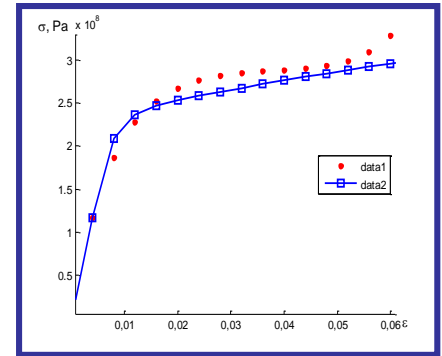
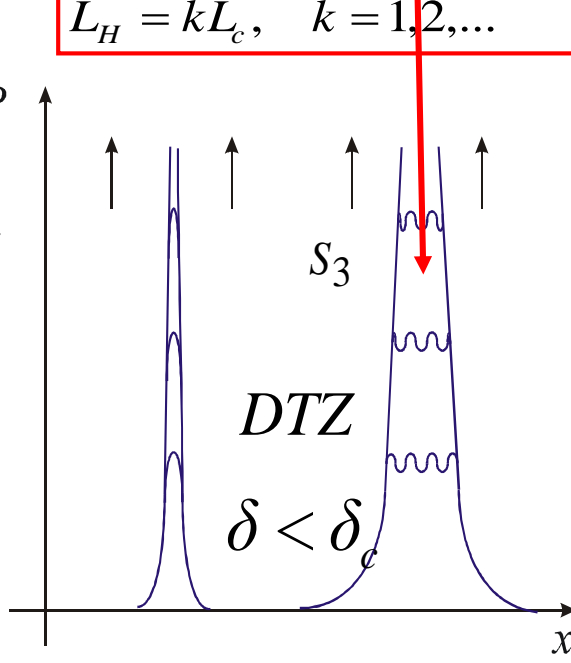
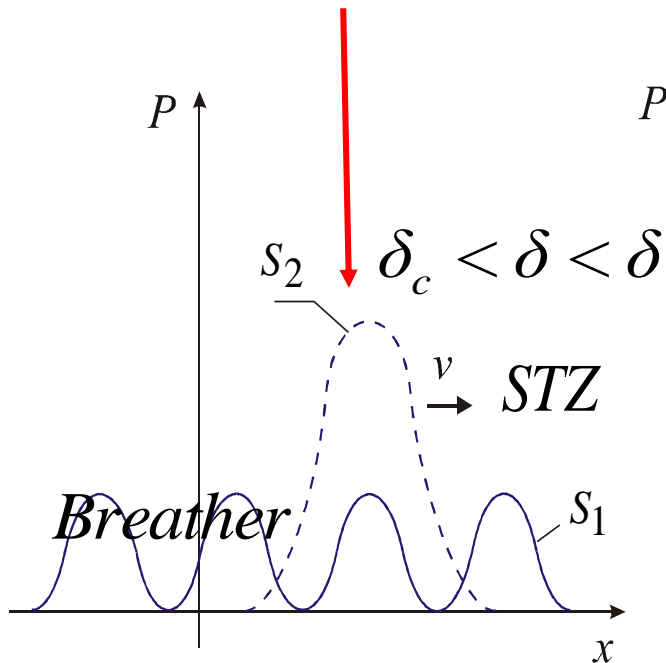
- "Blow-up" Regimes of Damage

Localization: $\delta < \delta_c$

$$p(x,t) = \varphi(t) f(\zeta)$$

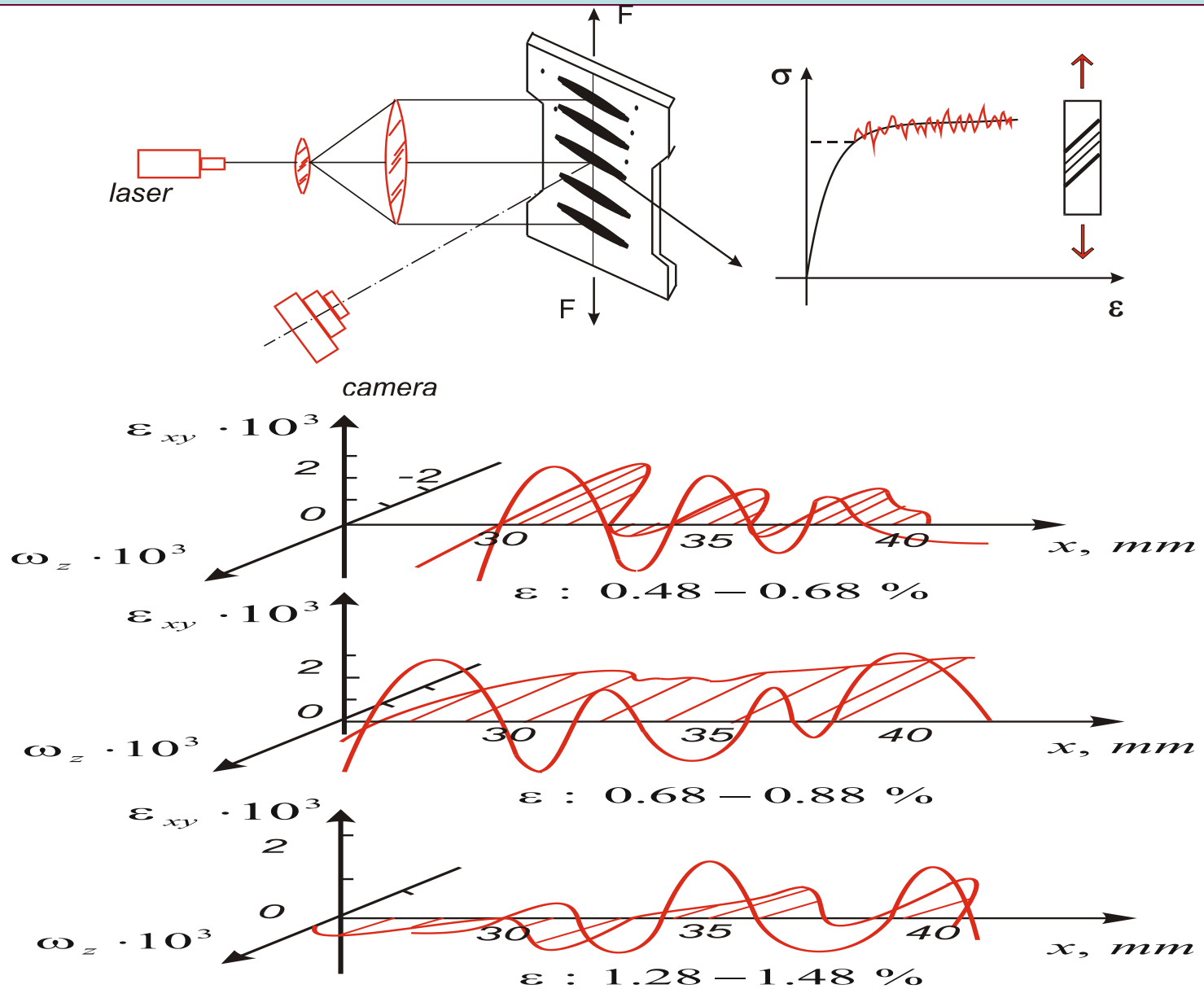
$$\zeta = x / L_c, \quad \varphi(t) = \Phi_0 \left(1 - \frac{t}{t_c} \right)^{-m}$$

$$L_H = kL_c, \quad k = 1, 2, \dots$$



Langer J.S., Pechnik L. Dynamics of shear transformation zones in amorphous plasticity: Energetic constraints in a minimal theory // Phys.Rev.E- 2005.- V.68.- P. 061507.

Speckle Interferometry (L.B.Zuev, V.E.Panin et al.)



Сравнительный анализ с MTS-PTW-моделью

MTS-PTW-Model

Potential

$$\Delta\Phi(\hat{\tau}_c) \sim \text{erf}^{-1}\{(c_0 - \hat{\tau}_c)/(c_0 - c_\infty)\}$$

Constitutive equations

$$\dot{\psi} = \dot{\psi}_0 \exp\{-\Delta\Phi(\tau)/kT\}$$

$$\hat{\tau}_s = s_0 - (s_0 - s_\infty) \text{erf}\{kT \ln(\gamma \dot{\xi} / \dot{\psi})\}$$

$$\hat{\tau}_y = y_0 - (y_0 - y_\infty) \text{erf}\{kT \ln(\gamma \dot{\xi} / \dot{\psi})\}$$

Hardening law

$$d\hat{\tau}/d\varepsilon = \theta(\hat{\tau}_s - \hat{\tau}) / (\hat{\tau}_s - \hat{\tau}_y)$$

S2M-Model

Free energy

$$F = \frac{1}{2} A(\delta, \delta_*) p^2 - \frac{1}{4} B p^4 - \frac{1}{6} C(\delta, \delta_c) p^6 - D \sigma p + \chi(\nabla_1 p)^2.$$

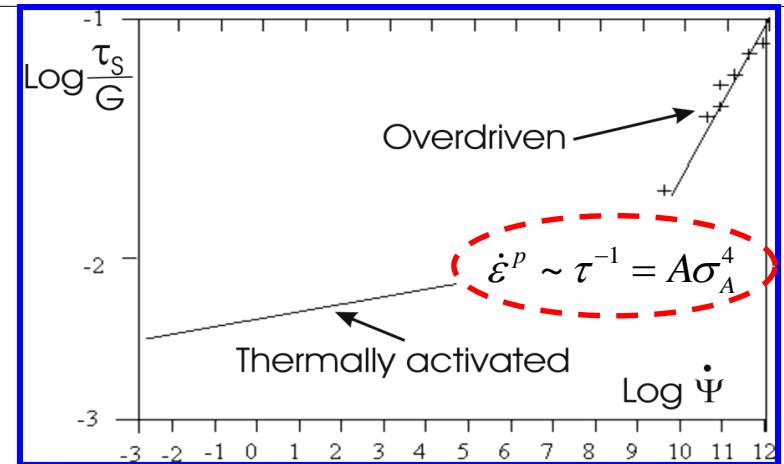
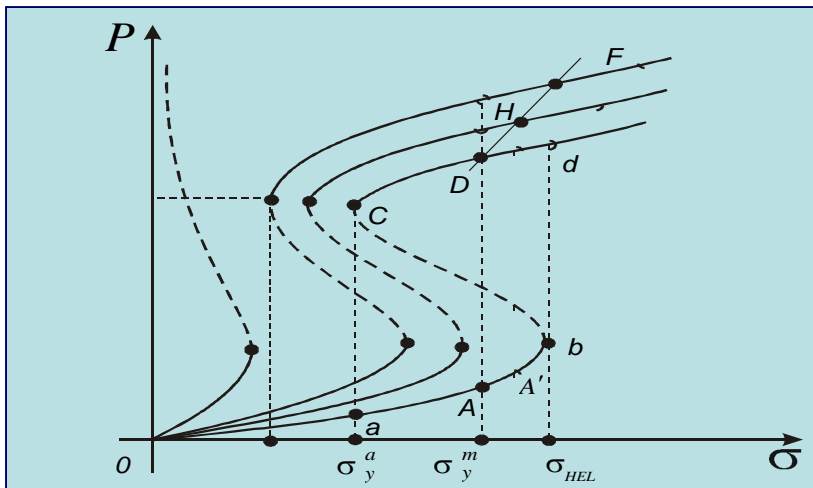
Constitutive equations

$$TP_S = \sigma'_{ik} e^{p_{ik}} - \frac{\partial F}{\partial p_{ik}} \frac{\Delta p'_{ik}}{\Delta t} - \frac{\partial F}{\partial \delta} \dot{\delta} \geq 0$$

$$\sigma'_{ik} = L_{iklm}^{(1)} e^{p_{lm}} - L_{iklm}^{(2)} \frac{\Delta p'_{lm}}{\Delta t}, \quad \Pi_{ik} = \frac{\partial F}{\partial p_{ik}}$$

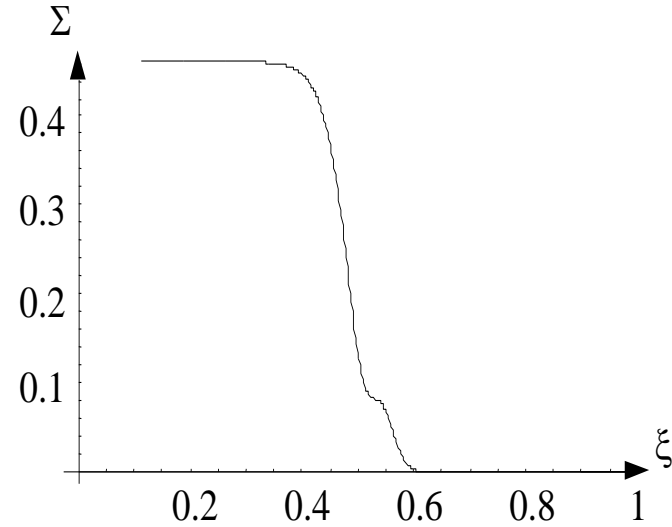
$$\dot{\delta} = -\zeta \frac{\partial F}{\partial \delta}$$

$$\Pi'_{ik} = L_{iklm}^{(2)} e^{p_{lm}} - L_{iklm}^{(3)} \frac{\Delta p'_{lm}}{\Delta t}$$

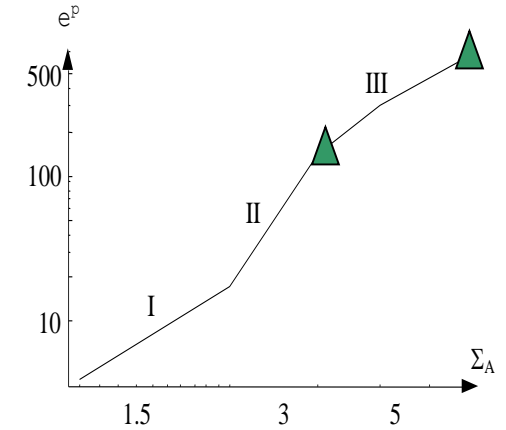
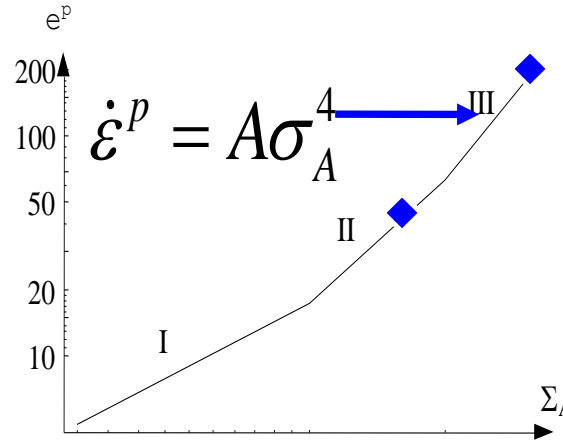


Пластические волновые фронты

Wave front

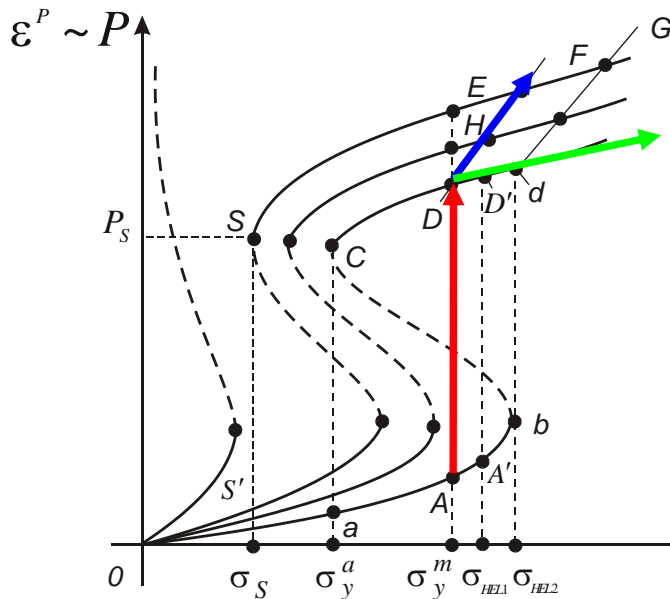


Characteristic regimes



Swegle-Grady regime

Transition to «overdriven shock»



$$F = F(p, \delta, \sigma)$$

$$\frac{dp}{dt} = -L_p \frac{\partial F}{\partial p}$$

$$\frac{d\delta}{dt} = -L_\delta \frac{\partial F}{\partial \delta}$$

•“Frozen” scaling kinetics :

•Relaxation times

$$\tau_p = (AL_p)^{-1} \tau_\delta = (AL_\delta)^{-1}$$

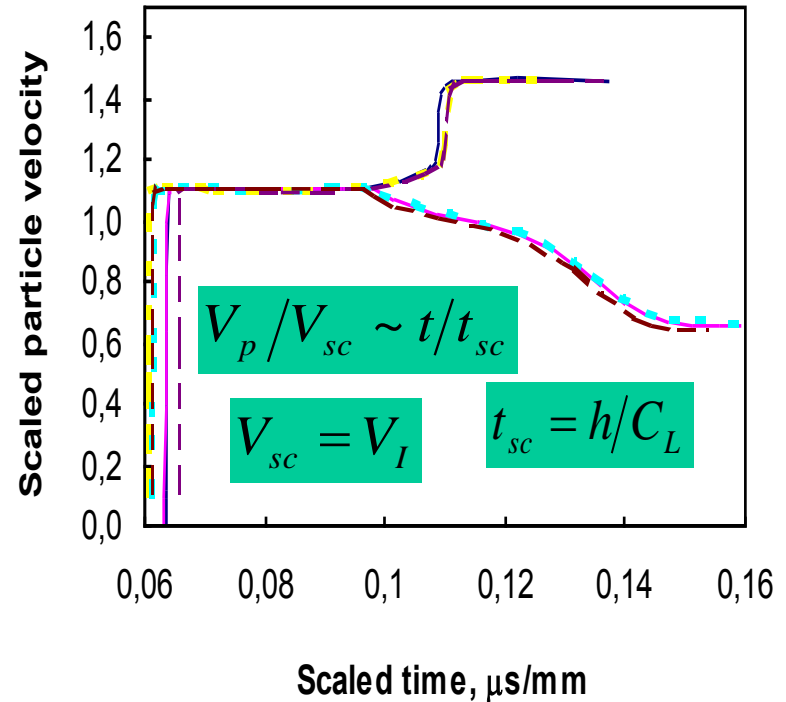
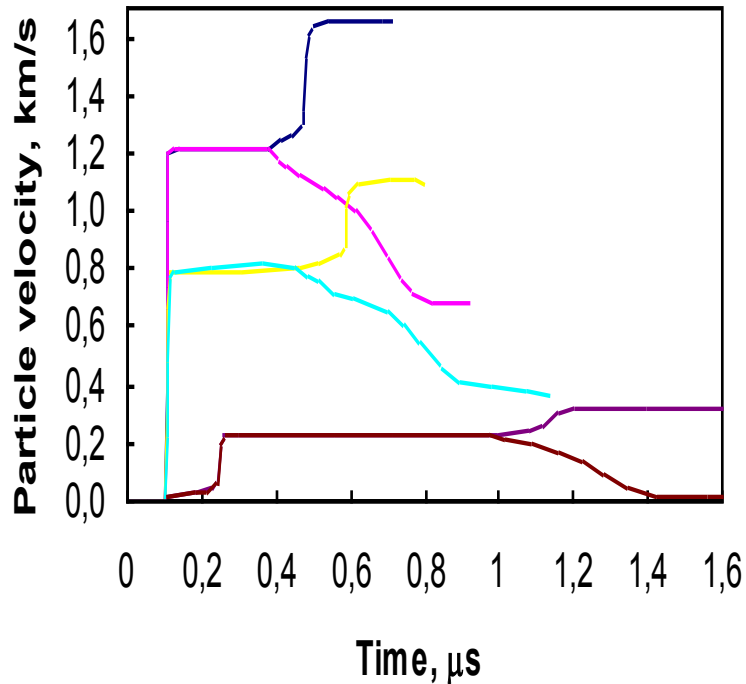
DHF: $\dot{\epsilon}^{-1} \geq (\tau_p, \tau_\delta)$

DD'd: $\dot{\epsilon}^{-1} \ll (\tau_p, \tau_\delta)$

$$\frac{\partial F}{\partial p} = \frac{\partial F}{\partial \delta} = 0$$

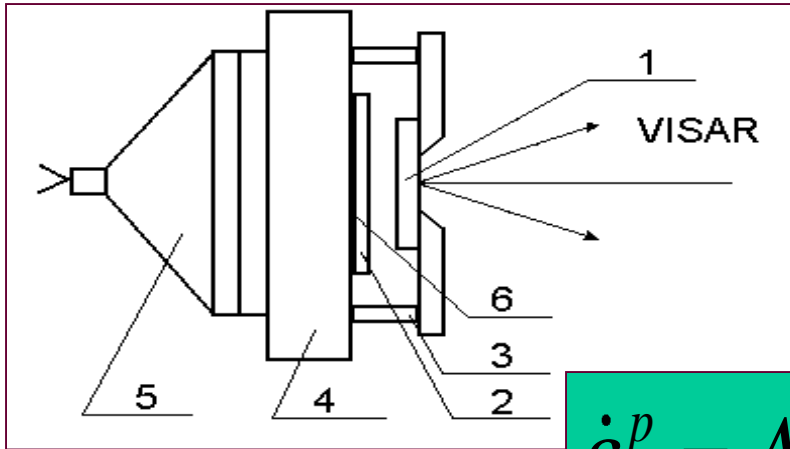
Self-Similarity of Shock Wave Fronts

- Particle velocity versus time for aluminum (with different grain size) in dimension and self-similar coordinates (J.Asay):

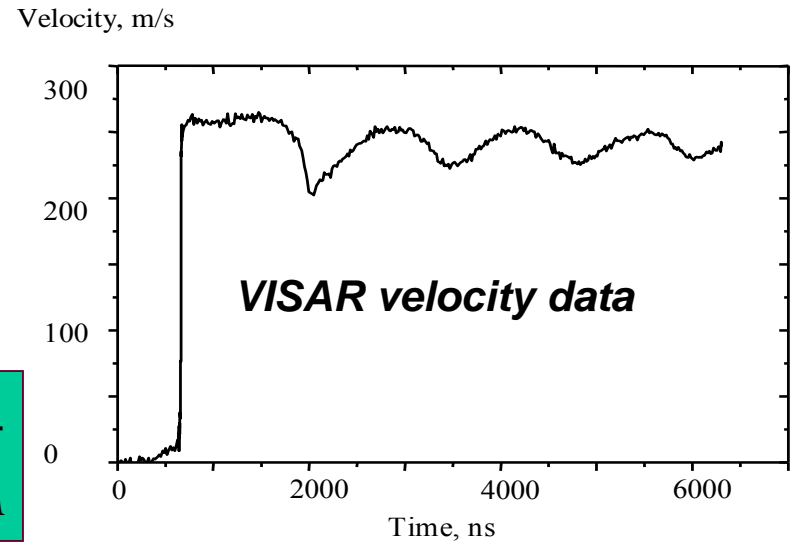


SWEGLE-GRADY универсальность пластических волновых фронтов

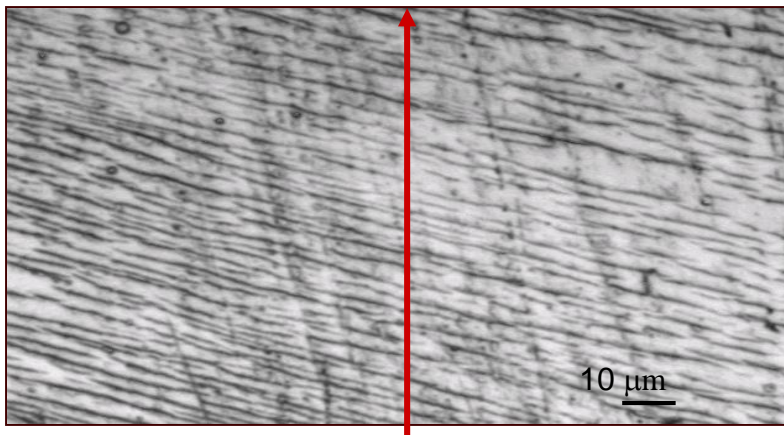
Experimental study (plate impact test for copper)



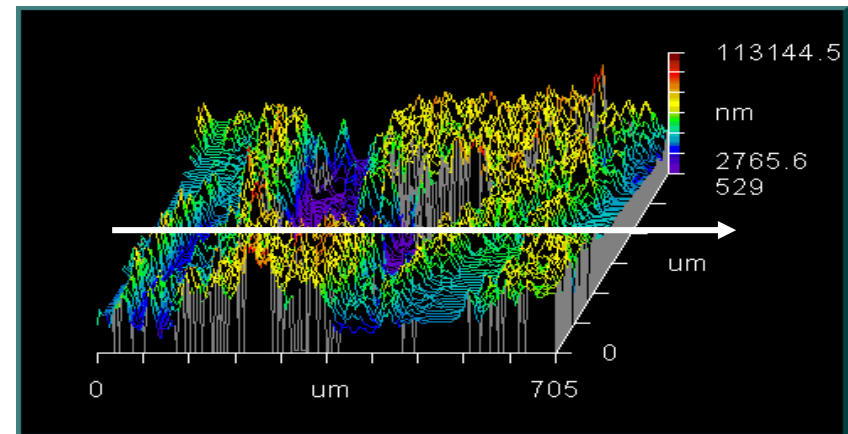
$$\dot{\epsilon}^p = A \sigma_A^4$$



Structure of deformed copper

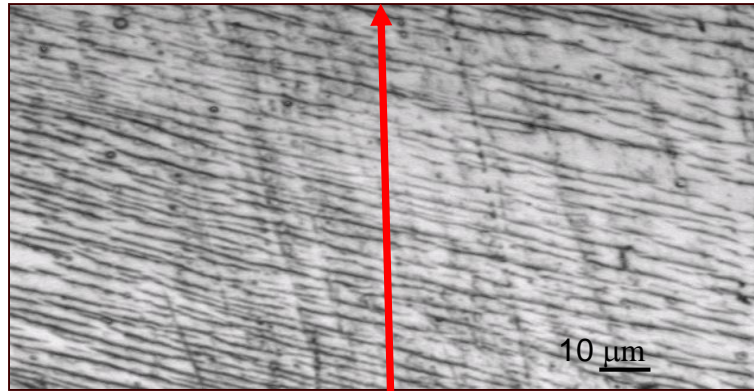


New View data

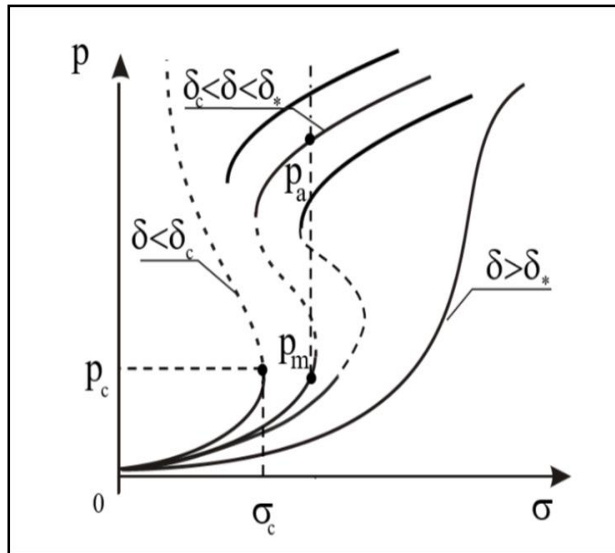
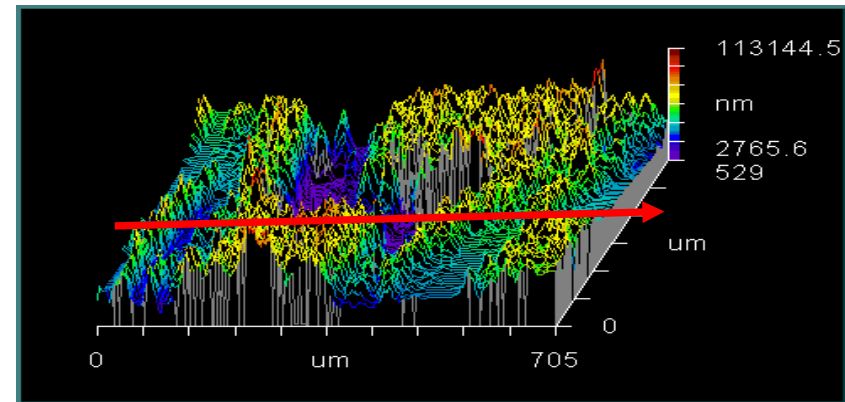


SWEGLE-GRADY универсальность пластических волновых фронтов

Structure of deformed copper

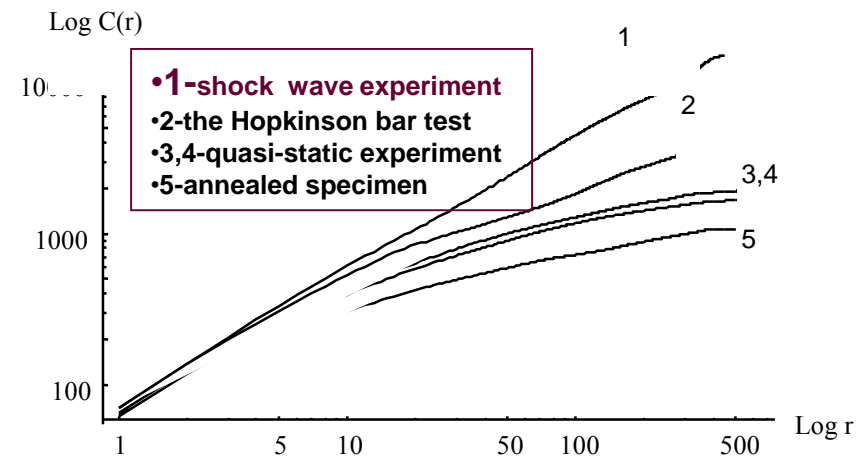


New View data



•Correlation analysis (the Hurst exponent)

$$C(r) = \left\langle \frac{Max(z(x)) - Min(z(x))}{\{x, x+r\}} \right\rangle_x \propto r^H$$



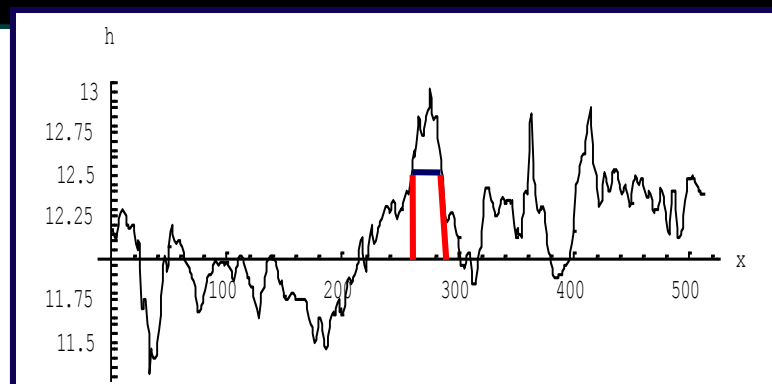
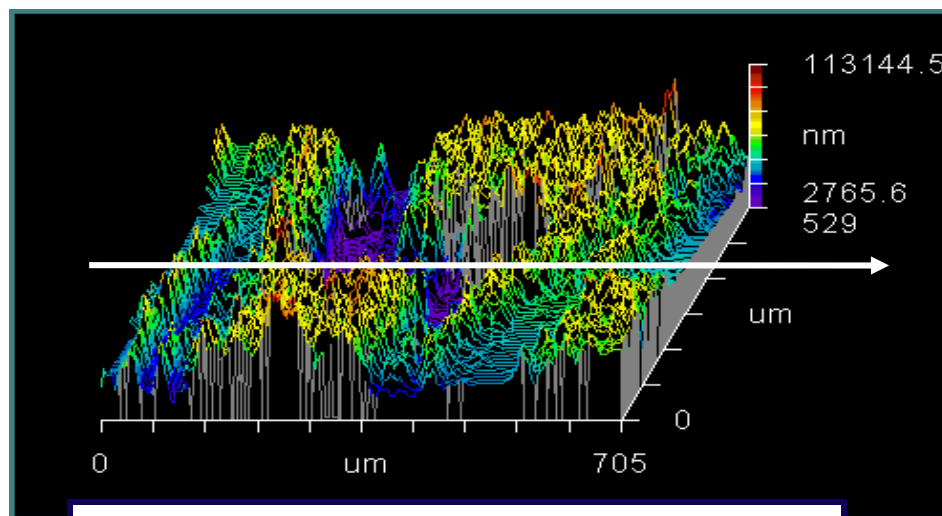
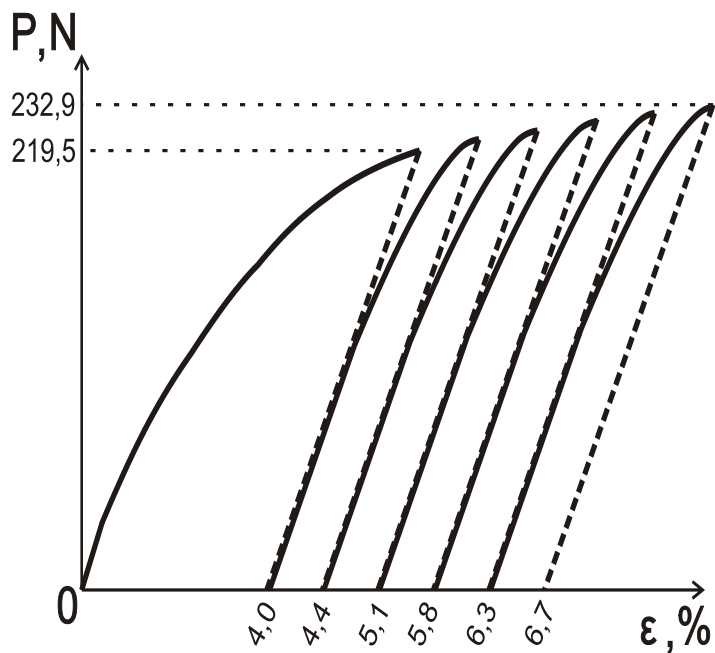
$$p(x,t) = \frac{1}{2} p_a [1 - \tanh(\xi l^{-1})]$$

$$\xi = x - Vt, \quad V = \chi A (p_a - p_m) / (2L_p^{-2})$$

Эффективные температуры. Проблема ФПУ

- Mean-square fluctuation

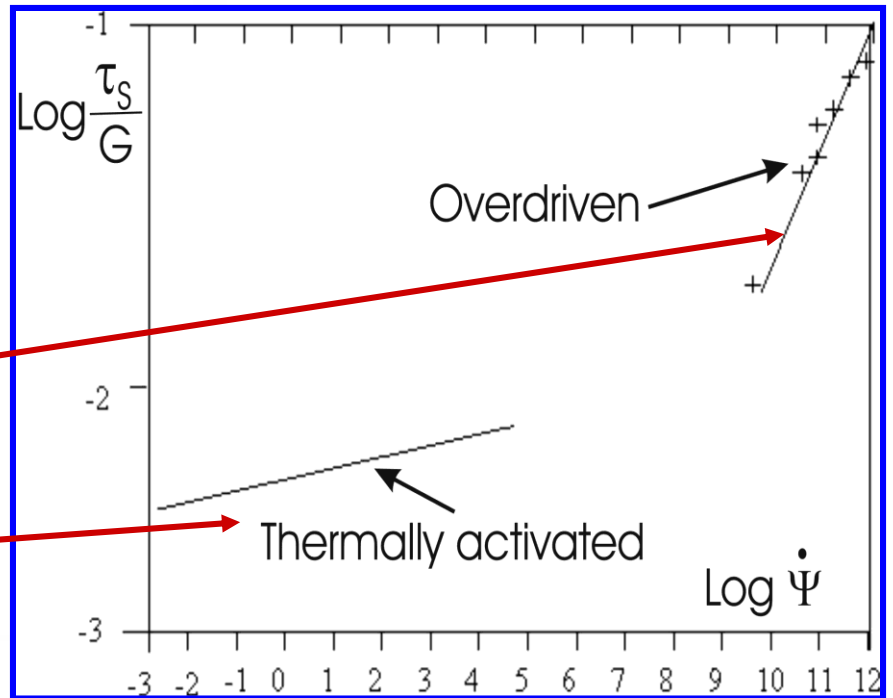
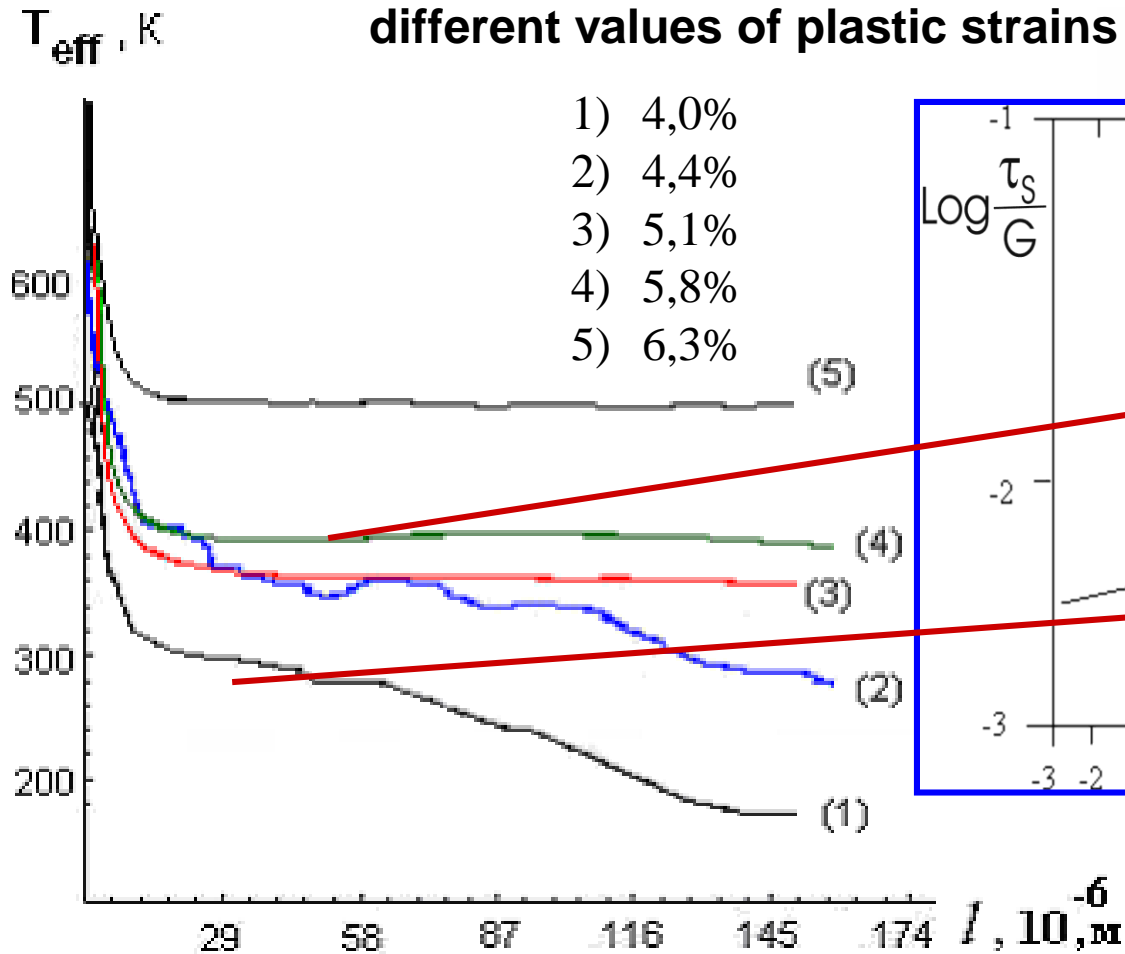
$$\overline{(S - s)^2} = \frac{T}{\left(\partial^2 F / \partial s^2\right)} = \chi T$$



Effective temperature

Effective temperatures corresponding to different values of plastic strains ε :

- 1) 4,0%
- 2) 4,4%
- 3) 5,1%
- 4) 5,8%
- 5) 6,3%



Laser Shock Peening

Импульсное нагружение реализовано на установке Beamtech SGR-Extra-10 (энергия в импульсе 10 Дж, длительность импульса 11нс, диаметр пятна 3мм), совмещенной с регистрацией параметров ударно-волнового импульса методом доплеровской интерферометрии (лазерный измеритель скорости FDVI Mark IV VISAR)

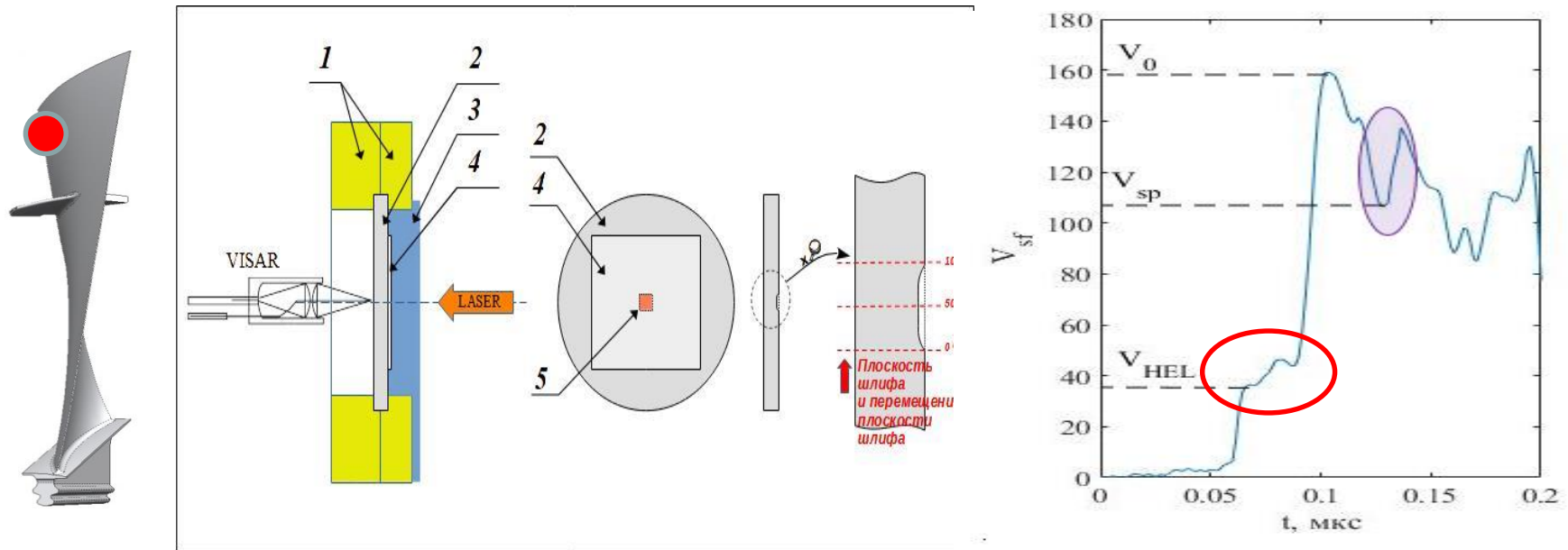


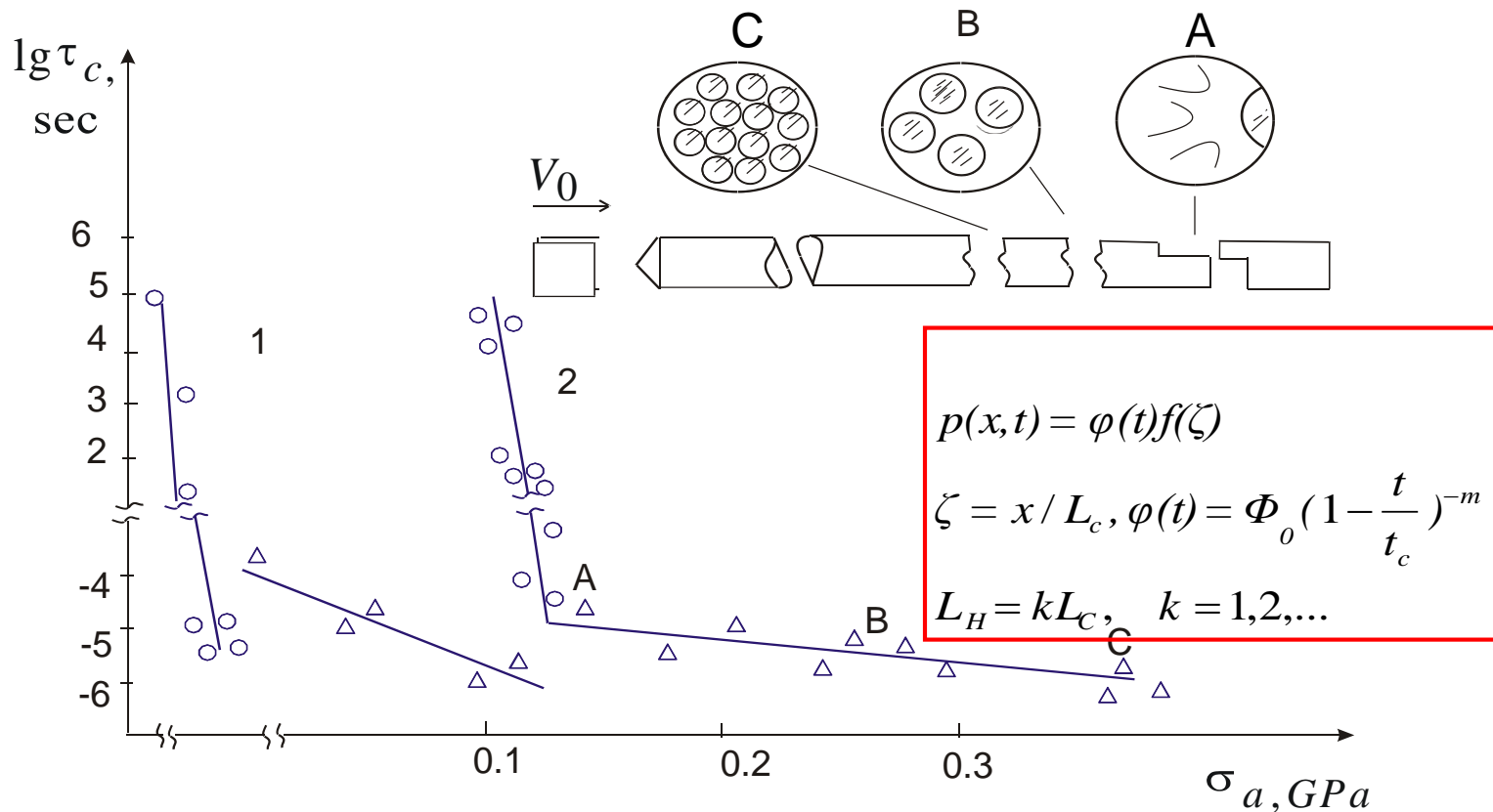
Рис. 1. Схема эксперимента и пробоподготовки образцов после нагружения. Обозначения: 1 - разъемная оснастка для закрепления образца; 2 - образец; 3 - завеса воды (ламинарный поток); 4 - Al фольга, наклеенная на образец; 5 - зона воздействия лазера



«Резонансное» разрушение в условиях откола

Е.Беллендир, В.Беляев, О.Наймарк, Доклады АН СССР, 1989

«Динамическая ветвь» при отколе

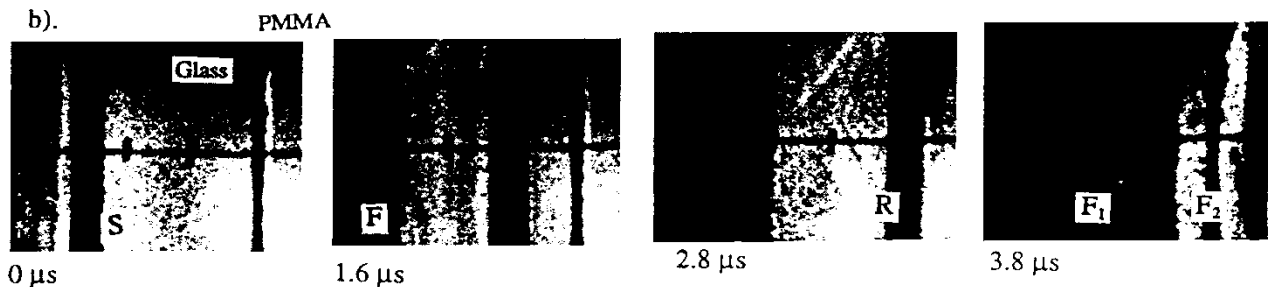
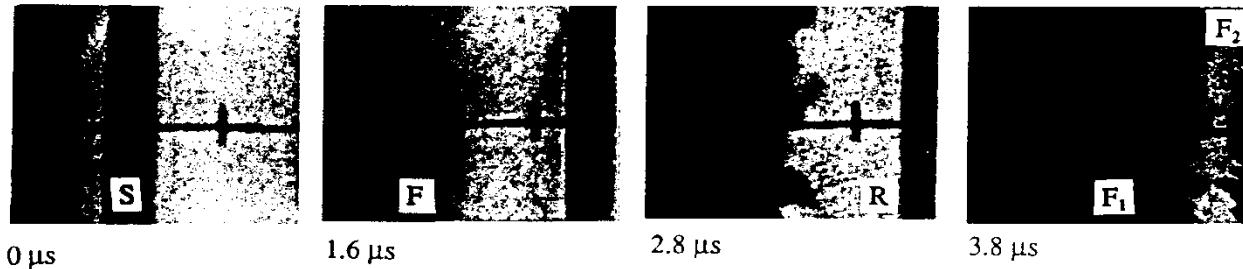


Зависимость времени откольного разрушения t_c от амплитуды напряжений σ_a при ударно-волновом нагружении (PMMA (1) и ультрафарфор (2))

Волны разрушения

Л.А. Галин 1975; Rasorenov, S.V., Kanel, G.J., Fortov V.E. and Abasenov, M.M.(1991). High Press. Res. 6, 225.

High Speed Framing of Shock Wave Propagation in Glass (N. Bourne et al., 1994)



Main Open Questions

How does a failure wave start?

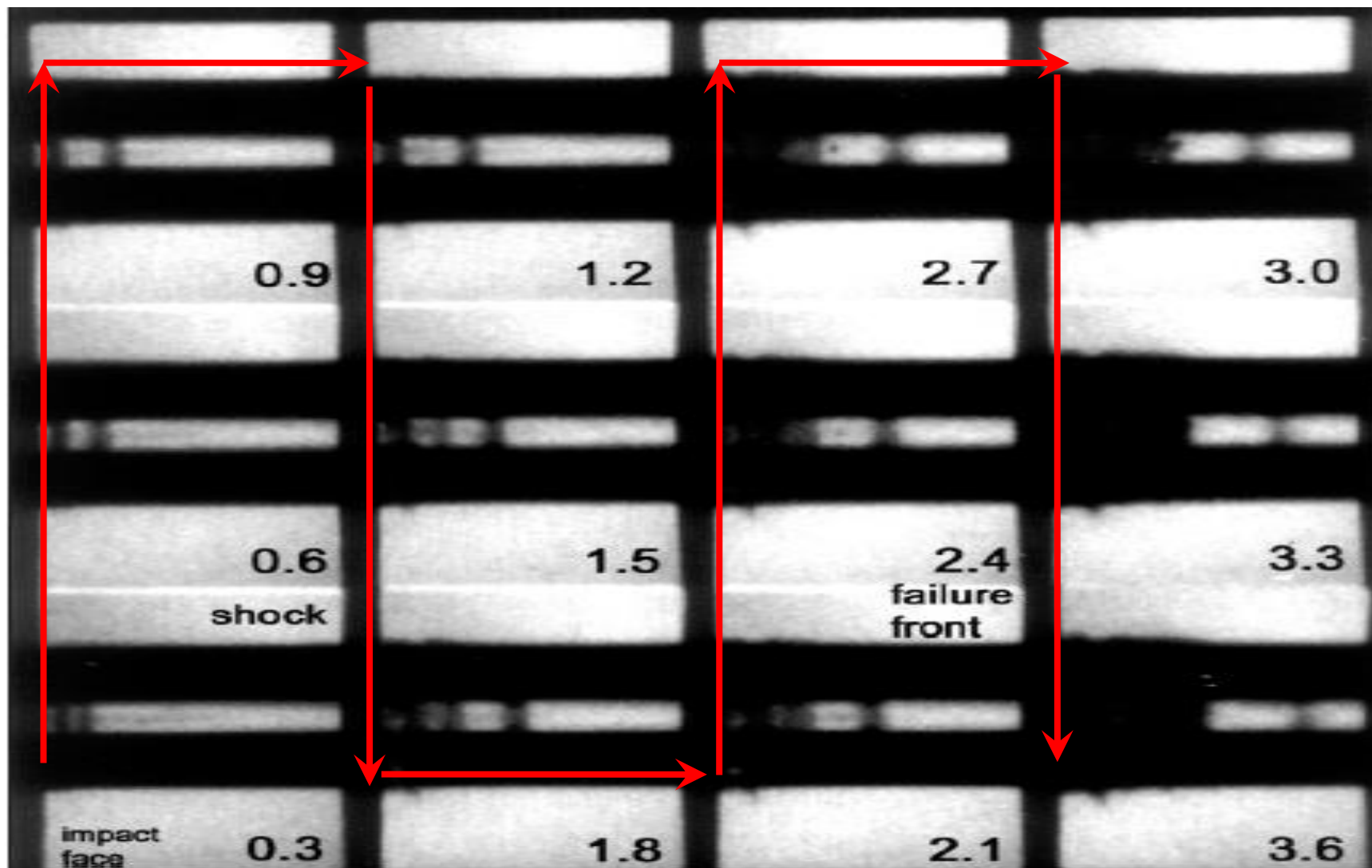
How does a failure wave propagate?

What is the material state behind a failure wave?

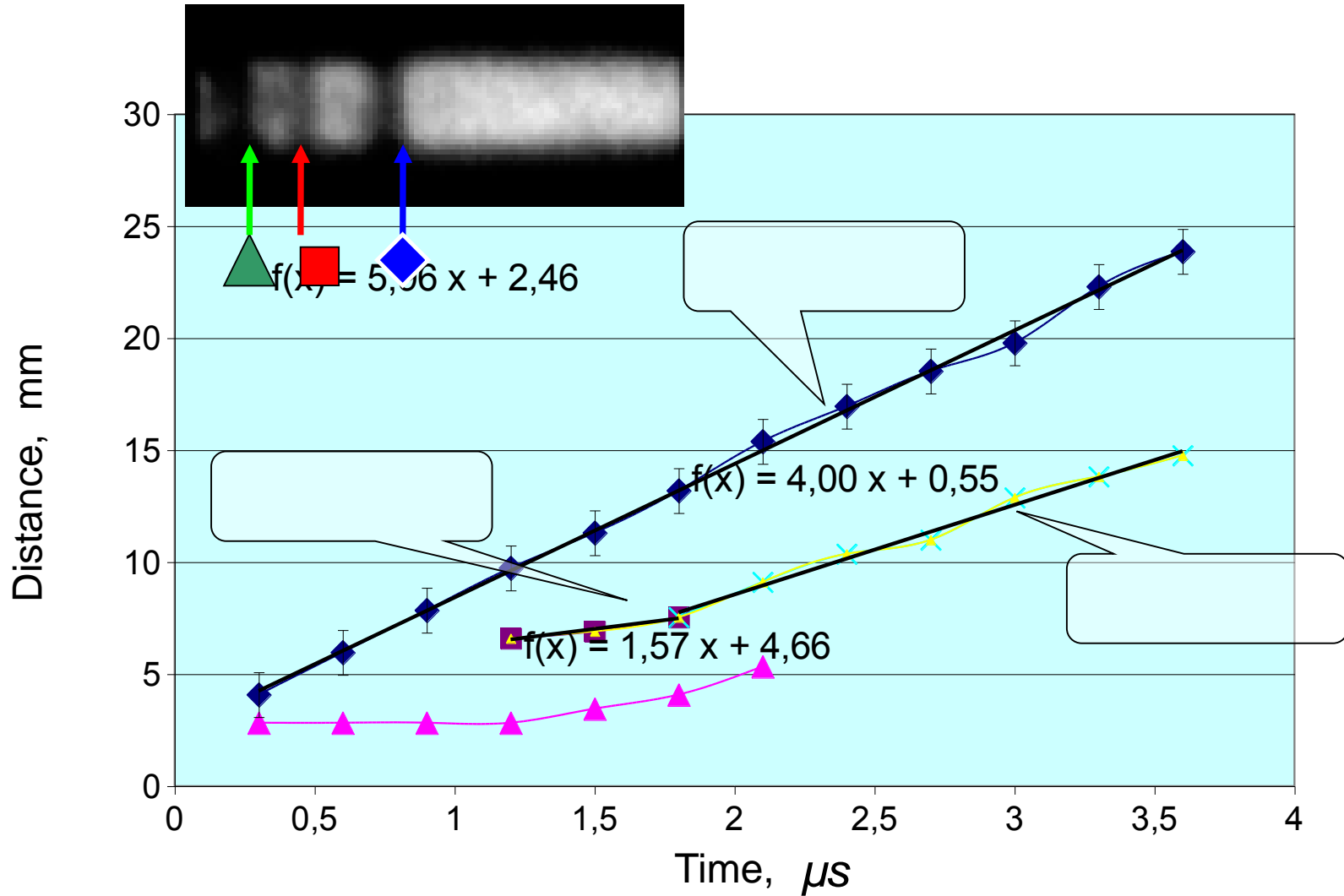
What are the kinetics of failure process and failure wave?

Волны разрушения в образце плавленного кварца

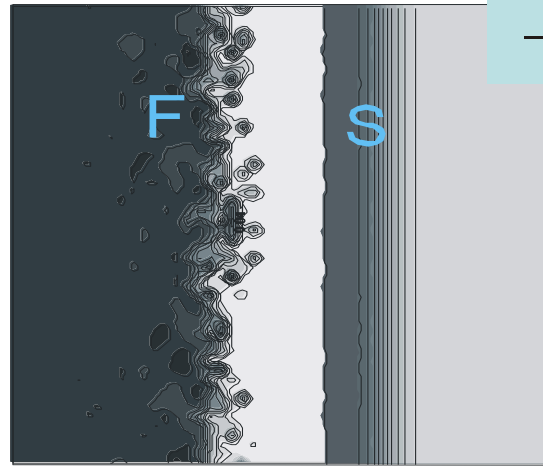
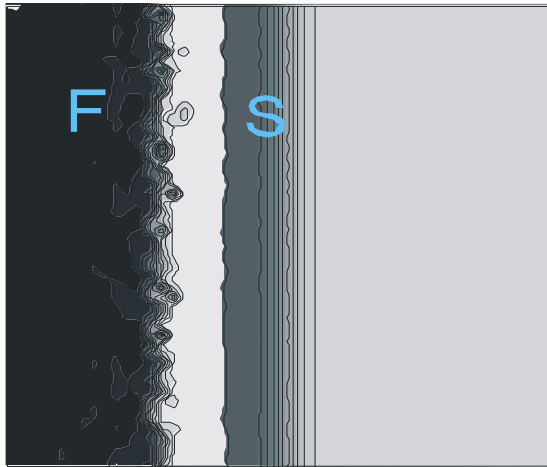
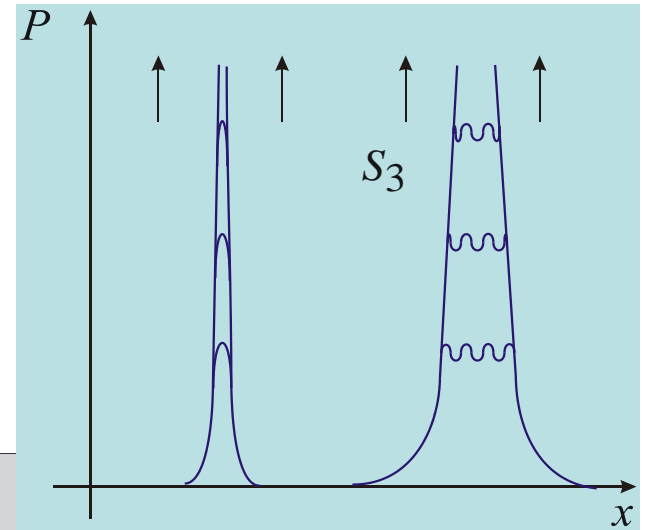
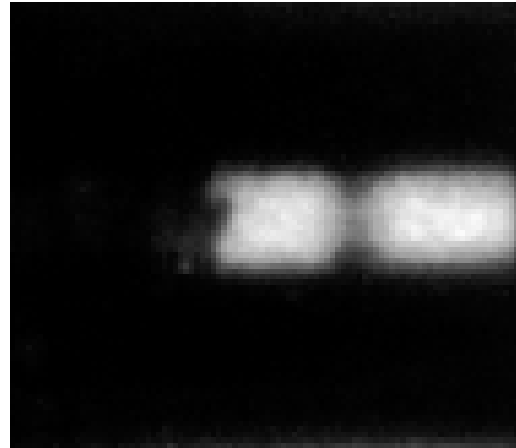
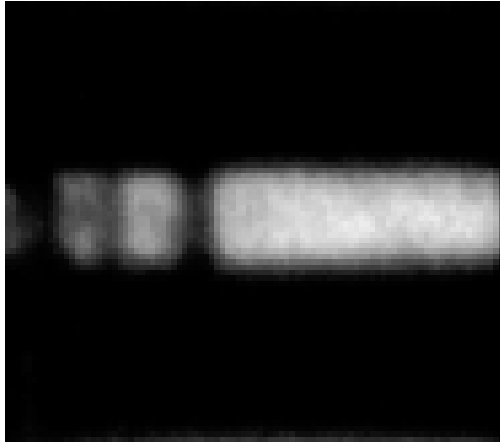
D.Radford, W.Proud, J.Field, O.Naimark, S.Uvarov et al., 2003



Скорости волновых фронтов



Результаты моделирования



$$p(x, t) = \varphi(t)f(\zeta),$$

$$\zeta = x/L_c, \varphi(t) = \Phi_0 \left(1 - \frac{t}{t_c}\right)^{-m}$$

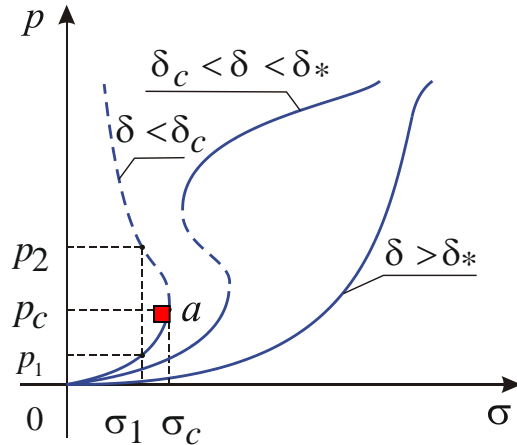
$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z},$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} \sigma_{zz} + p_{zz},$$

$$\frac{\partial p_{zz}}{\partial t} = -L \frac{\partial F}{\partial p_{zz}} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\chi \frac{\partial p_{zz}}{\partial z} \right)$$

FAILURE WAVES

Characteristic non-linearity



General equations

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z},$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} \sigma_{zz} + p_{zz},$$

$$\frac{\partial p_{zz}}{\partial t} = -L \frac{\partial F}{\partial p_{zz}} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\chi \frac{\partial p_{zz}}{\partial z} \right)$$

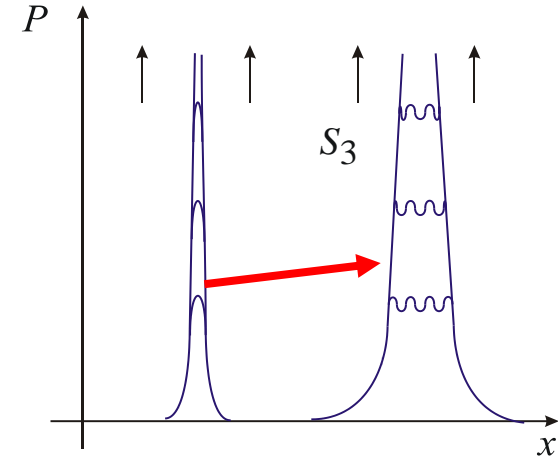
Boundary and Initial Conditions

$$\sigma_{zz}|_{z=0} = \Sigma(t), \quad \sigma_{zz}|_{z=h} = 0$$

$$p_{zz}|_{z=0} = p_{zz}|_{z=h} = 0$$

$$\sigma_{zz} = p_{zz} = 0 \quad \text{for} \quad t = 0$$

“Blow-up” collective modes



Self-similar solution

For $p > p_c$:

Driving force

$$\frac{\partial F}{\partial p} = S_0(p_c) p^q$$

Non-locality
parameter

$$\chi = \chi_0(p_c) p^\beta$$

$$g(t) = G \left(1 - \frac{t}{\tau_c}\right)^{-m}$$

$$p = g(t) f(\xi)$$

$$\xi = x / \varphi(t)$$

“Blow-Up” Front:

$$x_f = \xi_f \chi_0^{1/2} S_0^{-\frac{q}{2(\beta-1)}} t^{\frac{\beta-q+1}{2(\beta-1)}}$$

Самоорганизованная критичность хрупкого разрушения. Масштабная инвариантность явления фрагментации

В соответствии с представлениями о структурно-скейлинговых переходах, новым типом критических явлений в мезоскопических системах с дефектами, установлен пространственно-временной скейлинг процессов фрагментации.

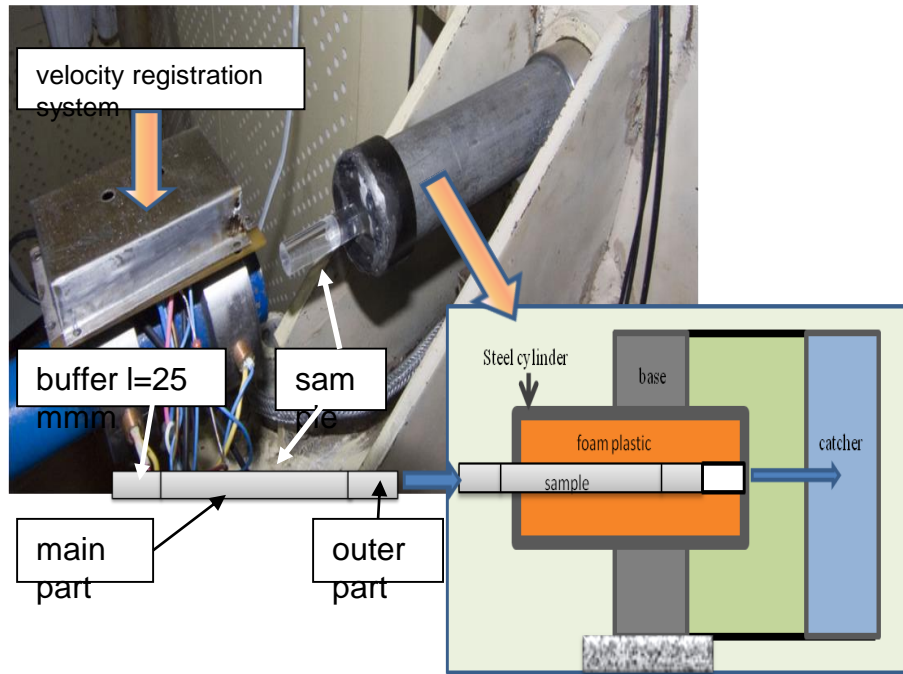


Рис.1. Экспериментальная установка по динамическому нагружению образцов для исследования статистических закономерностей фрагментации

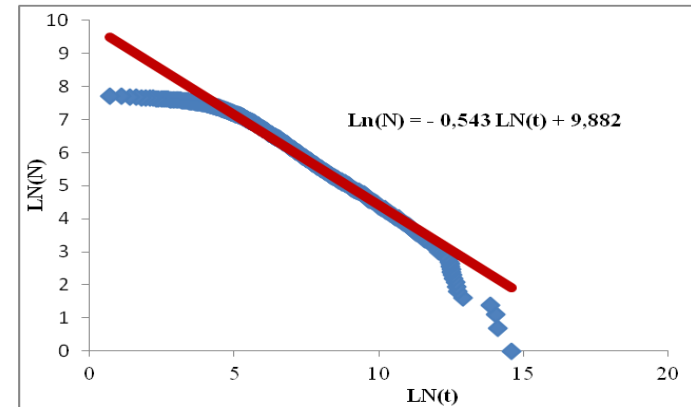
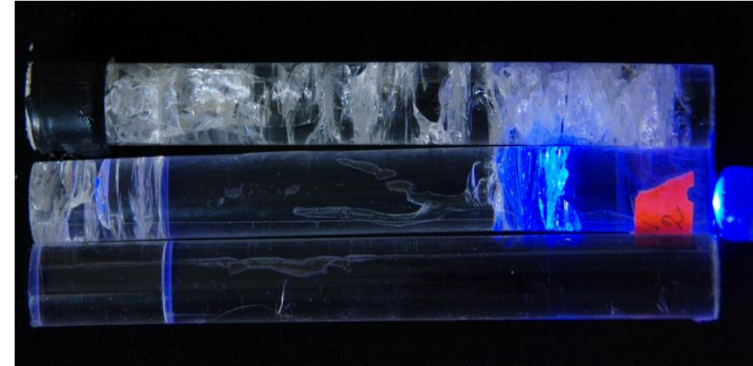
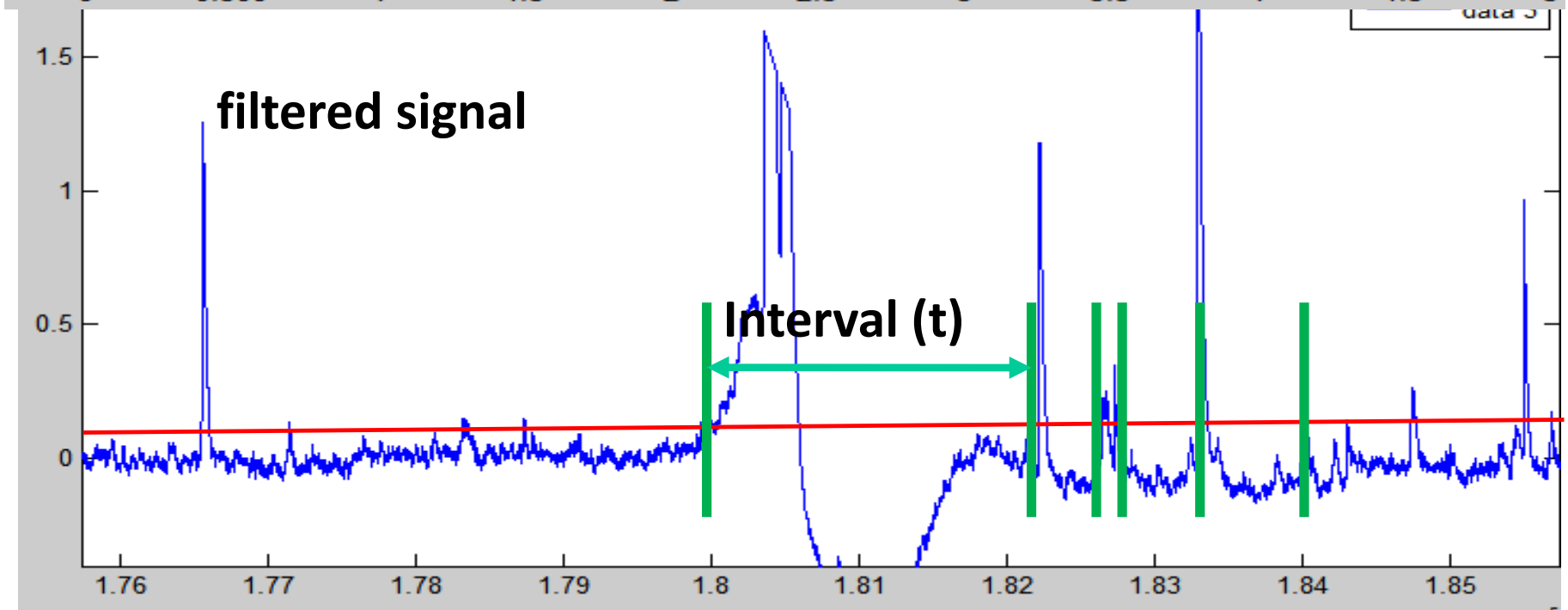
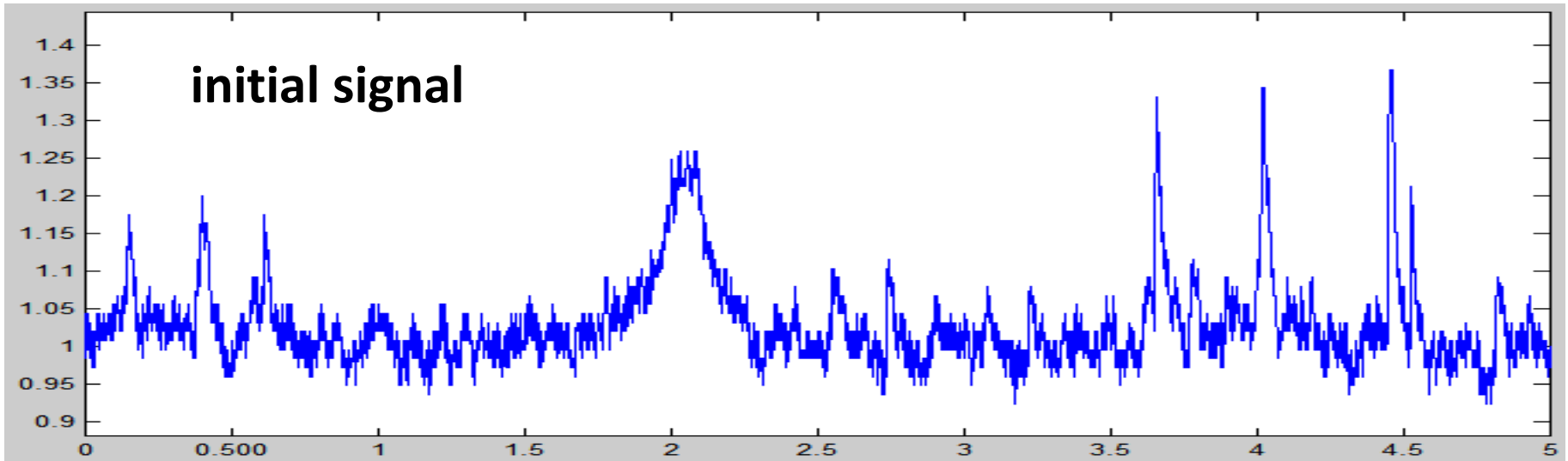


Рис.2. Кумулятивная функция распределения временных интервалов, соответствующих формированию поверхностей разрушения

Data processing



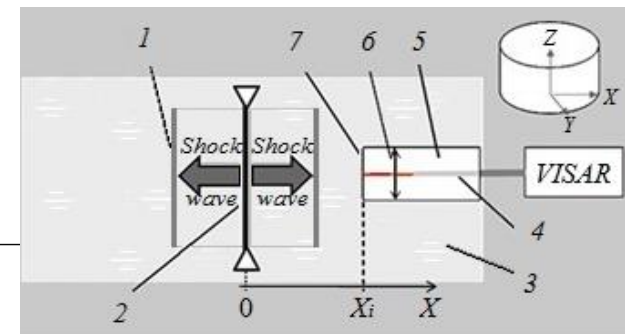
Метод оценки характеристик поглощения механической энергии и роли структурных факторов при динамическом нагружении керамик

Давыдова М.М., Уваров С.В., Наймарк О.Б.
 Пространственно-временная масштабная инвариантность при динамической фрагментации квазихрупких материалов // Физическая мезомеханика.-2015.-Т.18.-№1.-С.100-107.

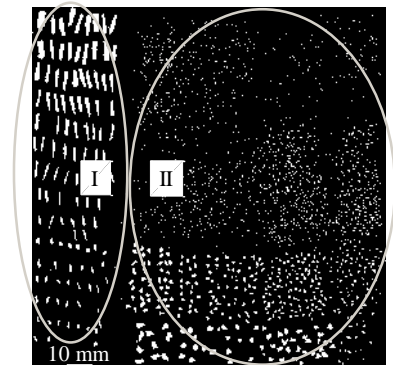
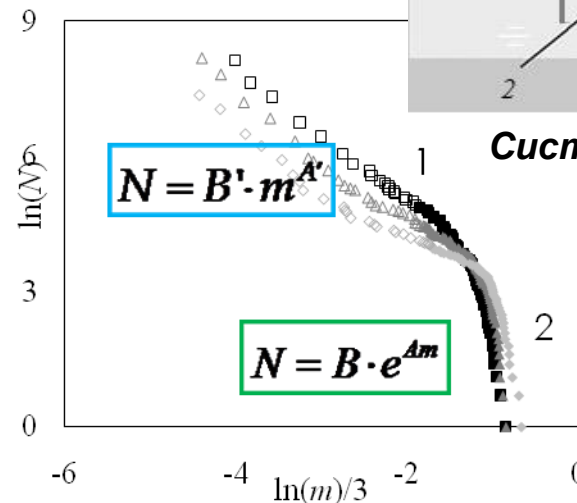


Экспериментальный комплекс

Фрагментация цилиндрических образцов

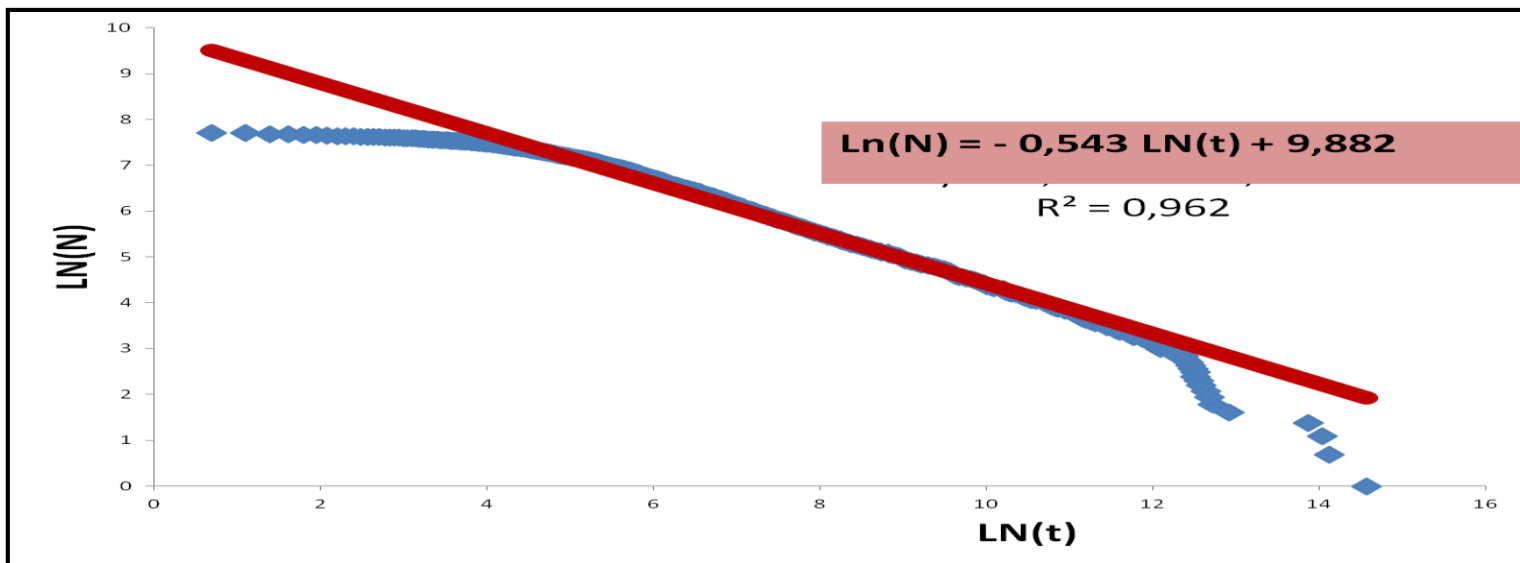
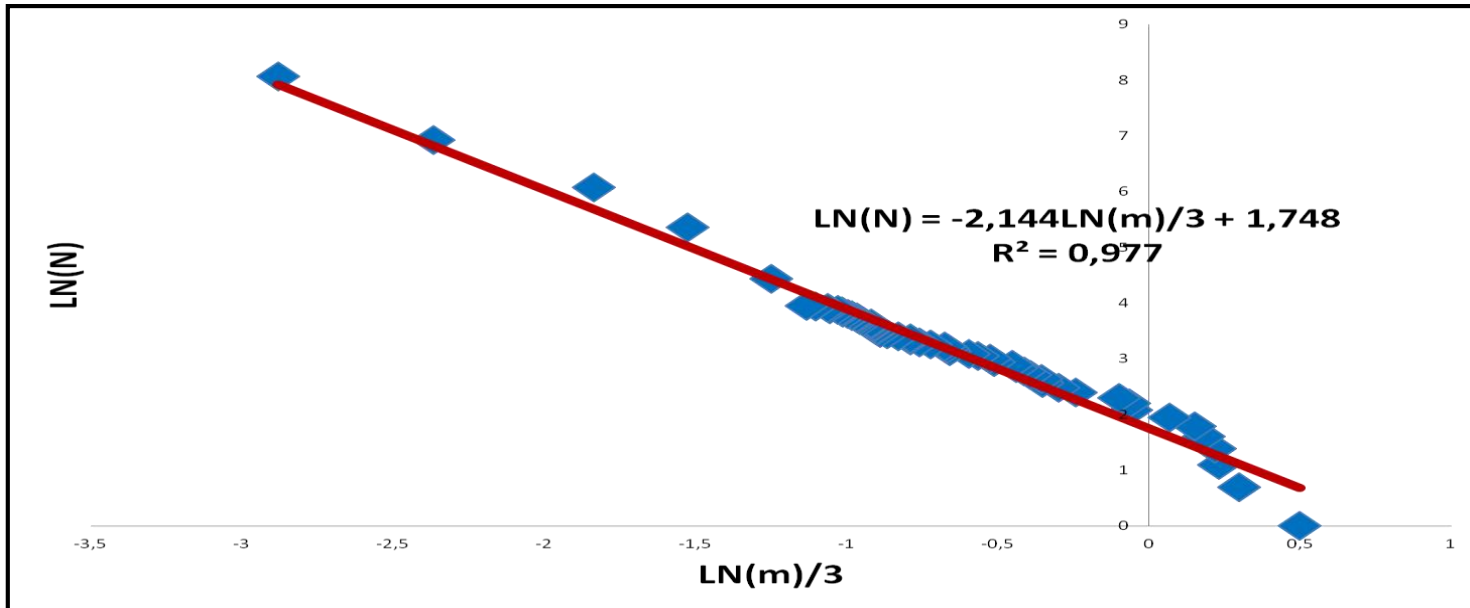


Система измерений



Статистические распределения фрагментов

Кумулятивные пространственные и временные распределения



Time interval distribution in ceramics

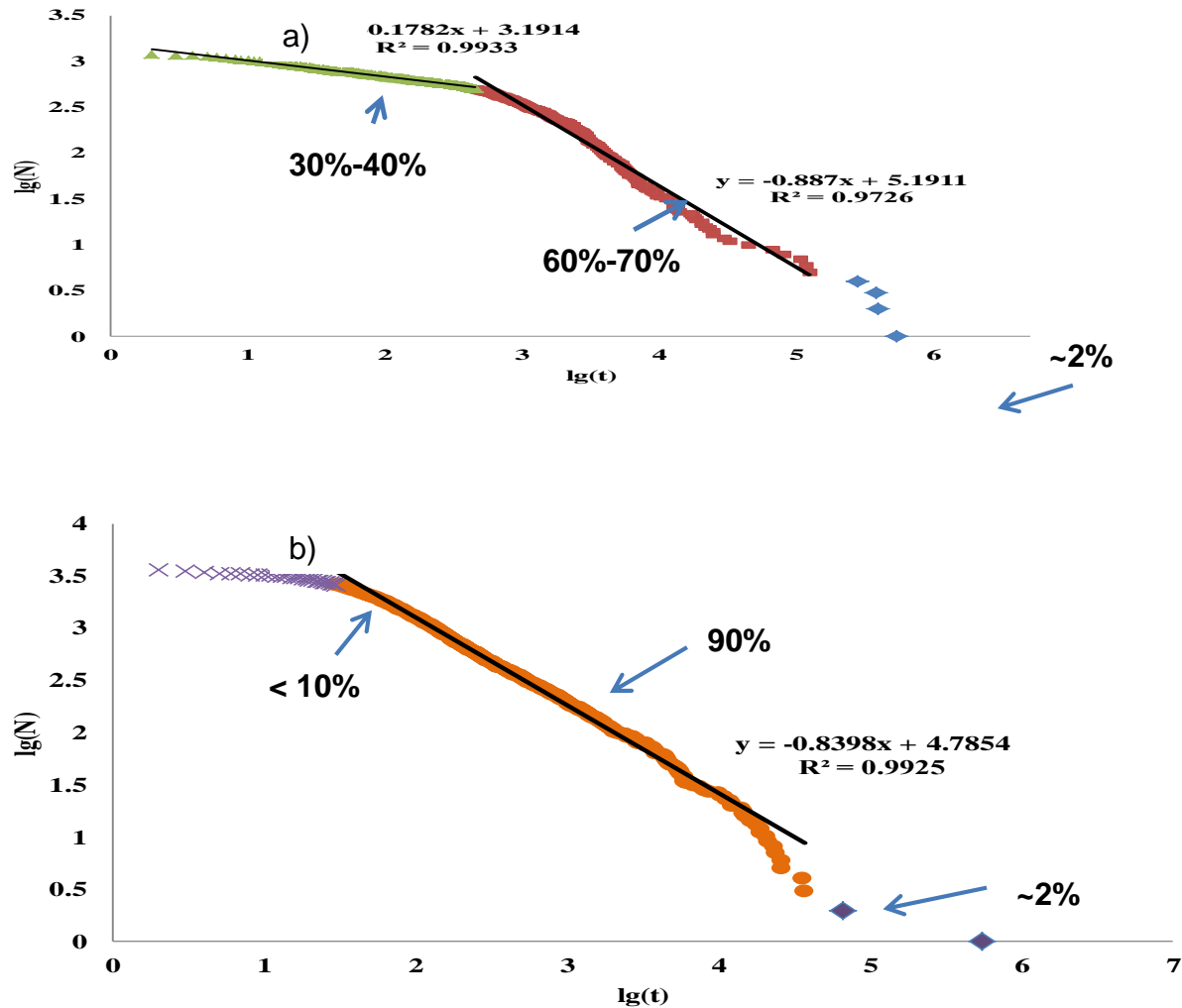
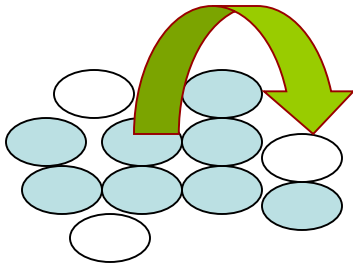


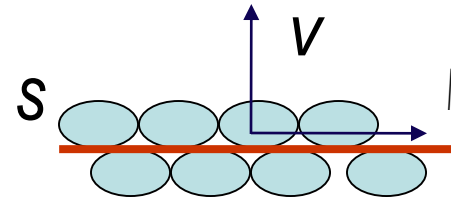
Figure 1. Fracture time interval distribution in shocked ceramics: a: porosity 10%; b: porosity 60%

Я.И. Френкель «Кинетическая теория жидкостей»

- Определение точки плавления, традиционно используемое в термодинамике, основано на сопоставлении потенциалов для жидкого и твердого состояний.
- Этот подход основан на косвенном предположении, что эти два фазовых состояния различны, то есть промежуточное состояние отсутствует.
- В действительности определение статистического интеграла, свободной энергии должно включать все возможные фазовые переменные как для жидкого, так и твердого состояний.



$$\int \exp(-E/kT) d\Gamma$$



$$\tau_D = \Delta^2 / 6D_{sd} \sim 10^{-11} \text{ c}$$

$$t_m \rightarrow 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

$$s_{ik} = \frac{1}{2} s (v_i l_k + l_i v_k)$$

B.V.Derjagin: Anomalous Water

- B. V. Derjagin & N. V. Churaev. Nature of "Anomalous Water" . *Nature* 244, 430-431, 1973.
- Б.В. Дерягин, И.И. Абрикосова, Е.М. Лифшиц. Молекулярное притяжение конденсированных тел, 1958.
- B.V.Derjagin et al., Shear elasticity of low-viscosity liquid at low frequencies. *Phys.Rev.A*,1990

УФН,

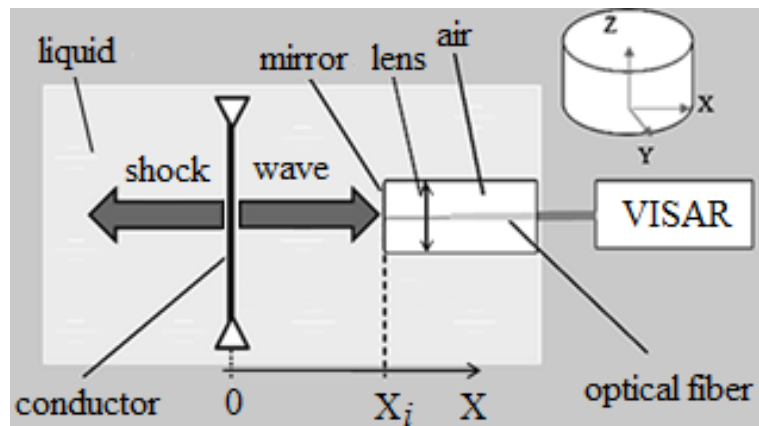
Our research work on the measurement of the shear elasticity of liquids had started with just the investigation of the shear mechanical properties of the boundary layers of liquids.² We actually detected a shear elasticity in thin layers of liquids at a frequency of shear oscillations of about 10 Hz. ~~However, a detailed investigation of this property, depending on the thickness of a tested film, has shown that the shear elasticity is inherent to the bulk liquid. Moreover, it has been established that this property is possessed by all the liquids without exception, independently of their viscosity and polarity.³⁻⁷~~ In accordance with the present notions, this property should have been observed at frequencies of 10^{11} – 10^{12} Hz; that is, at 6–7 orders of magnitude higher frequencies than in the present experiments. ~~This conclusion follows from the fact that the time of settled life of separate liquid molecules in a temporary equilibrium state is a relaxation time of the nonequilibrium state. The relaxation time is evaluated in accordance with the self-diffusion rate. Hence this time, when calculated with the Einstein formula, will be equal to~~

$$\tau = \frac{\delta^2}{6D} , \quad (1)$$

Экспериментальное исследование ударно-волновых фронтов в жидкостях

• O.B.Naimark. Defects induced instabilities in condensed matter. *JETPh Letters.*- 1998.-V. 67.- № 9.- P. 751-757.

• O.B.Naimark. Nonequilibrium structural transitions as mechanism of turbulence. *Technical Physics Letters.*-1997.-V.23.-№ 13.-P.81-87.



• SW initiation: electro-explosive method of copper wire (length 15 mm, diameter 0.01 mm, current density $\sim 10^{11}$ A/m²)

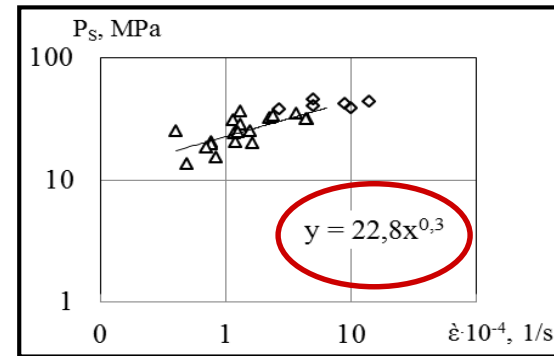
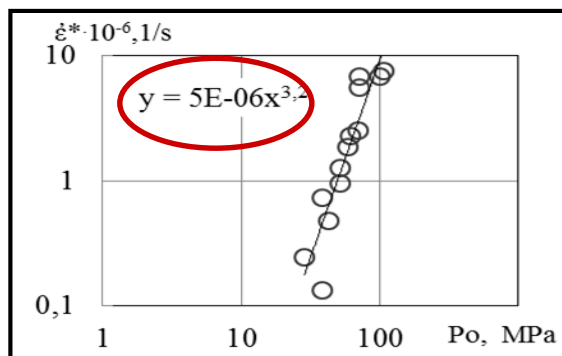
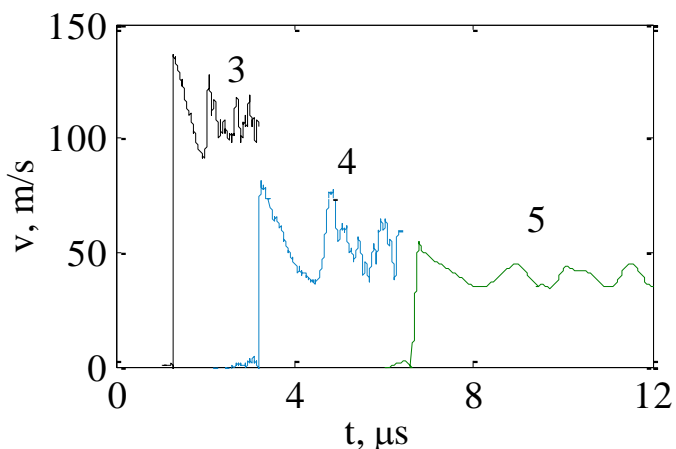


Fig.1. a) Particle velocity profiles: 3 – 10 mm; 4 – 14 mm; 5 – 25 mm. b) strain rate versus pulse amplitude. c) spall strength versus strain rate деформации.

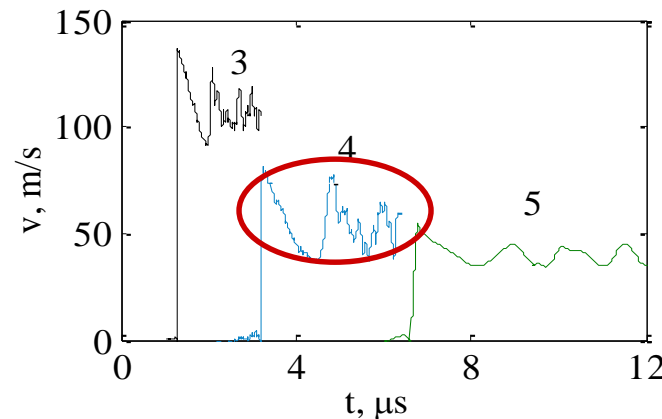
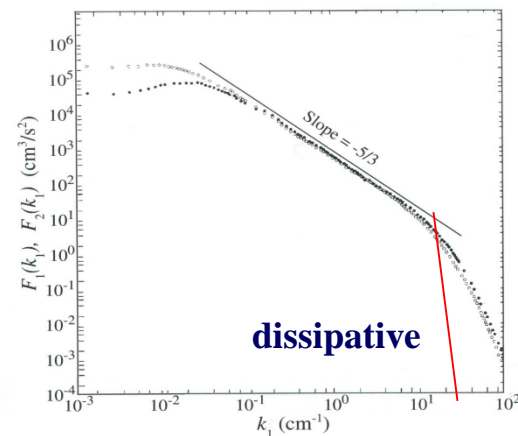
V.V.Новожилов: Пластичность – «замороженная» турбулентность

- B. V. Derjagin & N. V. Churaev. Nature of "Anomalous Water" . *Nature* 244, 430-431, 1973.
- Б.В. Дерягин, И.И. Абрикосова, Е.М. Лифшиц_Молекулярное притяжение конденсированных тел, УФН, 1958.
- B.V.Derjagin et al., Shear elasticity of low-viscosity liquid at low frequencies. *Prog. Surf. Sc.* – 1992. – V. 40. – Iss. 1-4. – P. 462–465.

The presence of shear elasticity at low frequencies proves that an earlier unknown, low-frequency, viscoelastic relaxation process takes place in liquids; the process may be attributed, probably, to collective interactions of molecules, because the relaxation time of nonequilibrium states of large groups of molecules may by many orders of magnitude exceed the time of settled existence of molecules of liquid.

There is no doubt that the existence of a low-frequency shear elasticity in liquids is of a great importance for the physics of the liquid state of matter and for cognate sciences, especially for the physical chemistry of surface phenomena, boundary layers, and disperse systems.

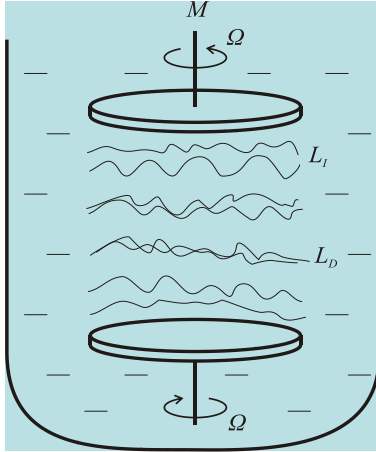
A unique series of works setting forth and experimentally showing the existence of a low-frequency shear elasticity of liquids. The series consists of experimental data (shear modulus G of a layer d , velocity v of the inter-surface layers could be calculated by the formula $G = \rho v d$).



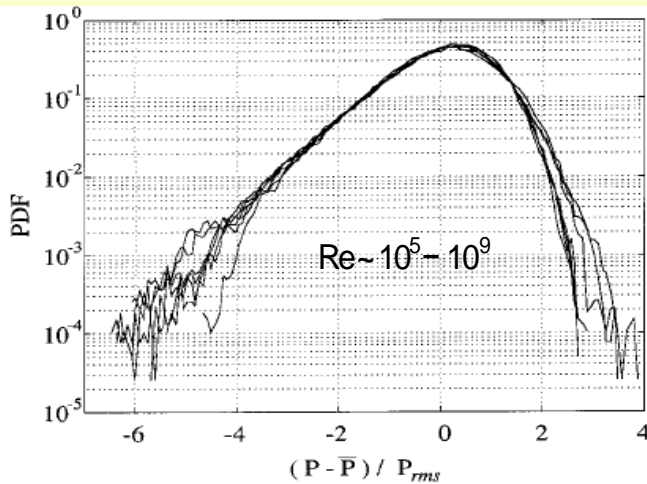
Колмогоров А.Н. О логарифмически нормальном законе распределения частиц при дроблении. // Доклады АН СССР, 1941. Т. 31, 2, - С. 99-101

Автомодельность полностью развитой турбулентности и неустойчивости пластического сдвига

Karman's instability

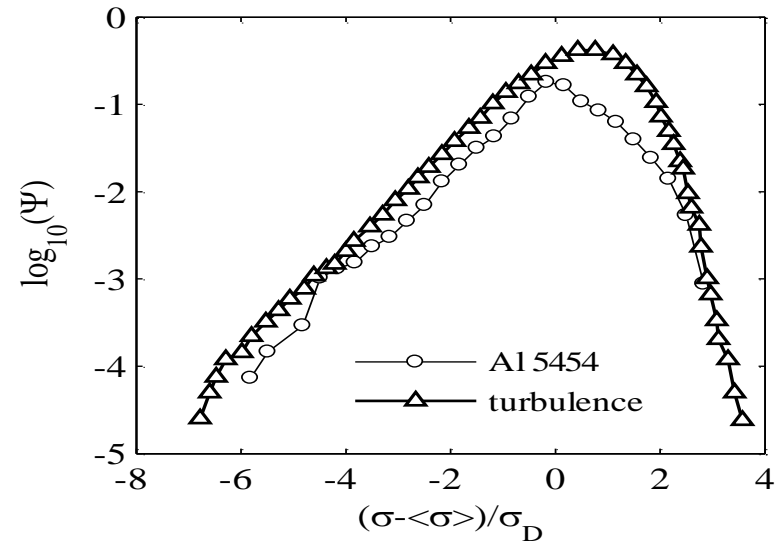
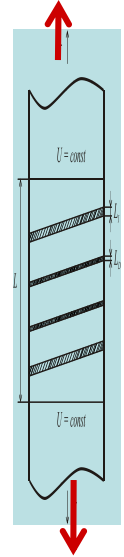
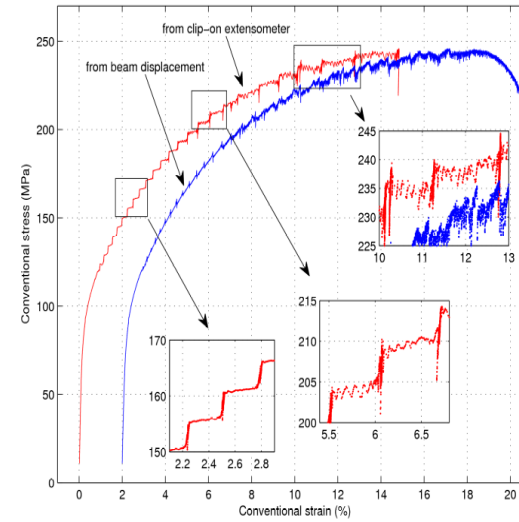


•Bramwell S.T., Holdsworth P.C.W., Pinton J-F. *Universality of rare fluctuations in turbulence and critical phenomena* // Nature, 1998, v.396, p.554.



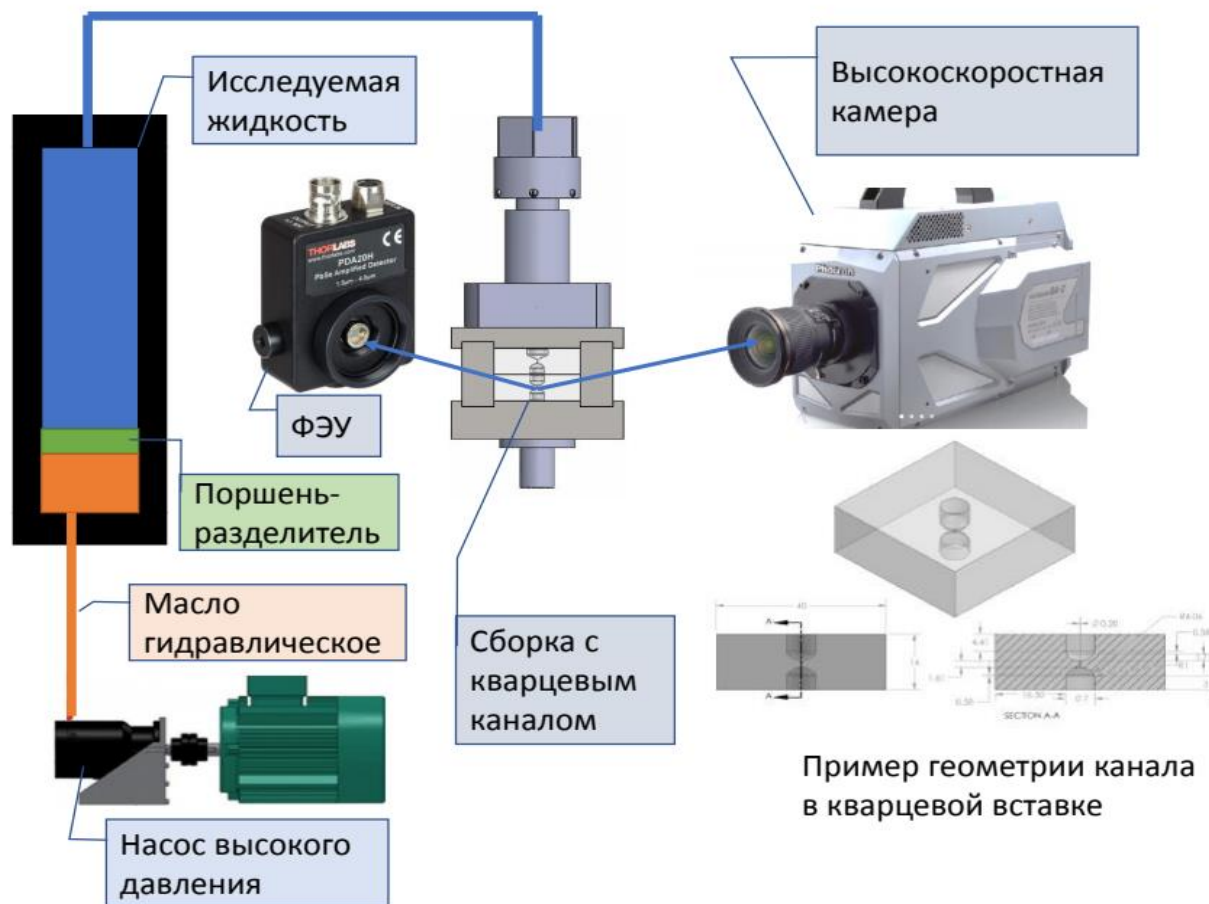
Независимость PDF от числа Рейнольдса в диапазоне четырех порядков

•Plastic Strain Instability in AlMg alloy

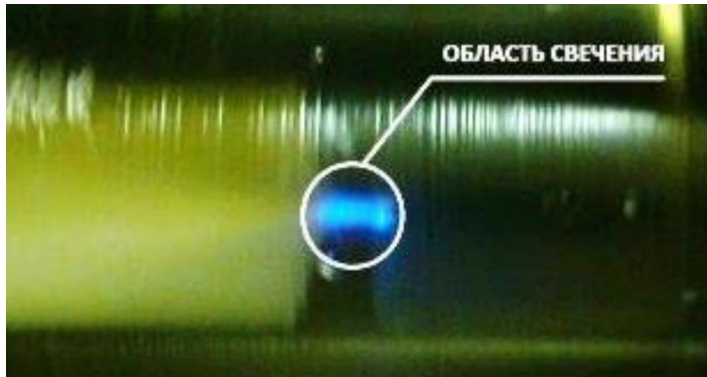


Экспериментальное исследование гидролюминесценции

Масло трансмиссионное: давление ~ 250 атм, скорость истечения ~280 м/с, диаметр канала $d=0,6$ mm



Гидролюминесценция. Граница возникновения свечения жидкости в зависимости от толщины канала



Д.А.Бирюков. Экспериментальное исследование люминесценции в жидкости.

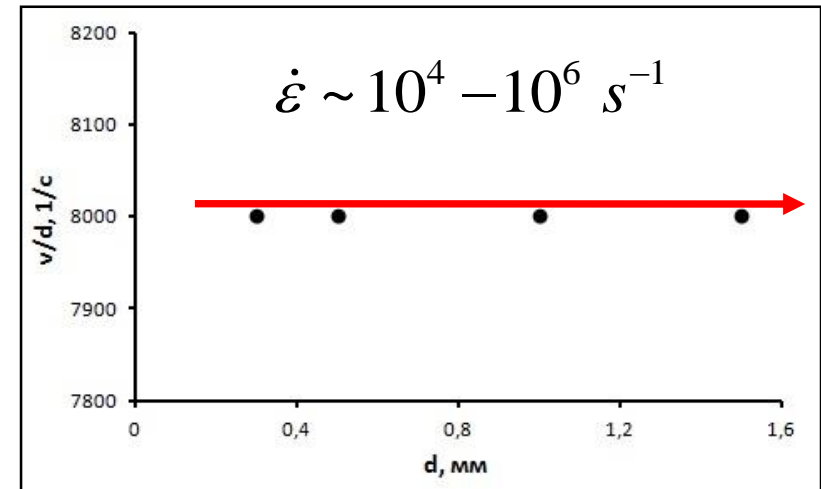
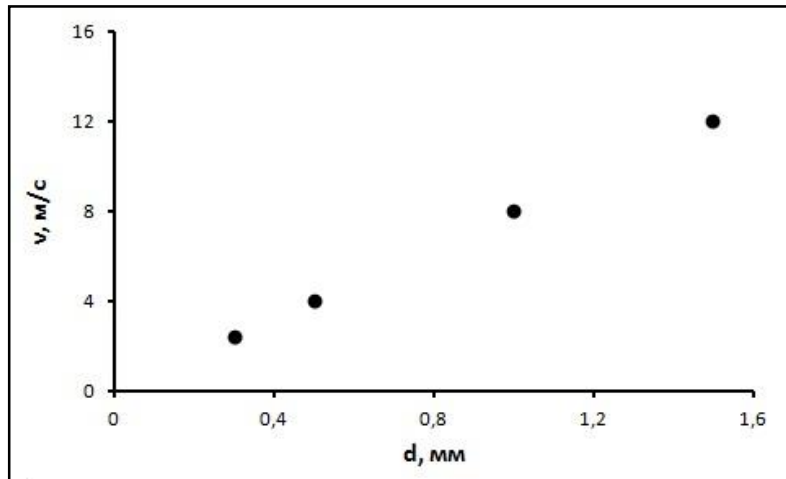


Рис.1. Граница возникновения свечения жидкости в зависимости от толщины канала и скорости потока [Герценштейн С.Я., Монахов А.А. Электризация и свечение жидкости в коаксиальном канале с диэлектрическими стенками // «Механика жидкости и газа», № 3, с. 114 – 119, 2009. 46].

Математическая постановка

$$\rho \dot{\mathbf{v}} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad (1)$$

$$\dot{\rho} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}_s + \boldsymbol{\sigma}_d, \boldsymbol{\sigma}_s = \frac{1}{3} \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{E} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\sigma}^R = \lambda (\mathbf{D} : \mathbf{E}) \mathbf{E} + 2G (\mathbf{D} - \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p - \dot{\mathbf{p}}) \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\sigma}^R = \dot{\boldsymbol{\sigma}} - \dot{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{R}^T \cdot \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\sigma} \cdot \dot{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{R}^T \quad (6)$$

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p = \dot{\varepsilon}_0^{n_\varepsilon} \exp\left(\frac{U(T)}{kT}\right) (\Gamma_\sigma \boldsymbol{\sigma} - \Gamma_{p\sigma} \frac{\partial F}{\partial \mathbf{p}}) \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{p}} = \dot{\varepsilon}_0^{n_p} \exp\left(\frac{U(T)}{kT}\right) (\Gamma_{p\sigma} \boldsymbol{\sigma} - \Gamma_p \frac{\partial F}{\partial \mathbf{p}}) \quad (8)$$

$$\dot{\delta} = -\dot{\varepsilon}_0^{n_\delta} \Gamma_\delta \frac{\partial F}{\partial \delta} \quad (9)$$

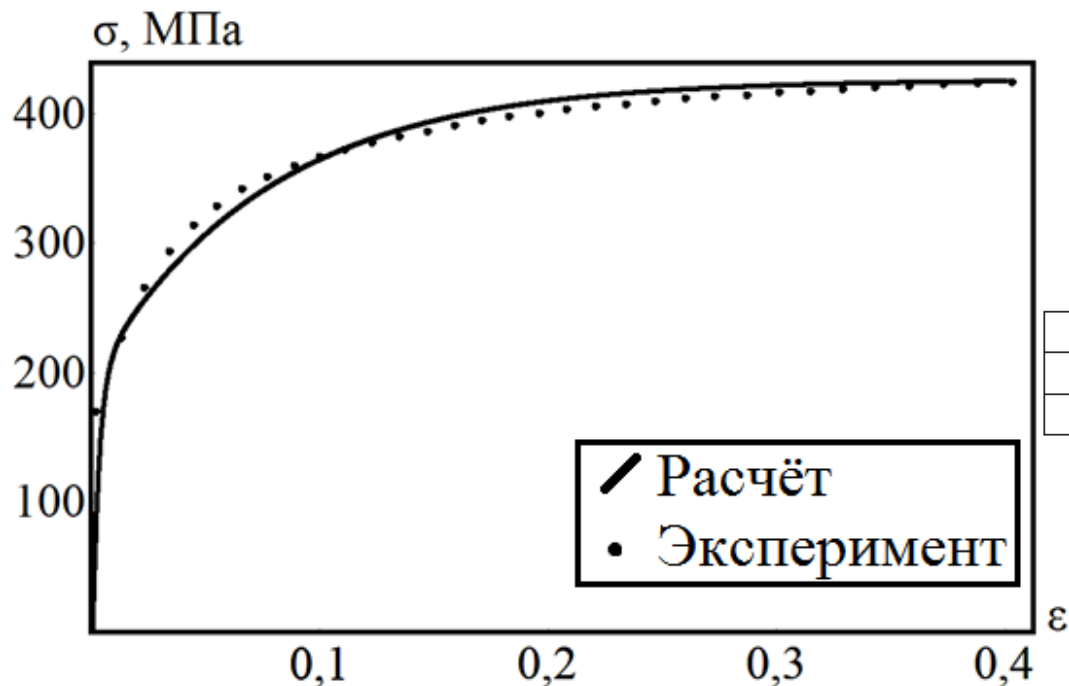
$$U(T) = \frac{k}{T_c^m} T^{m+1} \quad (10)$$

$$\frac{F}{F_m} = \frac{p^2}{2} - \frac{p^2}{2\delta} + c_1 p + c_2 \ln(c_3 + c_4 p + p^2) - \frac{\boldsymbol{\sigma}_d : \mathbf{p}}{2G} \quad (11)$$

$$\rho c \dot{T} = \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p - \frac{\partial F}{\partial p} : \dot{\mathbf{p}} + \alpha \Delta T \quad (12)$$

ρ – плотность
 \mathbf{v} – скорость
 $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений
 λ, G – упругие константы
 \mathbf{E} – единичный тензор
 $\boldsymbol{\varepsilon}^p$ – тензор пластических деформаций
 \mathbf{p} – тензор плотности микродефектов
 T – температура
 δ – параметр структурного скейлинга
 $\Gamma_\sigma, \Gamma_{p\sigma}, \Gamma_p, \Gamma_\delta, n_\varepsilon, n_p, n_\delta$ – константы материала
 F – свободная энергия
 c – теплоёмкость
 α – коэффициент теплопроводности

Идентификация параметров модели



Расчетный и экспериментальный пределы текучести при различных скоростях деформации

$\dot{\epsilon}$, с^{-1}	σ_T (расчёт), МПа	σ_T (эксперимент), МПа
1	164	165 [1]
520	176	175 [2]

Расчётная и экспериментальная диаграммы деформирования при скорости деформации 1 1/с

Расчетный и экспериментальный пределы текучести при различных температурах

T , $^{\circ}\text{C}$	σ_T (расчет), МПа	σ_T (эксперимент [3]), МПа
25	164	165
100	153	160
200	117	135
300	72	60

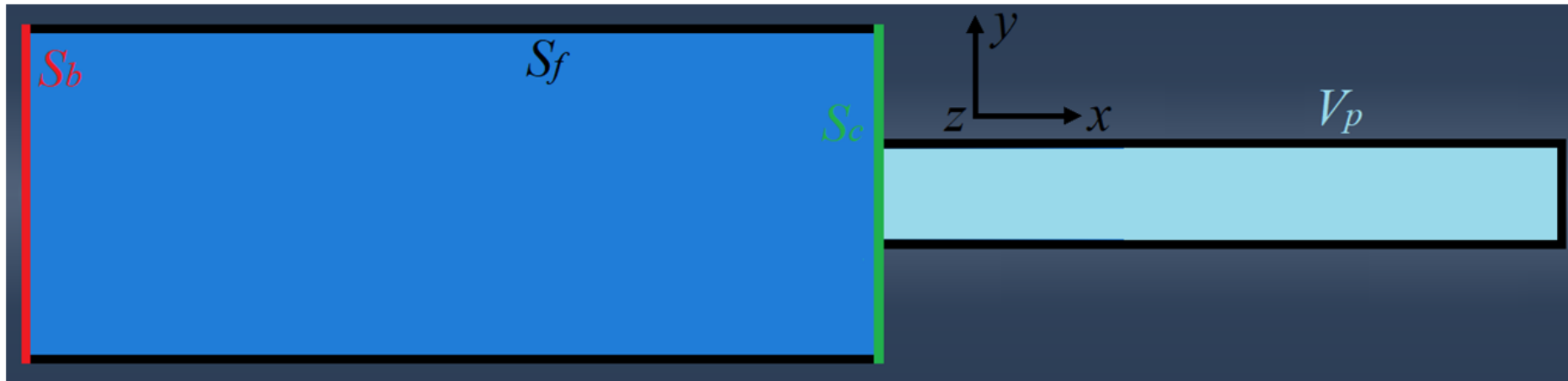
[1] Bayandin Yu.V., Ledon D.R., Uvarov S.V. Verification of Wide-Range Constitutive Relations for Elastic-Viscoplastic Materials Using the Taylor–Hopkinson Test // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2021. – Vol. 62, No. 7. – P. 1267-1276.

[2] Глушак Б.Л., Игнатова О.Н., Пушков В.А., Новиков С.А., Гири́н А.С., Сине́цын В.А. Динамическое деформирование алюминиевого сплава АМг-6 при нормальной и повышенной температурах // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 6. С. 139–143.

[3] Фролов К.В. Машиностроение. Том II-3: Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. М.:

Машиностроение, 2001. 880 с.

Постановка краевой задачи для верификации параметров модели: модифицированный тест Тейлора

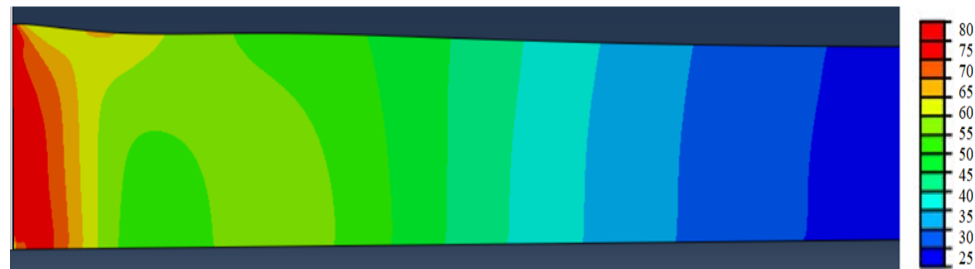
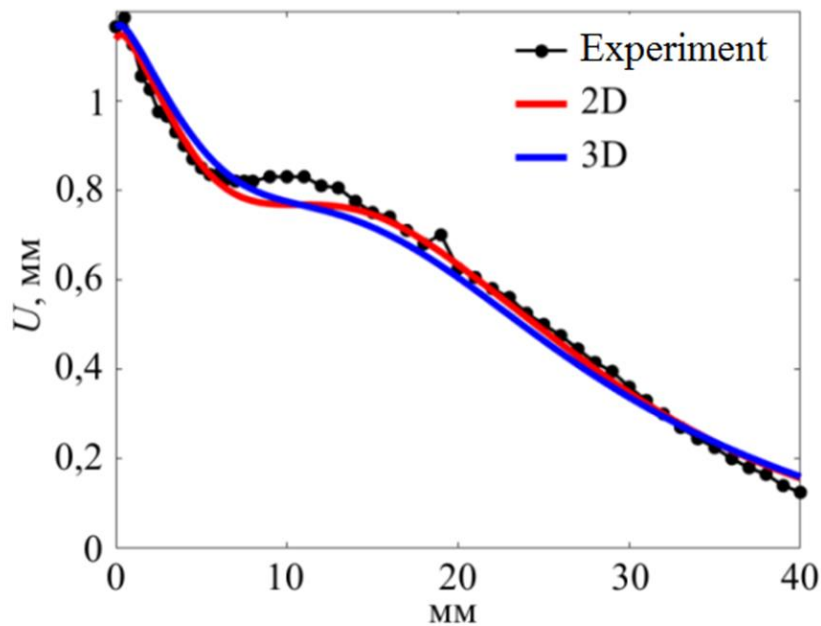


$$\text{НУ: } v_x|_{V_p} = v_0, \quad v_y|_{V_p} = 0 \text{ м/с}, \quad v_z|_{V_p} = 0 \text{ м/с}, \quad T|_{V_p} = T_0 = 29 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\text{ГУ: } u_x|_{S_b} = 0, \quad t_r|_{S_b} = 0, \quad \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}|_{S_f} = 0, \quad (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}) \cdot \boldsymbol{\tau}|_{S_c} = \mu (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n}|_{S_c}, \quad \nabla_n T|_{\partial V_p} = 0$$

$$\mathbf{u} = \{u_x, u_y, u_z\}, \quad \mathbf{t} = \{t_x, t_y, t_z\} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}; \quad \mathbf{n} = \{n_x, n_y, n_z\}, \quad \boldsymbol{\tau} = \{\tau_x, \tau_y, \tau_z\}.$$

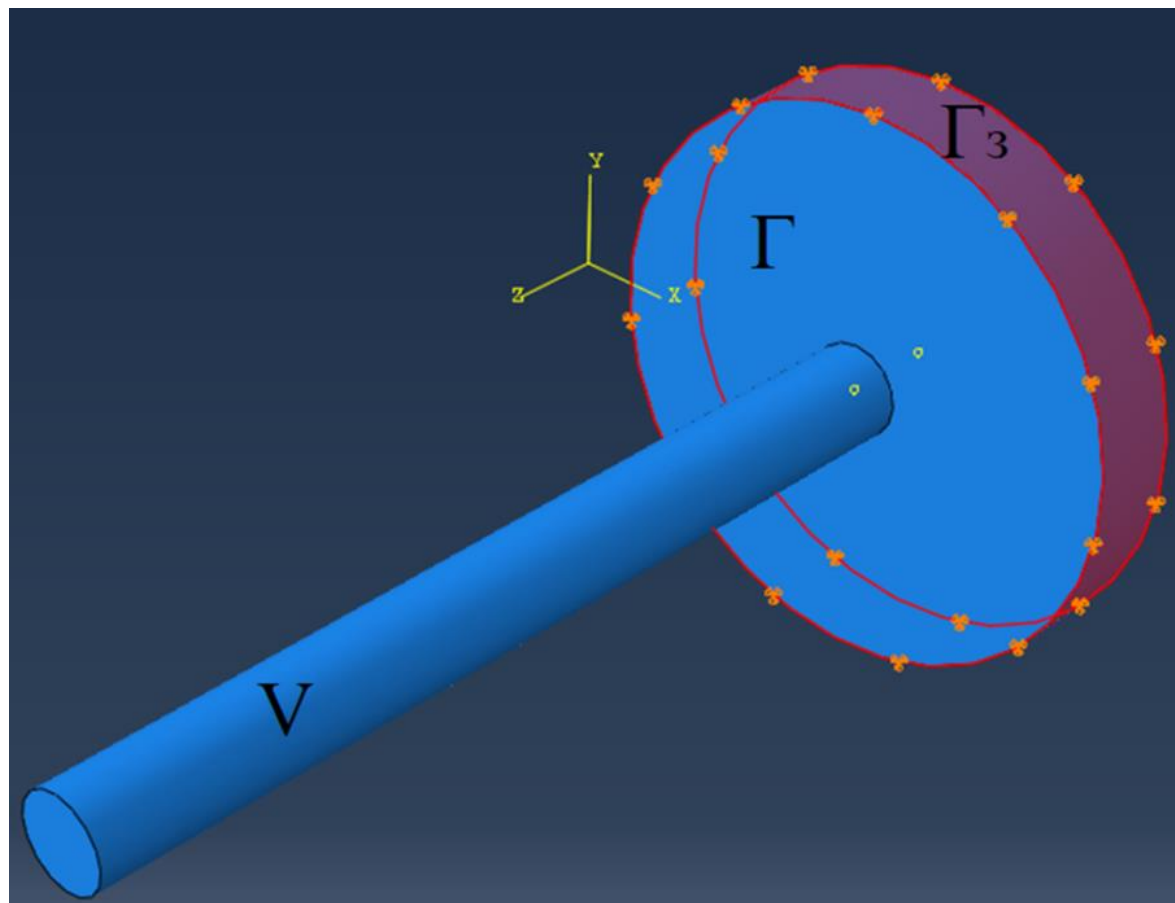
Верификация параметров модели



Распределение температуры в численном расчёте (тест Тейлора)

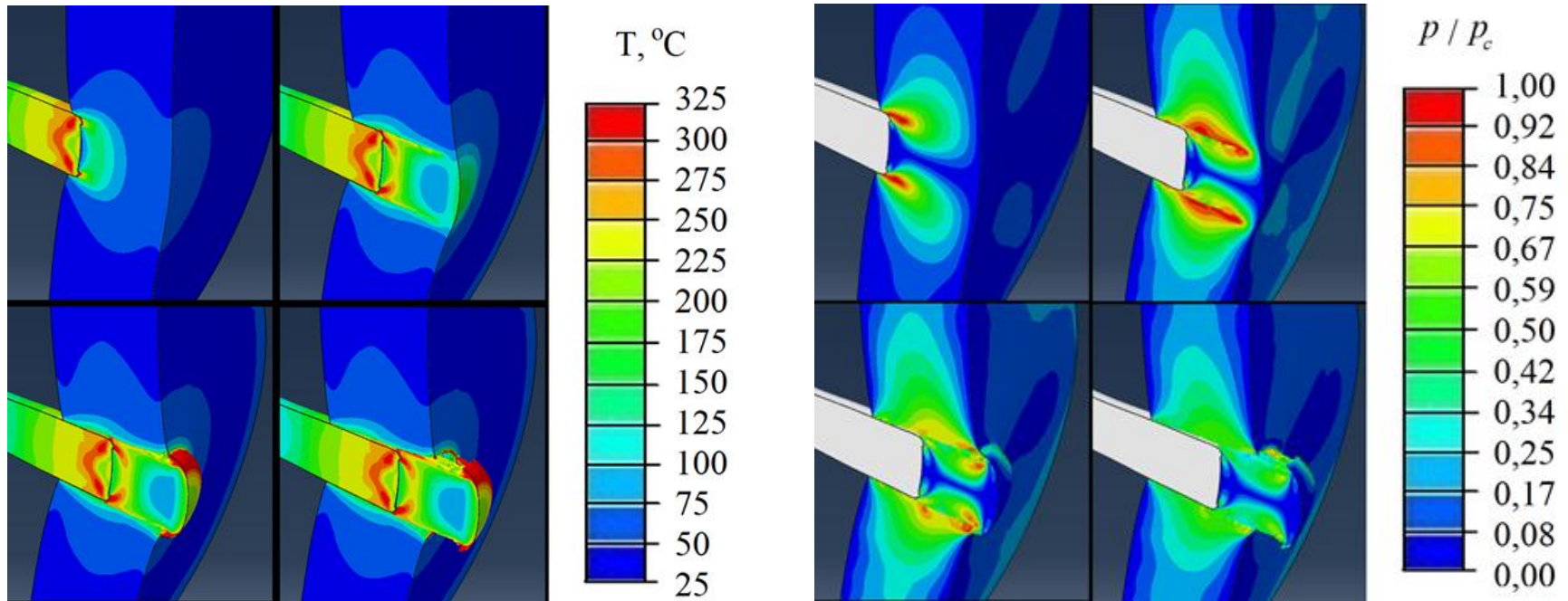
Сравнение перемещений вдоль стержня в эксперименте (тест Тейлора) [1] и расчётах

Валидация модели. Постановка задачи



Геометрия задачи и граничные условия для расчета
пробивания преград

Валидация модели



Моделирование пробивания преград. Поле распределения температуры (слева) и повреждённости (справа) в процессе выноса «пробки». Результаты расчётов хорошо согласуются с экспериментальными данными [1].

Обсуждение результатов

- 1. Конденсированные среды с дефектами обнаруживают специальный класс неравновесных критических явлений– структурно-скейлинговые переходы, сопровождающиеся формированием коллективных мод ансамблей дефектов.*
- 2. Установленная автомодельная природа данных мод позволила связать универсальность пластических волновых фронтов, разрушение при интенсивных воздействиях («волны разрушения») с подчинением релаксационных свойств (пластичности), локализации разрушения нелинейной динамике коллективных мод.*
- 3. Экспериментально и теоретически подтверждена возможность «квазипластического механизма» переноса импульса в жидкостях, автомодельность волновых фронтов.*
- 4. Показано существование «мезоскопического предела», определяющего границам применимости метода «прямого – MD моделирования», соответствующего временам $10^{-5} - 10^{-6} s^{-1}$.*