

О некоторых автомодельных закономерностях переноса импульса в конденсированных средах при интенсивных воздействиях

О.Б.Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН

Содержание

- **Введение.**
- **Автомодельные закономерности при формировании пластических волновых фронтов, широкодиапазонное моделирование.**
- **Автомодельные закономерности разрушения при ударно-волновом разрушении.**
- **О некоторых универсальных сценариях развития пластической неустойчивости в металлах и турбулентности в жидкостях.**
- **О возможных механизмах асимптотики вязкости. Автомодельные закономерности гидролюминесценции.**
- **Обсуждение результатов**

Лаборатория физических основ прочности Института механики сплошных сред РАН

Основные направления исследований

• **Фундаментальные исследования:**

- нелинейная физика и механика конденсированных сред с мезодефектами:
- статистическая механика сред с мезодефектами;
- термодинамика сред с мезодефектами;
- широкодиапазонные определяющие уравнения сред с мезодефектами.

- **Разработка и экспериментальная верификация широкодиапазонных определяющих уравнений** для моделирования поведения материалов при интенсивных (динамических, ударно-волновых) воздействиях

• **Экспериментальное исследование поведения материалов** при квазистатических, усталостных, динамических и ударно-волновых нагружениях с использованием средств регистрации высокого пространственно-временного разрешения.

• **Структурные исследования:** многомасштабный анализ структуры материалов (атомно-силовая, электронная микроскопия, профилометрия высокого разрешения) с целью исследования роли структуры в механизмах деформирования и разрушения в широком диапазоне интенсивностей воздействий.

• **Исследуемые материалы** – металлы, сплавы (в том числе с субмикрозеренной структурой), стекла, керамики.

Экспериментальная база лаборатории

Лаборатория располагает комплексом экспериментального оборудования для проведения испытаний материалов при квазистатических, усталостных (включая гигацикловую), динамических и ударно-волновых условиях нагружения

- Баллистические комплексы (газовые баллистические установки, калибр 125мм и 45 мм; система измерения: метод емкостного датчика, VISAR).
- Баллистический комплекс калибр 19мм, совмещенный с системой регистрации VISAR и инфракрасной камерой CEDIP, для исследования динамики процессов пробивания
- Установки для динамических испытаний металлов, композитов, керамик (разрезной стержень Гопкинсона-Кольского для испытаний на растяжение-сжатие, сдвиг, динамическое индентирование, система регистрации).
- Инфракрасная камера CEDIP, установка акустической эмиссии AMSY
- Интерферометр-профилометр New View 5000, атомно-силовой микроскоп, STRAIN-Master.
- Комплекс для подготовки образцов для структурных исследований (механическая, электро-химическая полировка).
- Экспериментальный комплекс для исследования поведения материалов в условиях гигацикловой усталости (Shimadzu).
- Экспериментальный комплекс для исследования механических свойств материалов при квазистатических условиях нагружения.
- Экспериментальный технологический комплекс по изготовлению намоткой образцов композитных материалов.
- Экспериментальный комплекс по исследованию механических свойств композитных материалов с “in-situ” регистрацией данных акустической эмиссии и системой регистрации цифровых изображений (DIC).
- Экспериментальный комплекс по исследованию свойств композитных трубчатых образцов при динамических нагружениях при давлениях до 1000атм , совмещенный с системой регистрации .
- Экспериментальный комплекс по исследованию свойств керамик при динамических нагружениях по данным in-situ регистрации фрактолюминесценции и статистики фрагментации на сохраненных образцах

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

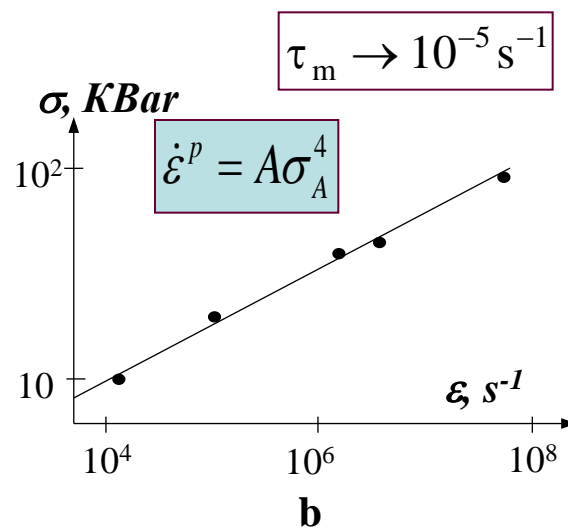
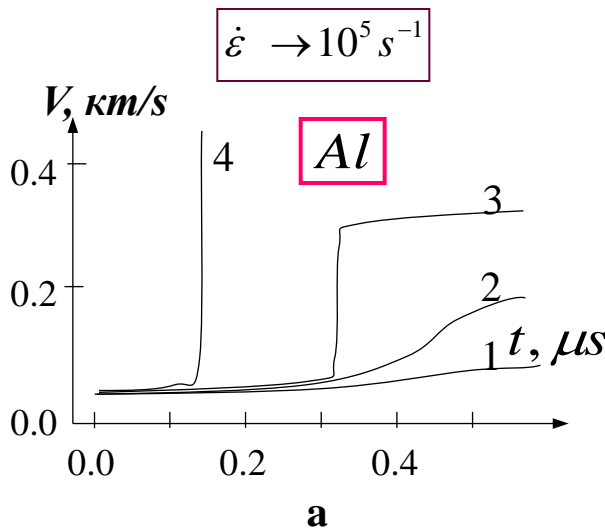
Сахаров А.Д., Зайдель Р.М., Минеев В.Н., Олейник А.Г. Экспериментальное исследование устойчивости ударных волн и механических свойств вещества при высоких давлениях и температурах// Докл. АН СССР.-1964.-Т.159.-№ 5.-С.1019-1022.

Viscosity and elasticity of shocked condensed matter

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



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 "

The notion of a perfect fluid arises in many fields of physics. The term can be applied to any system that is in local equilibrium and has negligible shear viscosity η . *In everyday life*, viscosity is a familiar property associated with the tendency of a substance to resist flow. From a microscopic perspective, it is a diagnostic of the strength of the interactions between a fluid's constituents. **The shear viscosity measures how disturbances in the system are transmitted to the rest of the system through interactions. If those interactions are strong, neighboring parts of the fluid more readily transmit the disturbances through the system. Thus low shear viscosities indicate significant interaction strength.**

P. Kovtun, D. T. Son, A. O. Starinets, *J. High Energy Phys.*2003(10), 064 (2003); *Phys. Rev. Lett.* 94, 111601 (2005).

V. E. Fortov and V. B. Mintsev. Quantum Bound of the Shear Viscosity of a Strongly Coupled Plasma. *PRL* 111, 125004 (2013)

Автомодельность пластических волновых фронтов

L.M. Barker [1], J.W. Swegle-D.E.Grady [2, 3]

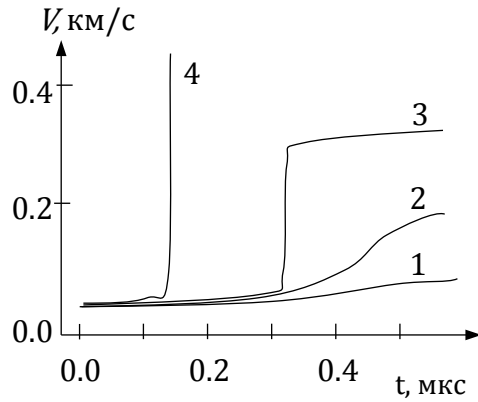
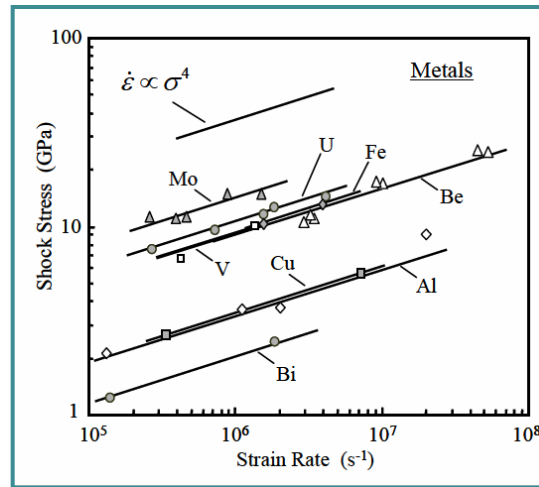


Fig.1. Plastic wave profiles for different shock amplitudes in Al

(1 – 9.5 KBar, 2 – 21 KBar, 3 – 38 KBar, 4 – 90 KBar;) [1]

Ductile



$$\dot{\epsilon} \sim \sigma_{amp}^4$$

Quasi-brittle

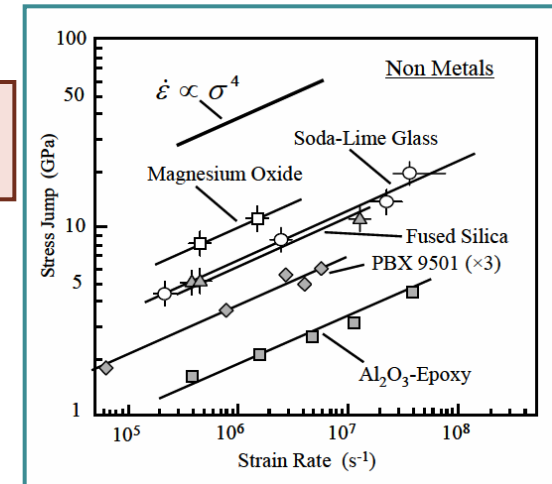


Fig.2. Plastic strain rate at SWF versus plastic strain rate [2,3]

- [1] Barker L.M. Behavior of dense media under high dynamic pressures. – New York: Gordon and Breach, 1968. – 482p.
 [2] Swegle J.W., Grady D.E. Shock viscosity and the prediction of shock wave rise times // J. Appl.Phys. – 1985. – Vol. 58, no.2.
 [3] Grady D.E. Structured shock waves and the fourth-power law // J. Appl. Phys. – 2009. – P. 1-23..

О термодинамике твердого тела с дефектами

- Термодинамика «пластического состояния»

Термодинамические переменные

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

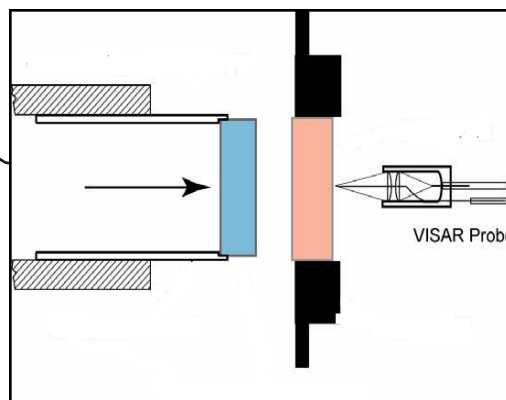
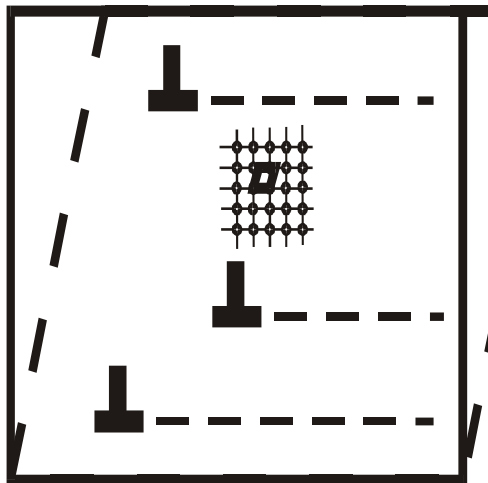
$$F = F(\varepsilon^e, b\rho S_D)$$

Флуктуационная природа пластичности (закон Орована)

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

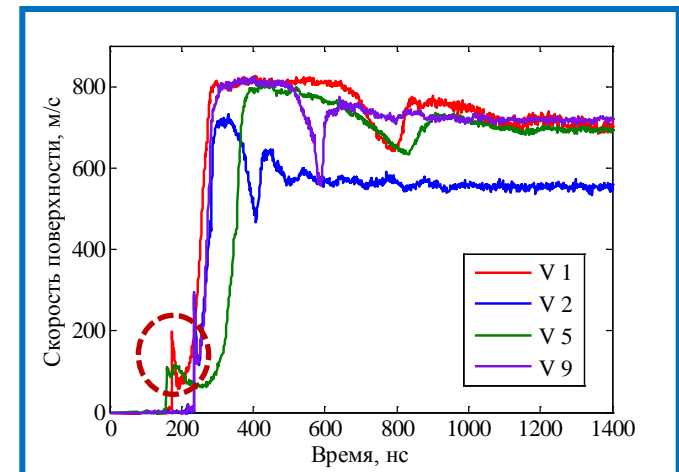
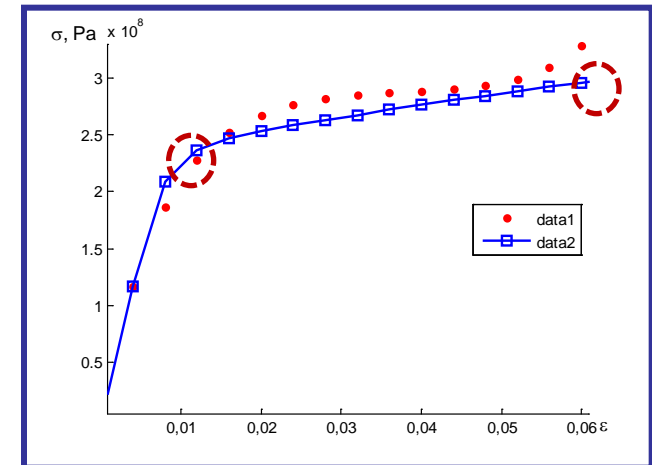
$$\tau^{-1} = v_D \exp(U_a / kT)$$

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



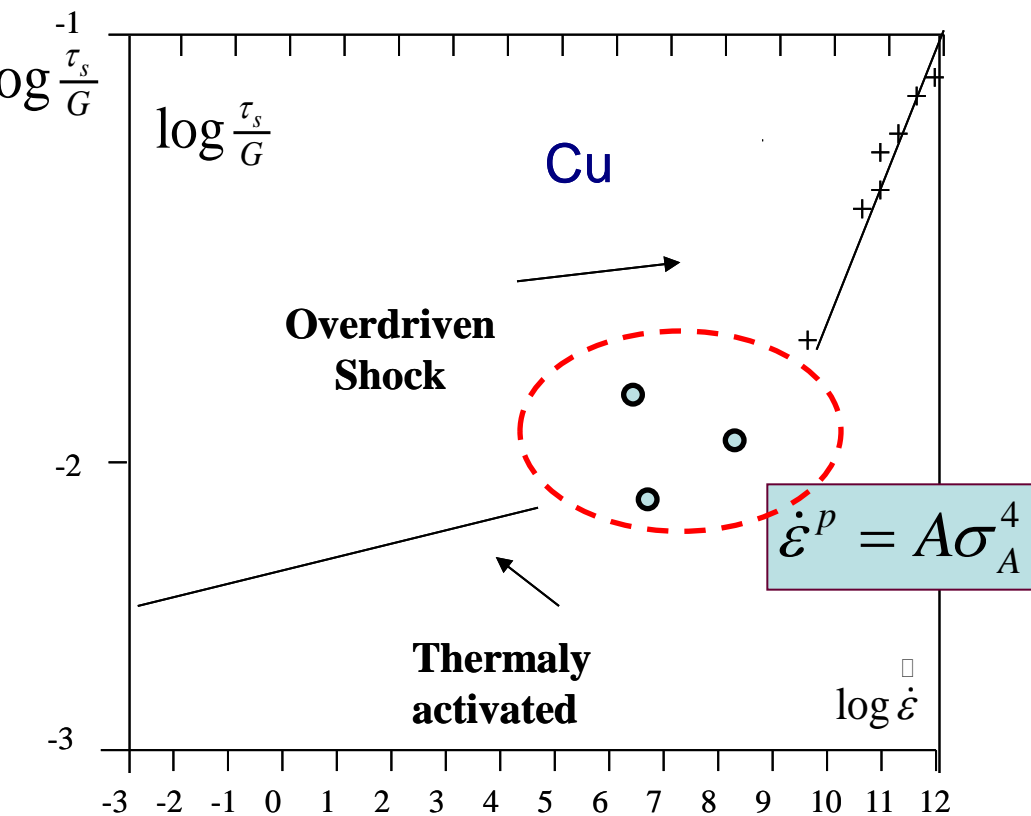
Vanadium

(quasi-static and shock wave test)



- Argon, Kocks, and Ashby “Thermodynamics and Kinetics of Slip”, 1975

Широкодиапазонные определяющие соотношения: переходы от термоактивируемых к перегрузочным волновым фронтам



- 2005: The “Deep Impact” NASA experiment (Comet Tempel 1): 370 kg copper armored rod, impact velocity ~ 10 km/s, energy under collision ~ 4500 kg of TNT.

MTS-PTW-Model

- Kocks, Argon and Ashby. *Thermodynamics and Kinetics of Slip*, 1975
- D.Preston, D.Tonks and D.Wallace. Model of plastic deformation for extreme loading conditions. *J of Applied Physics*, 2003, V.93, n.1, pp.211-220

Потенциал

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

Определяющие уравнения

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

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

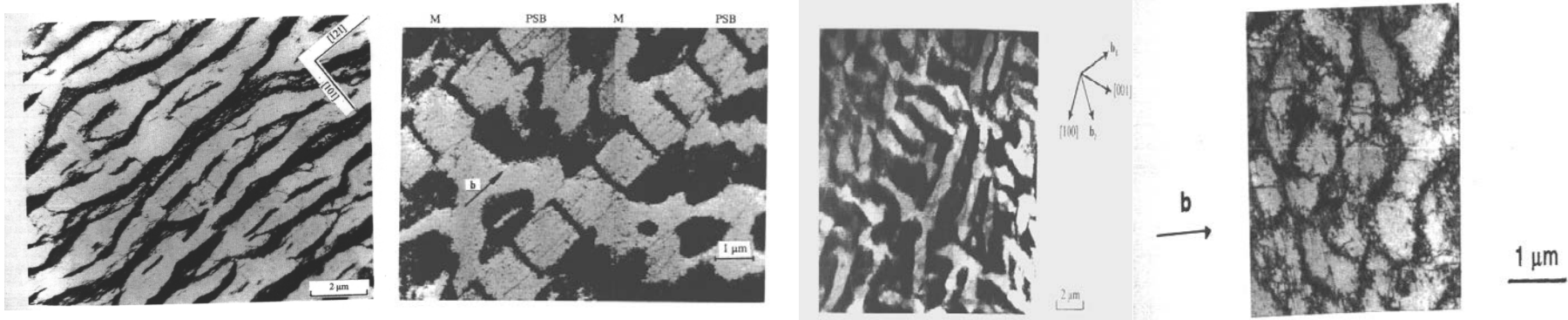
$$\hat{\tau}_y = y_0 - (y_0 - y_\infty) \text{erf} \left\{ k\hat{T} \ln \left(\gamma \dot{\xi} / \dot{\psi} \right) \right\}$$

Закон упрочнения

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

EVOLUTION OF DISLOCATION SUBSTRUCTURES

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



matrix vein structure

saturation

ladder structure

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

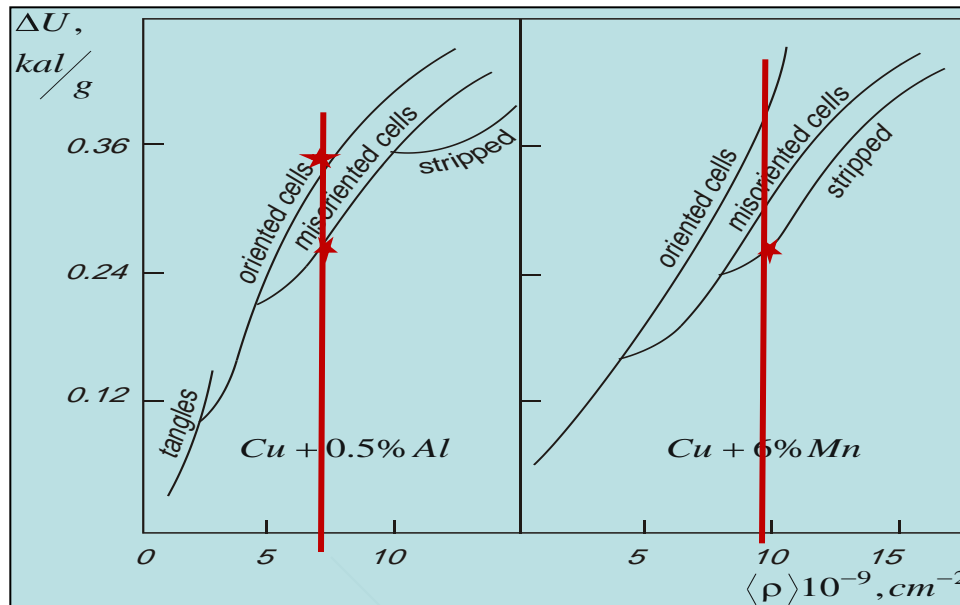
labyrinth structure

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

cell structure

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

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



Свойства ансамблей мезодефектов

- Ансамбль микротрещин: (малоугловая рентгеновская дифракция, просвечивающая микроскопия, прецизионное взвешивание (В.И.Бетехтин, А.Г.Кадомцев, О.Б.Наймарк, 1983))

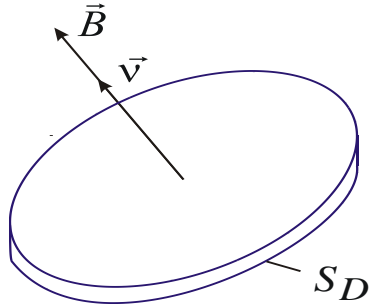
Material	l, μm		n, cm^{-3}	
	X-ray Microscopy		X-ray Microscopy	
Aluminum	0.14	0.2	10^{11}	--
Nikel	0.08	0.1	10^{12}	$2 \cdot 10^{12}$
Gold, silver	--	0.2	--	$2 \cdot 10^{11}$
Copper, zinc	--	0.25	--	$5 \cdot 10^{11}$
Beryllium	0.12	--	$5 \cdot 10^{12}$	--
Steel 30CrMCN2A	--	0.1	--	--
NaCl	2	1-3	10^8-10^9	10^9
Polyethylene	--	0.015	--	$6 \cdot 10^{15}$
Polypropylene	--	0.02	--	$7 \cdot 10^{14}$
PMMA	--	0.02	--	$4 \cdot 10^{12}$

Анизометричность: вязкое разрушение 1:2; квазихрупкое 1:10

Структурно-статистическая модель

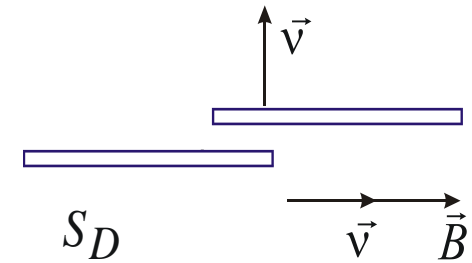
- Mesodefects (microcracks, microshears):

$$s_{ik} = s V_i V_k$$



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

$$p_{ik} = n \langle s_{ik} \rangle$$



$$n \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

- **Leontovich Effective Field Method** (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

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

Определяющие соотношения твердых тел с мезодефектами

- Self-Consistency Equation for Defect Density Tensor

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

- Dimensionless Form

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

- General statistics

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

- Dimensionless Material Parameter

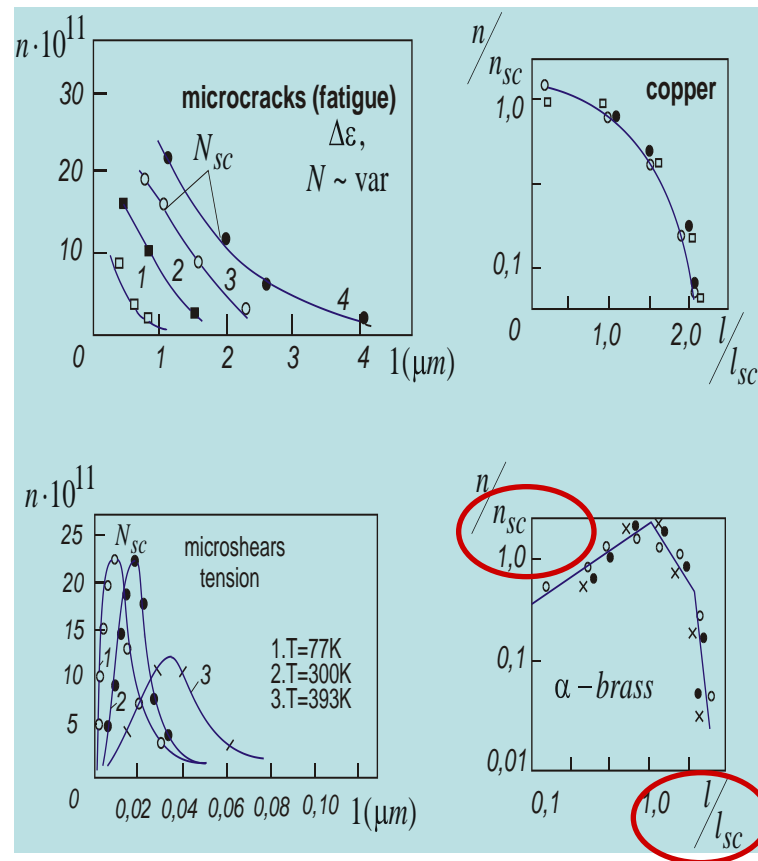
$$\delta = \frac{\alpha}{\lambda n}.$$

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

$$\delta \sim \left(\frac{R}{r_0}\right)^3.$$

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

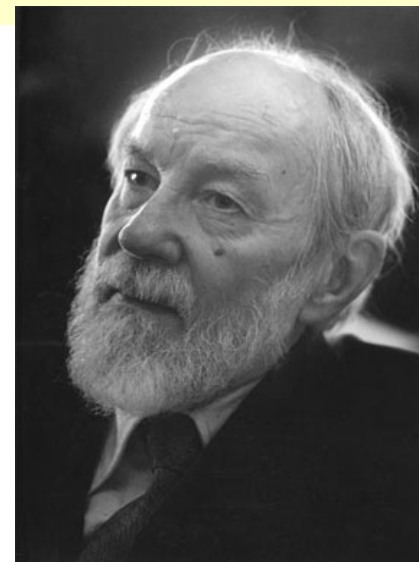
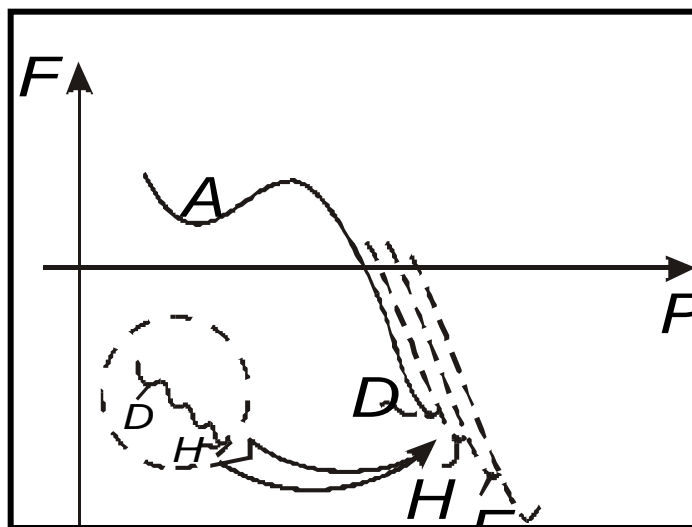
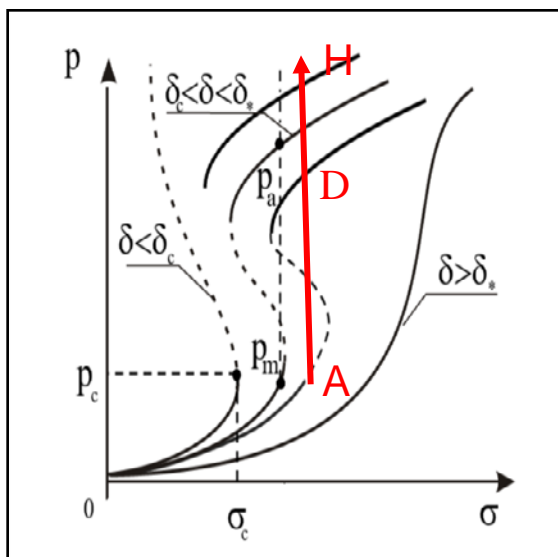
R is the distance between defects.



Феноменология твердых тел с мезодефектами. Структурно-скейлинговые переходы.

Non-Equilibrium Free Energy

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



Владимир Павлович
Скрипов

(Метастабильная жидкость)

- Квази-хрупкое

$$\delta < \delta_c = 1$$

- Вязкое

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

- Наноструктурное

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

Феноменология твердых тел с мезодефектами

- Эволюционное неравенство

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

- Кинетическое уравнение для параметра структурного скейлинга

$$\frac{d\delta}{dt} = -L_\delta \left(\frac{\partial A(\delta, \delta_*)}{\partial \delta} p^2 - \frac{\partial C(\delta, \delta_c)}{\partial \delta} p^6 \right)$$

- Кинетическое уравнение для тензора плотности дефектов

$$\frac{dp}{dt} = -L_p \left(A(\delta, \delta_*) p - B p^3 - C(\delta, \delta_c) p^5 - D \sigma - \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\chi \frac{\partial p}{\partial x_1} \right) \right)$$

- Полная деформация

$$\varepsilon = \tilde{C} \sigma + p$$



Сергей Павлович
Курдюмов

Автомодельные решения - коллективные моды

- Solitary Wave:

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

$$p(x,t) = \frac{1}{2} \Delta p [1 - \tanh(\xi l^{-1})], \quad l = \frac{4}{\Delta p} \left(2 \frac{\chi}{C} \right)^{1/2},$$

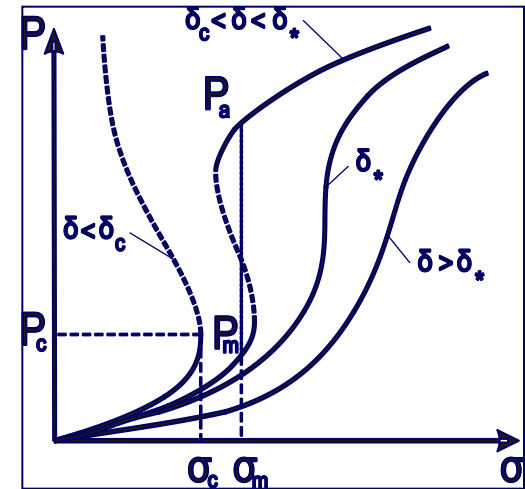
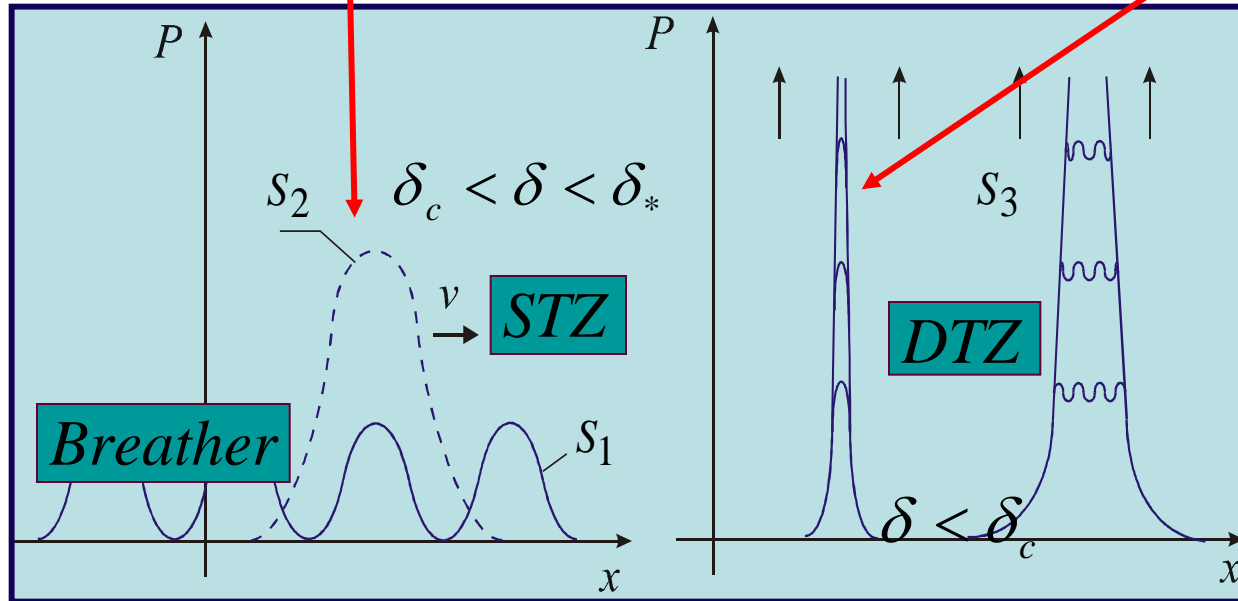
$$\xi = x - Vt, \quad V = \frac{1}{2} \Gamma_p (\chi C)^{1/2} \Delta p$$

- "Blow-up" Regimes of Damage Localization:

$$\delta < \delta_c$$

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

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

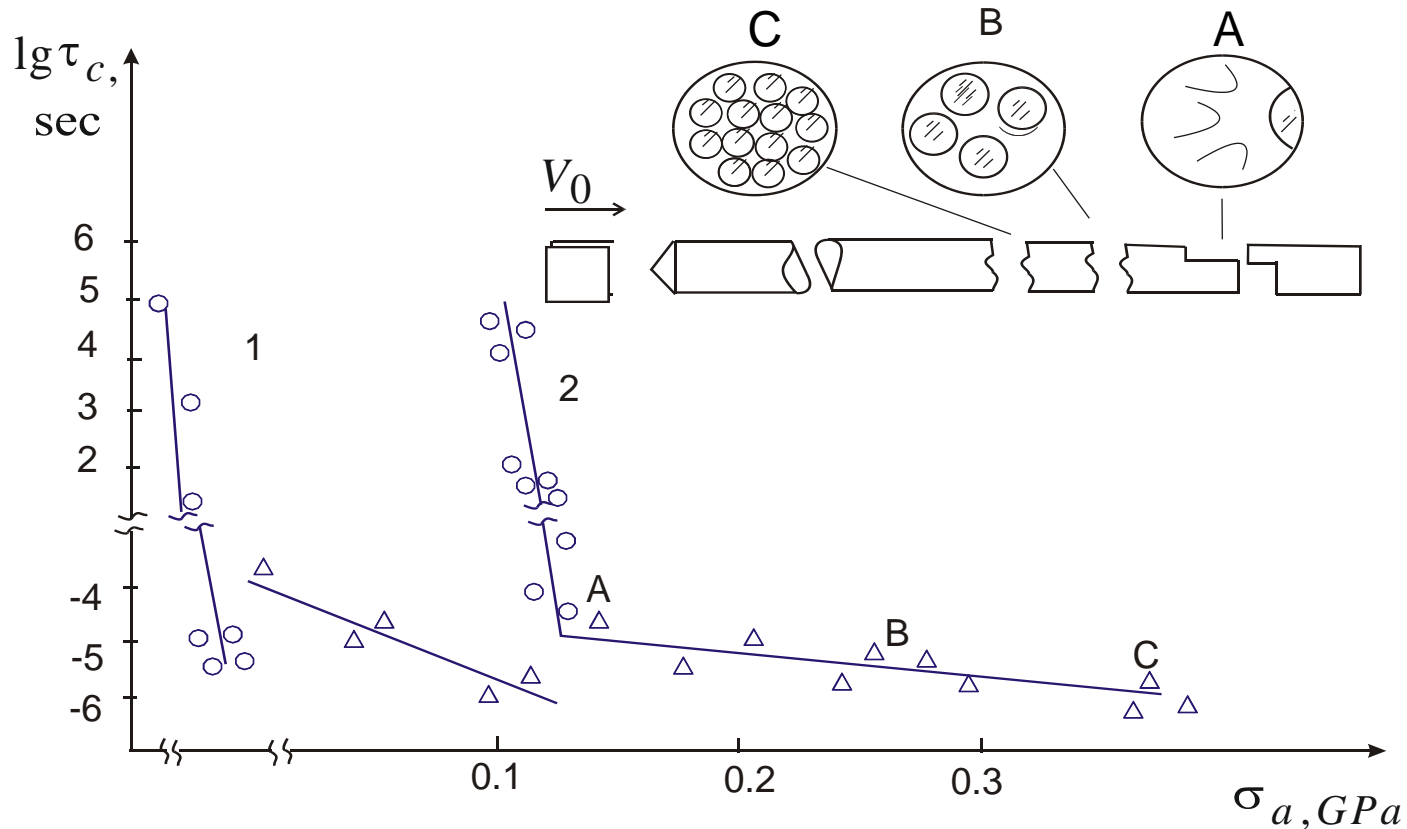


Langer J. S., Pechnik L. Dynamics of shear transformation zones in amorphous plasticity: Energetic constraints in a minimal theory // Phys.Rev.E- 2005.- V.68.- P. 061507. (String topology)

«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 ультрафэрфор (2))

Сравнительный анализ с MTS-PTW-моделью

MTS-PTW-Model

Potential

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

Constitutive equations

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

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

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

Hardening law

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

S2M-Model

Free energy

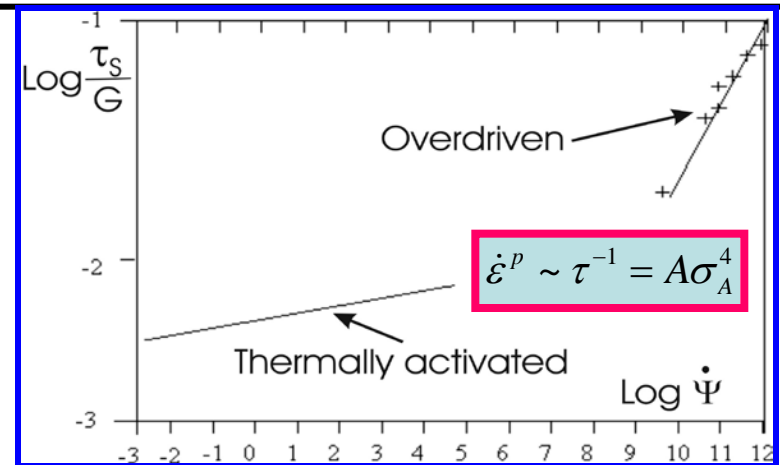
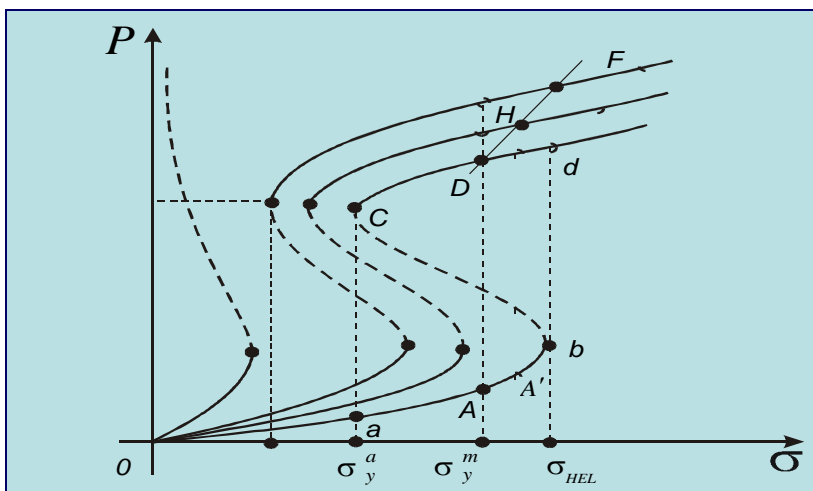
$$F = \frac{1}{2}A(\delta, \delta_*)p^2 - \frac{1}{4}Bp^4 - \frac{1}{6}C(\delta, \delta_c)p^6 - D\sigma p + \chi(\nabla_i p)^2.$$

Constitutive equations

$$\text{TP}_S = \sigma'_{ik} e_{ik}^p - \frac{\partial F}{\partial p'_{ik}} \frac{\Delta p'_{ik}}{\Delta t} - \frac{\partial F}{\partial \delta} \dot{\delta} \geq 0$$

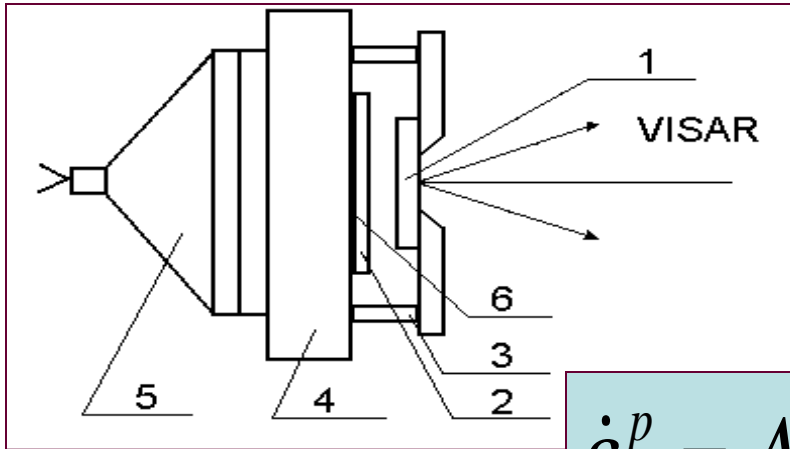
$$\sigma'_{ik} = L_{iklm}^{(1)} e_{lm}^p - L_{iklm}^{(2)} \frac{\Delta p'_{lm}}{\Delta t}$$

$$\Pi'_{ik} = L_{iklm}^{(2)} e_{lm}^p - L_{iklm}^{(3)} \frac{\Delta p'_{lm}}{\Delta t} \quad \dot{\delta} = -\zeta \frac{\partial F}{\partial \delta}$$

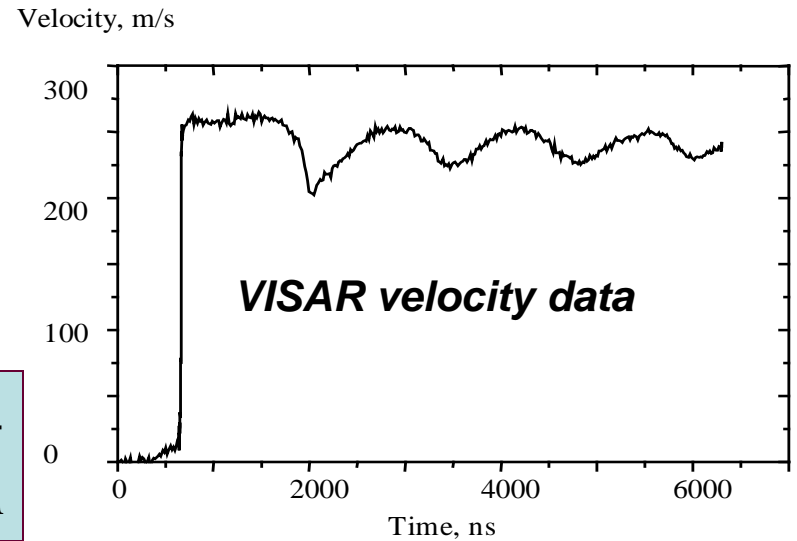


SWEGLE-GRADY универсальность пластических волновых фронтов

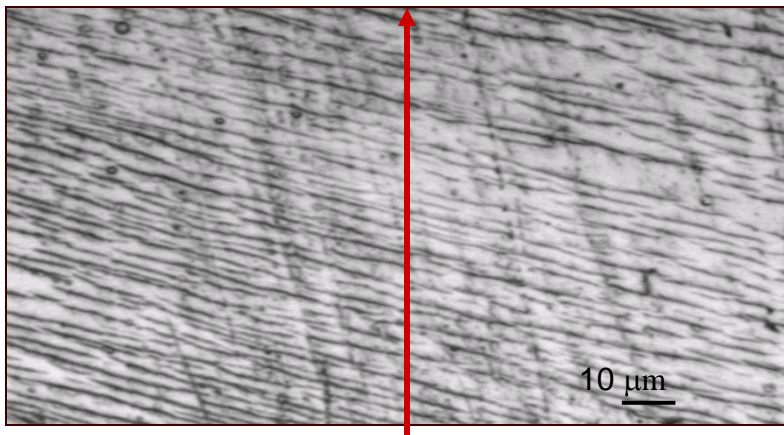
Experimental study (plate impact test for copper)



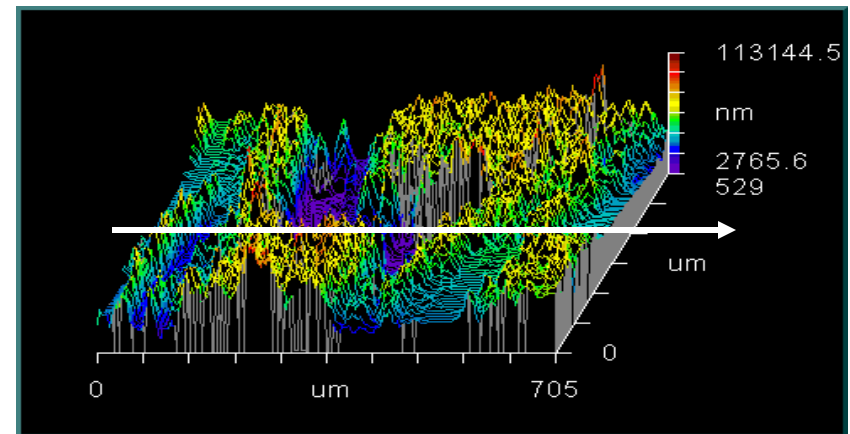
$$\dot{\epsilon}^p = A \sigma_A^4$$



- Structure of deformed copper

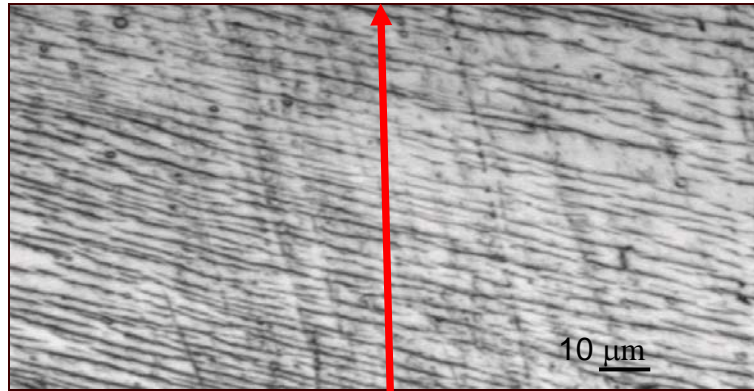


- New View data

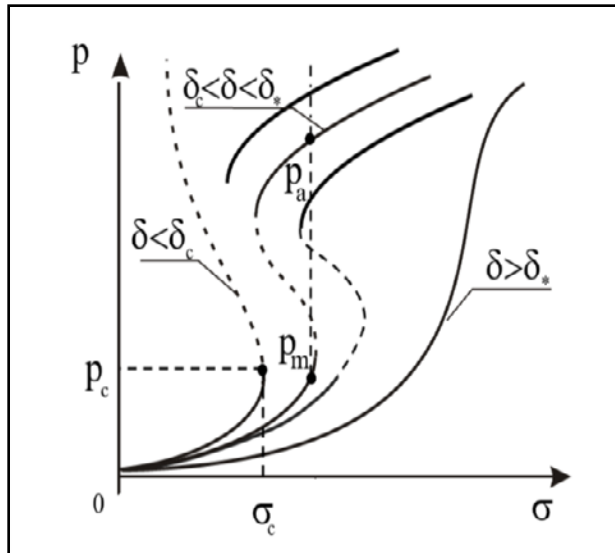
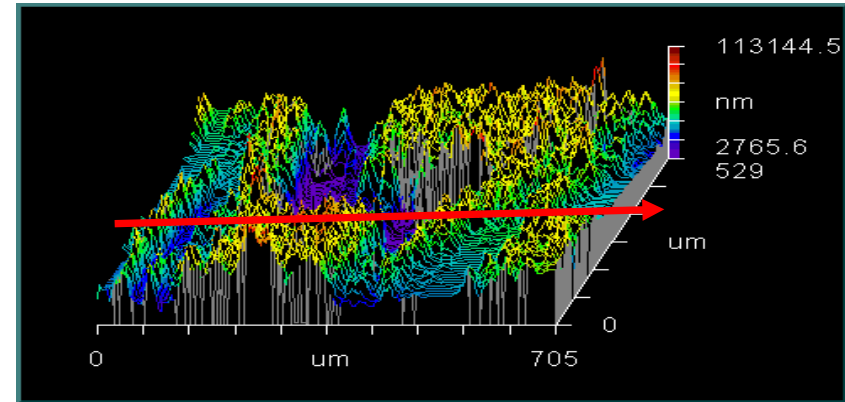


SWEGLE-GRADY универсальность пластических волновых фронтов

- Structure of deformed copper

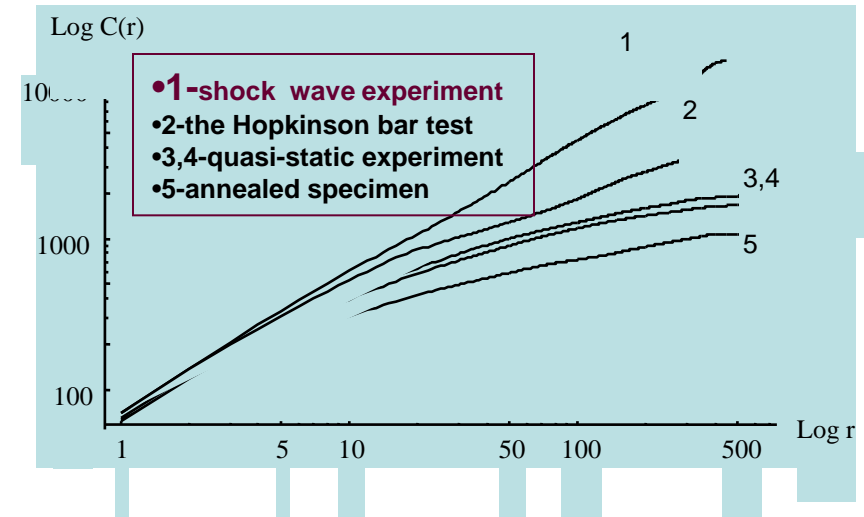


- New View data



- Correlation analysis (the Hurst exponent)

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

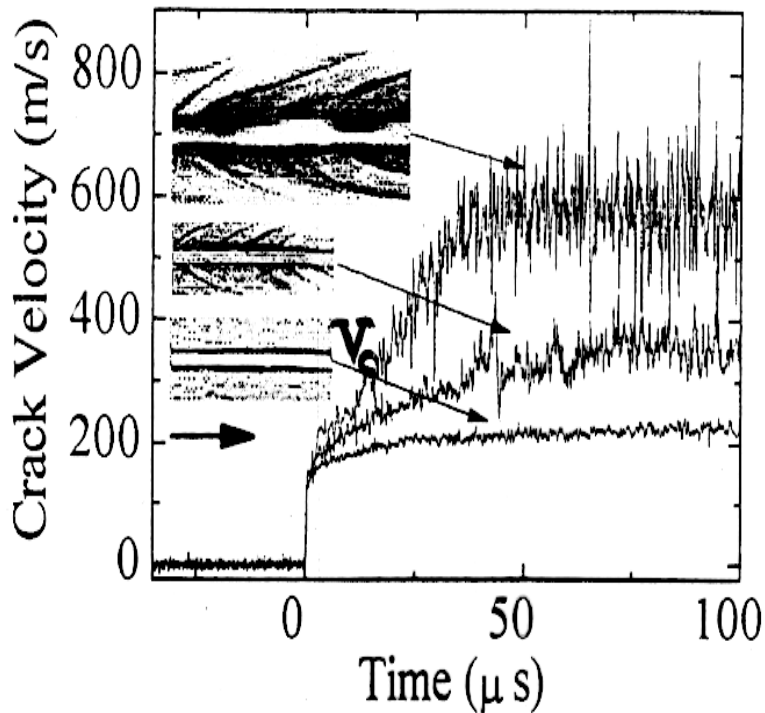
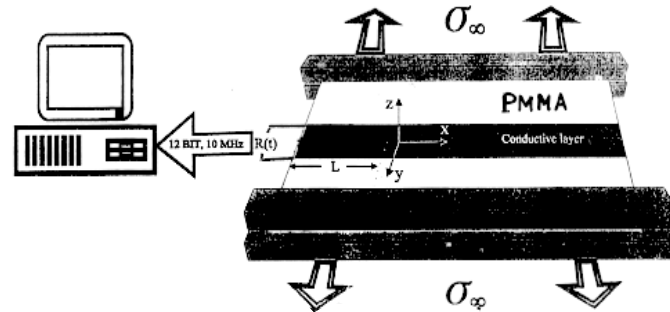


$$p(x,t) = \frac{1}{2} p_a [1 - \tanh(\xi l^{-1})]$$

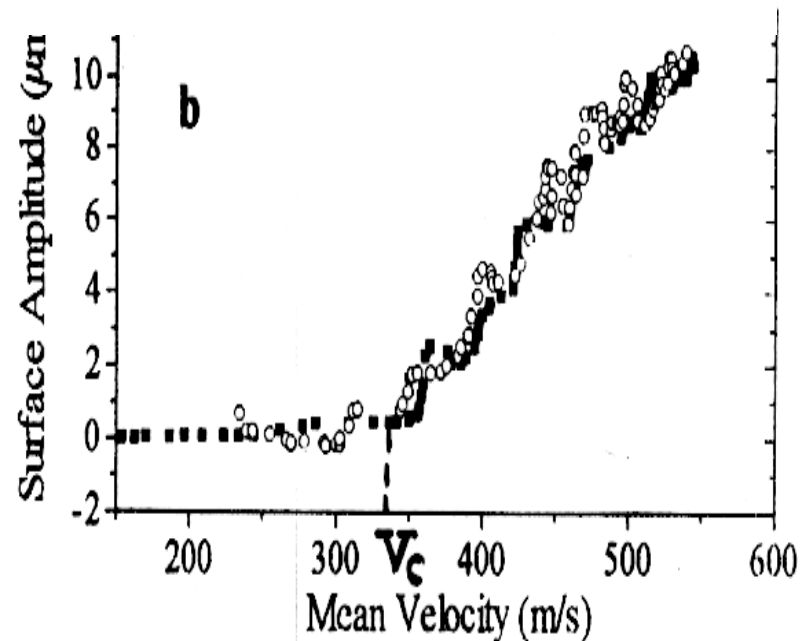
$$\xi = x - Vt, \quad V = \chi A (p_a - p_m) / (2L_p^{-2})$$

Quasi-brittle damage failure transition (crack propagation dynamics)

- J. Fineberg et al, PRL, 1991



Transition from steady state to branching crack dynamics.

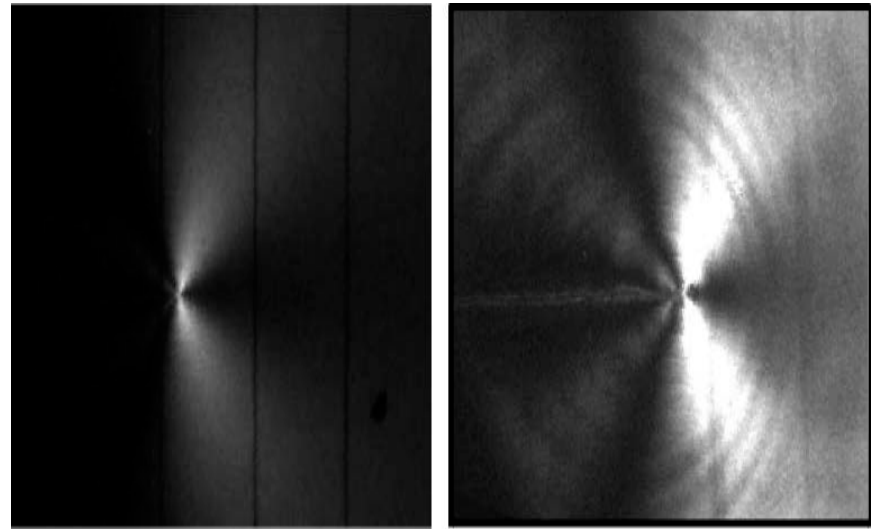
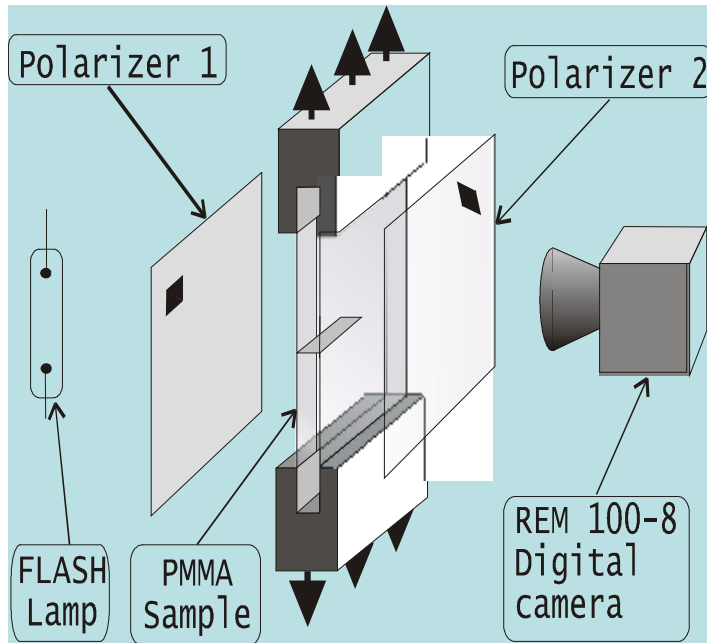


Branch amplitude

STATISTICS OF FAILURE AND FRAGMENTATION

- EXPERIMENTAL STUDY OF NONLINEAR CRACK DYNAMICS :

High speed digital camera Remix REM 100-8, photo-elasticity method

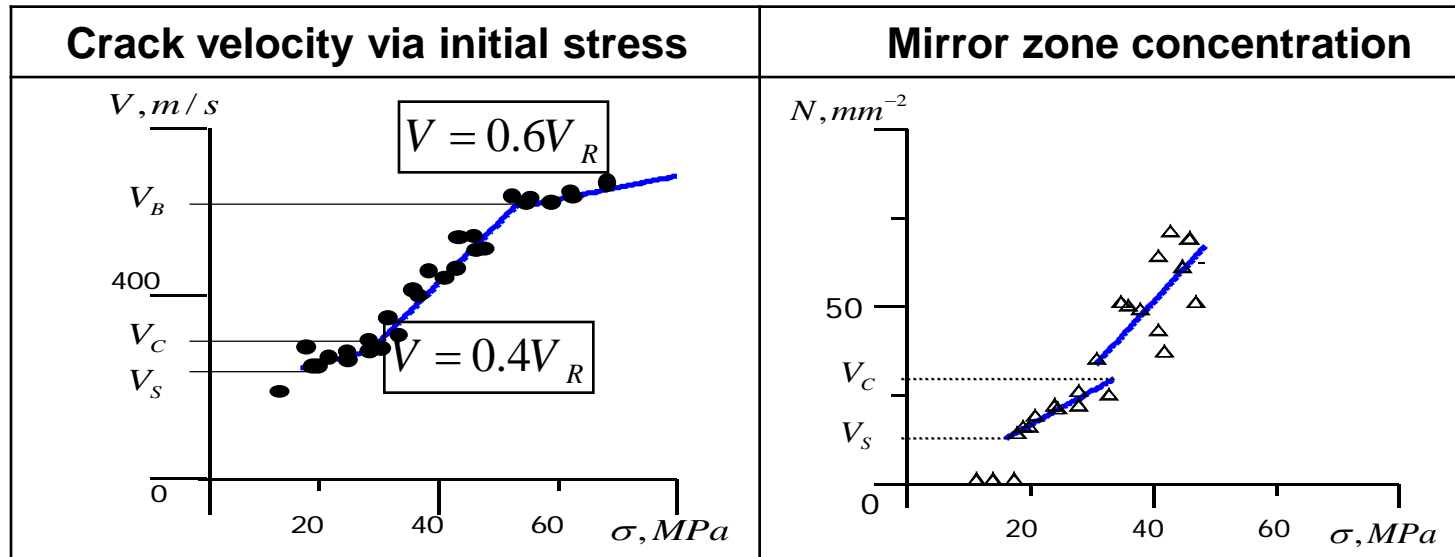


$$V < V_C$$

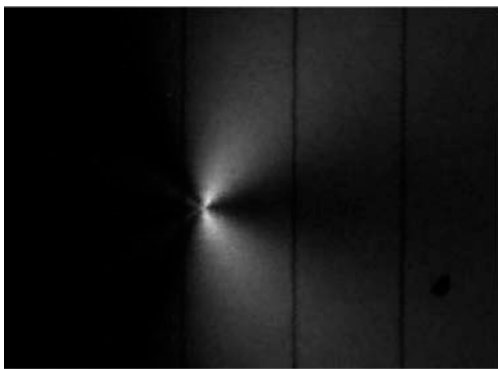
$$V > V_C$$

EXPERIMENTAL STUDY OF NONLINEAR CRACK DYNAMICS

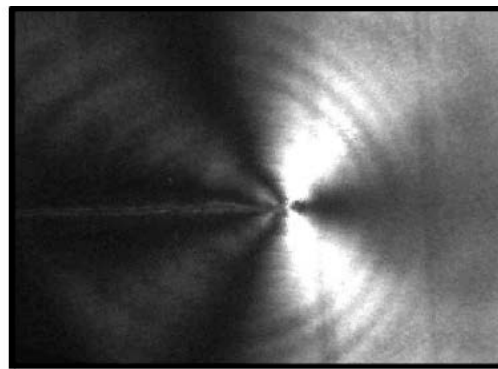
- Characteristic crack velocity



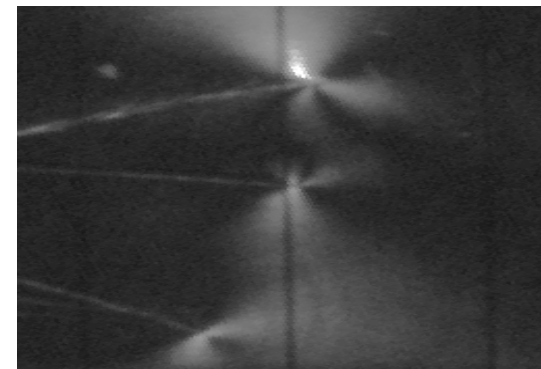
- Crack dynamics



$V < V_C$



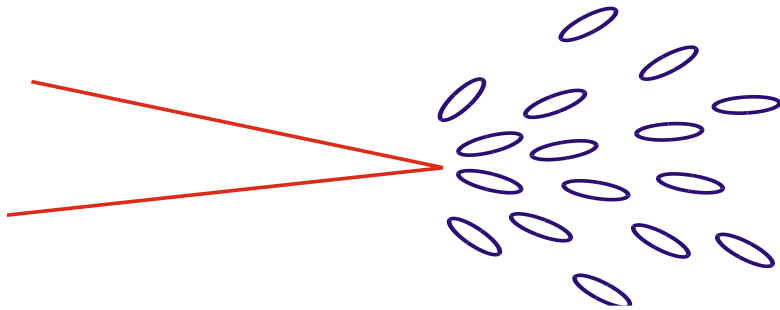
$V > V_C$



$V > V_B$

NONLINEAR CRACK DYNAMICS

•Self-similar solutions (attractor types)



$$\sigma_{ik} \approx K_I r^{-\frac{1}{2}} f_{ij}(\theta)$$

$$V \leq V_C$$

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

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

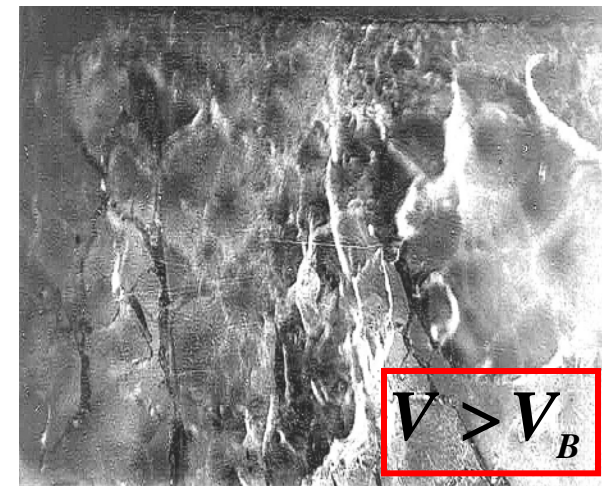
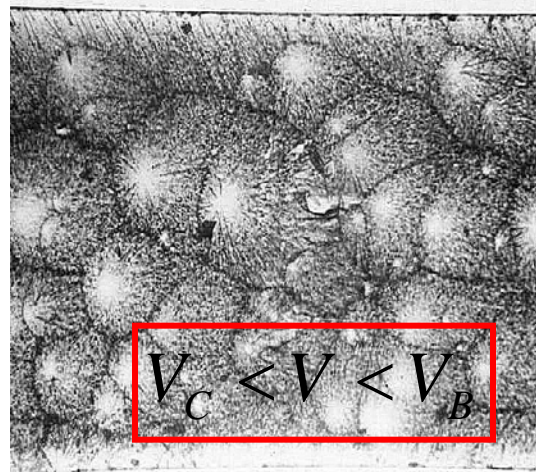
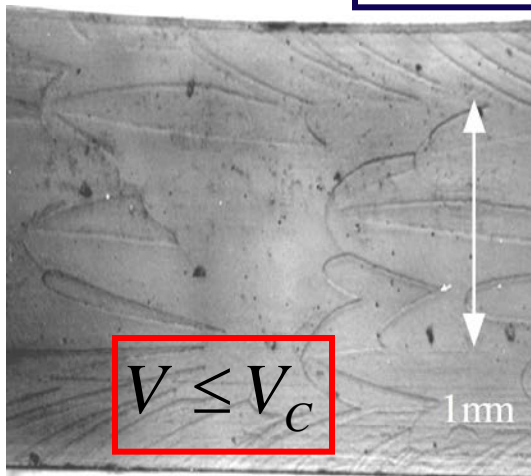
$$V > V_B$$

•Critical velocity

$$V_C = L_c / t_c \sim 300 \text{ m/s},$$

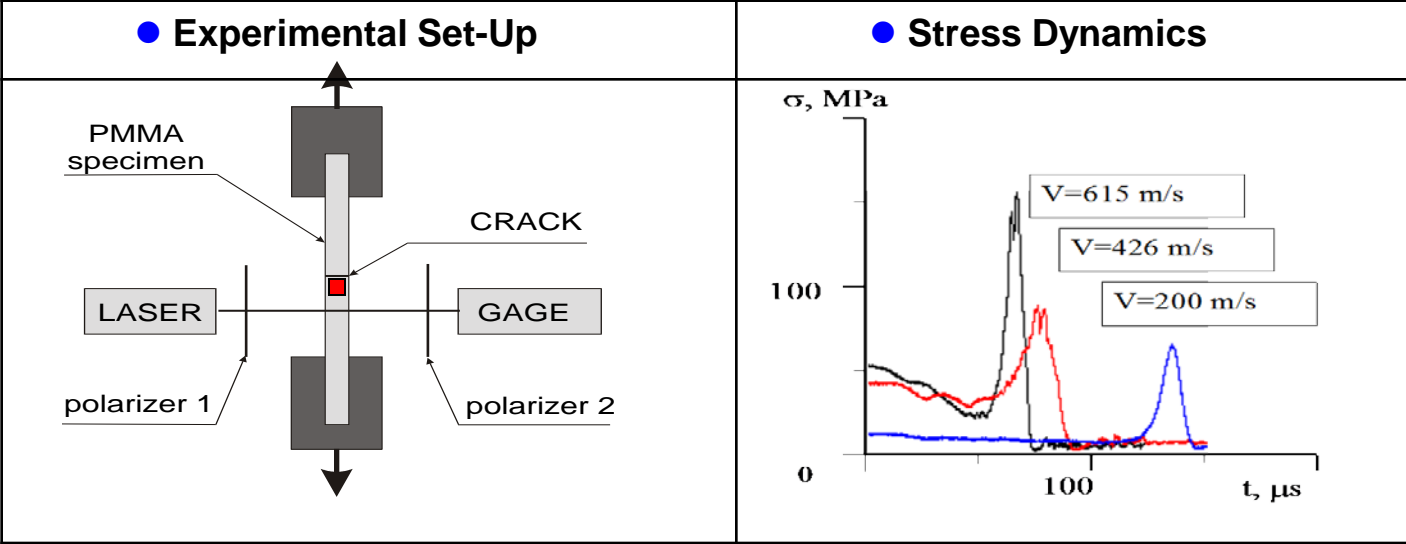
$$L_c \sim 0.3 \text{ mm},$$

$$t_c \approx 1 \mu\text{s}$$

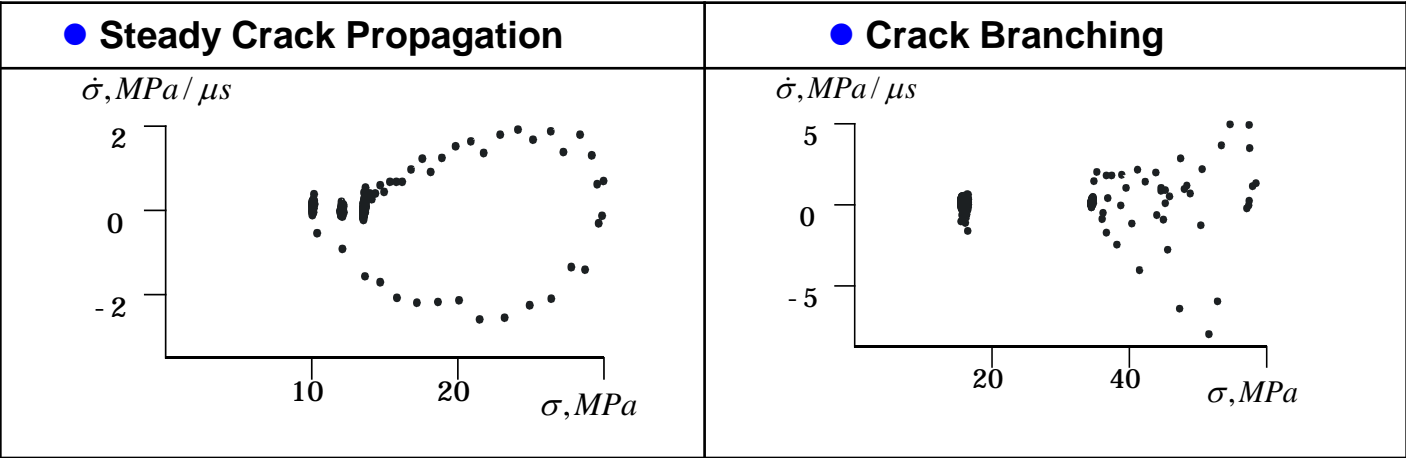


SCALING ANALYSIS OF ATTRACTOR TYPES FOR DYNAMIC VARIABLES

- Failure under Dynamic Crack Propagation.



- Attractor Types. Experimental Plots of the Poincare Cross Section



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.

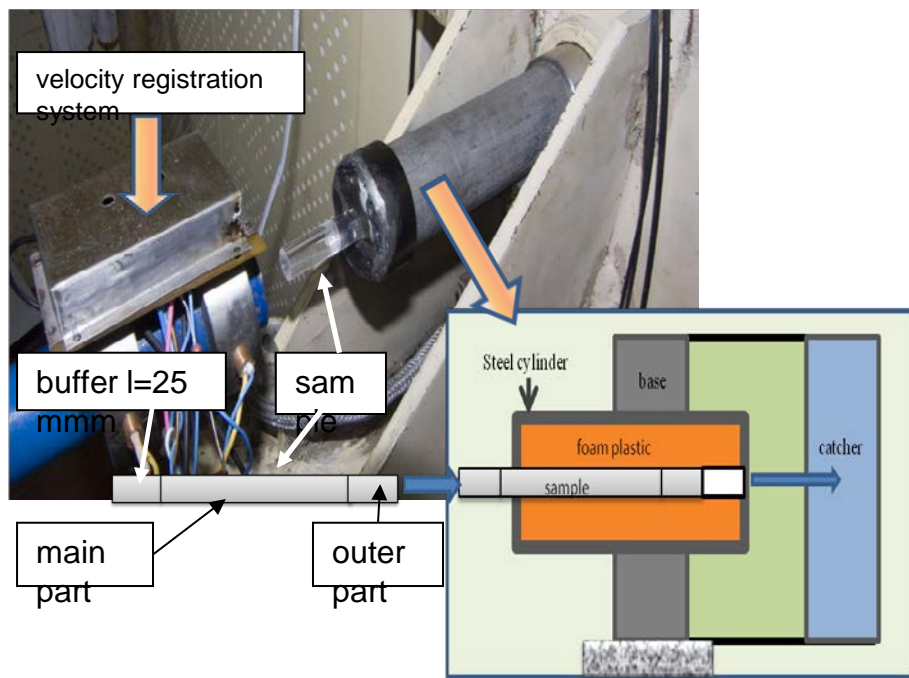


Рис.1. Экспериментальная установка по динамическому нагружению образцов для исследования статистических закономерностей фрагментации

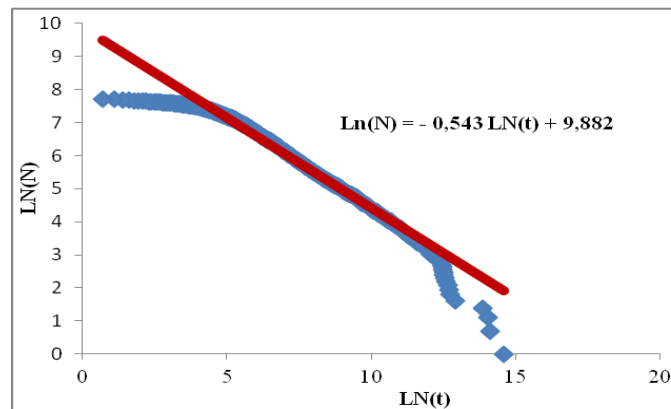
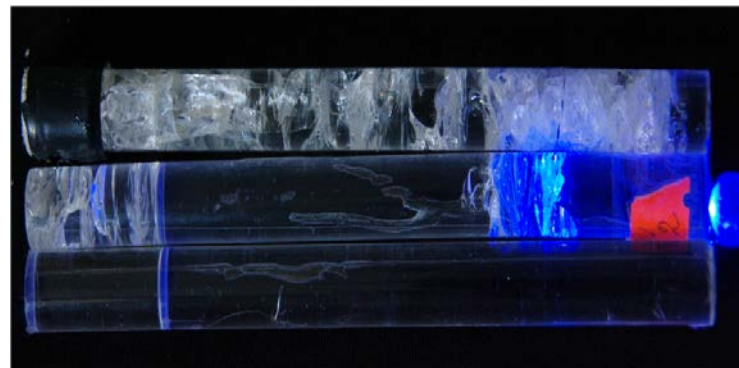
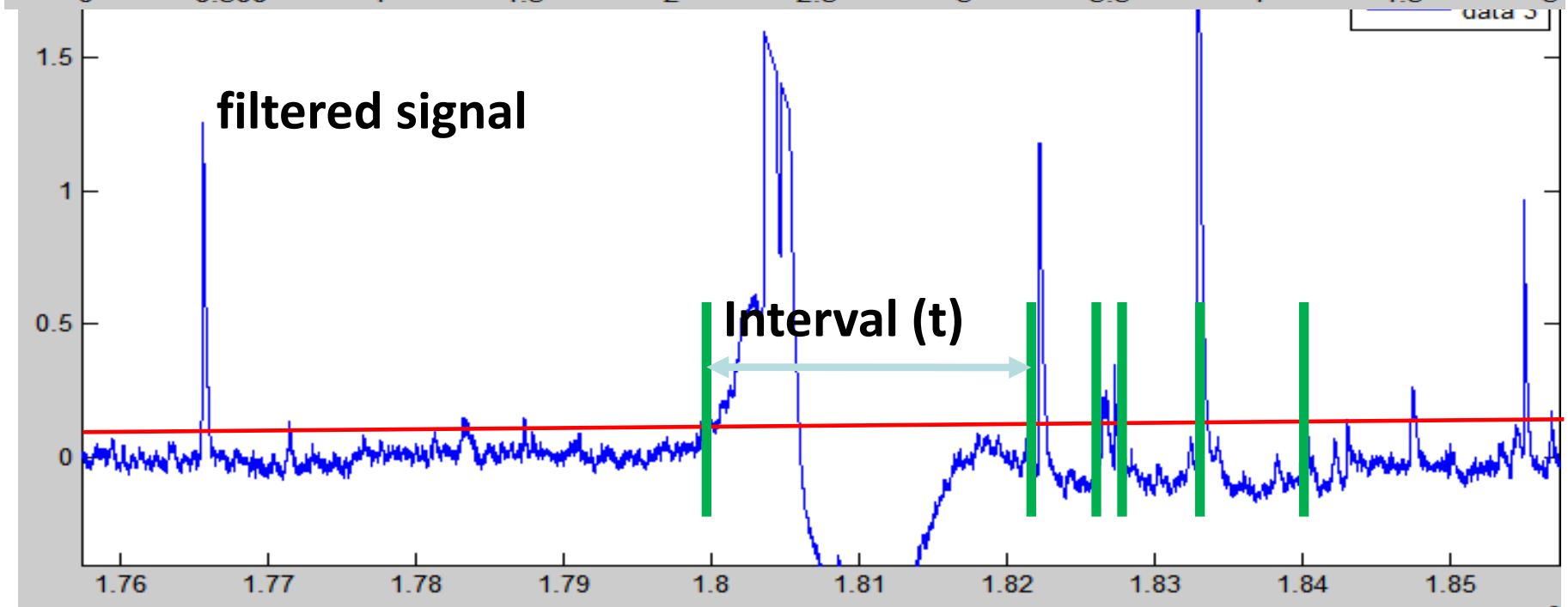
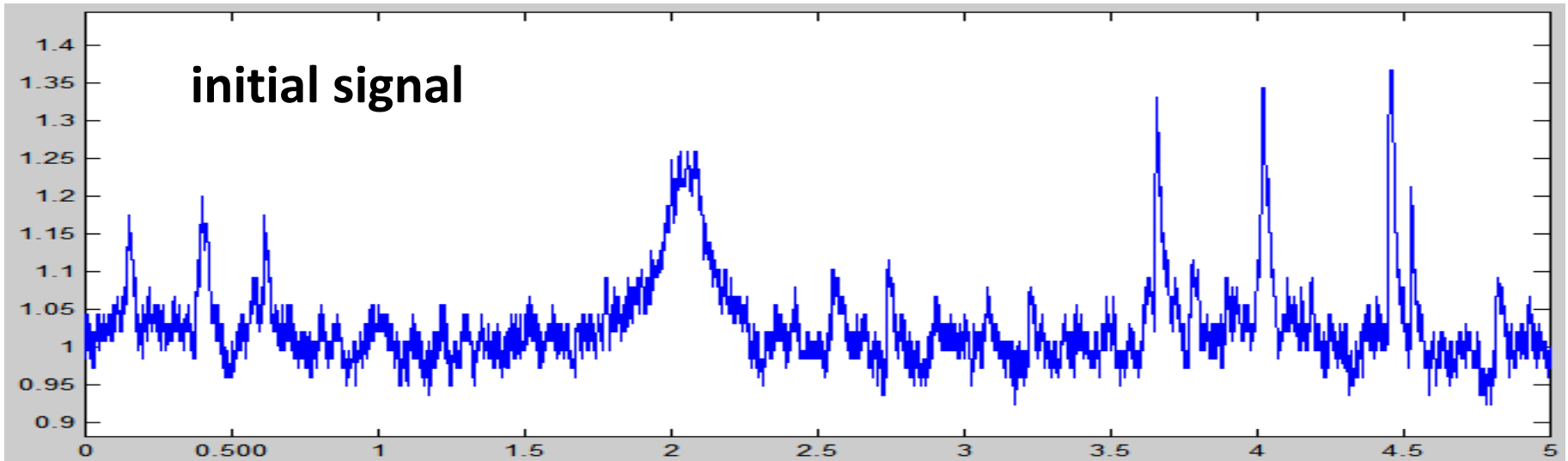
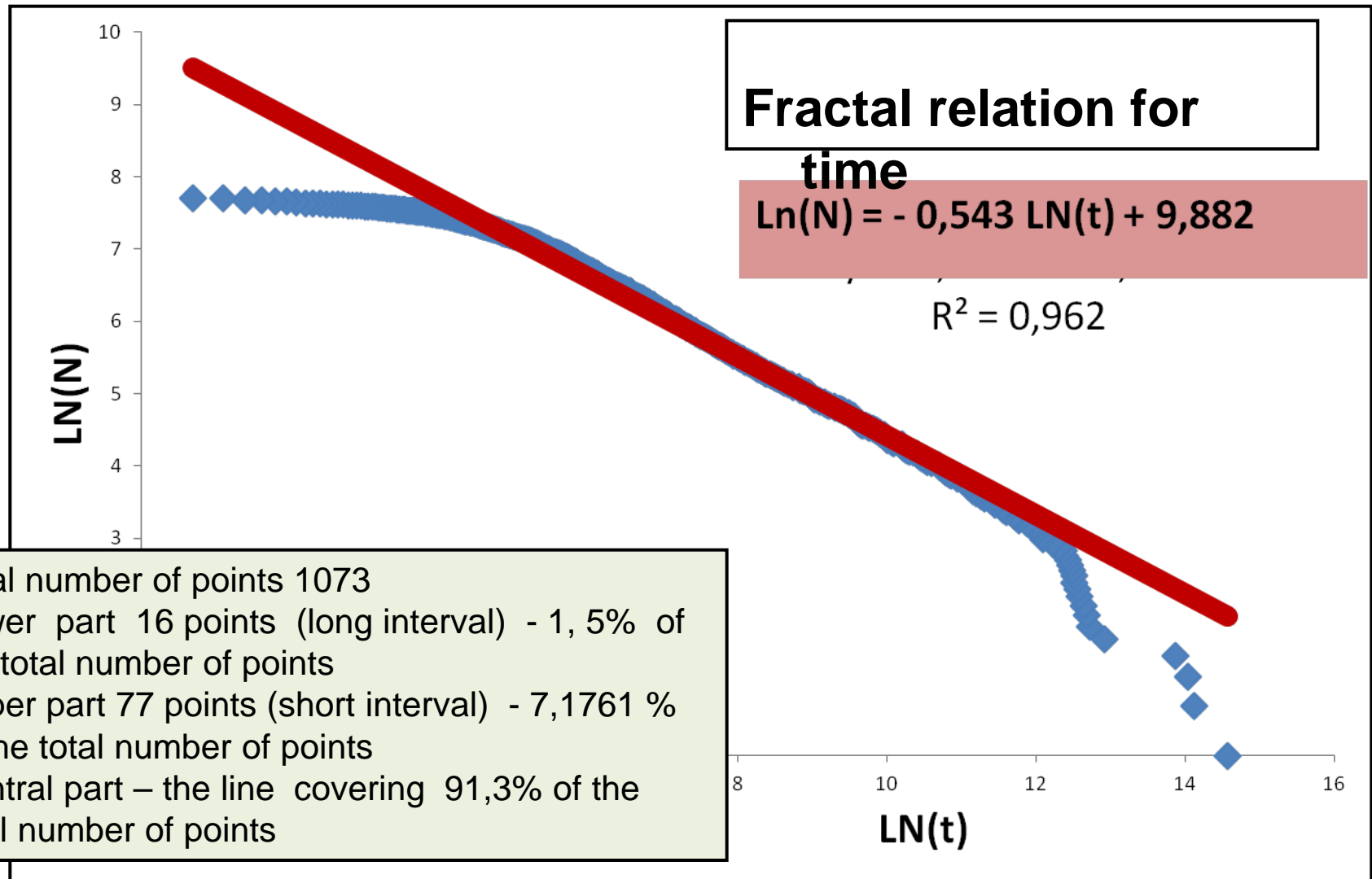


Рис.2. Кумулятивная функция распределения временных интервалов, соответствующих формированию поверхностей разрушения

Data processing



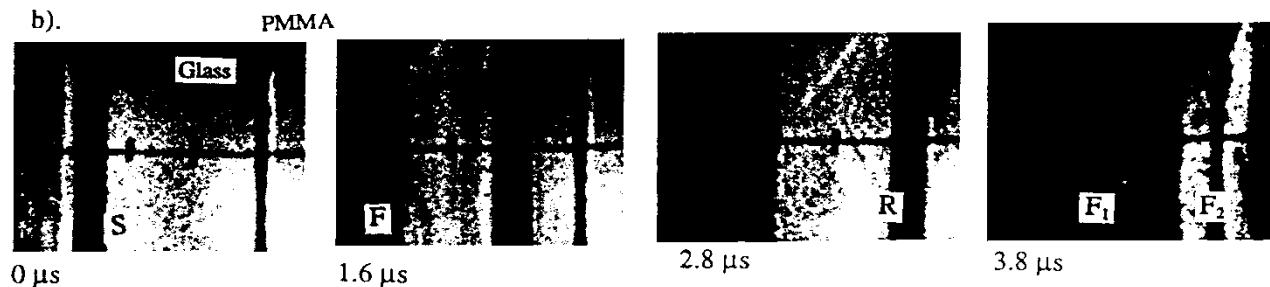
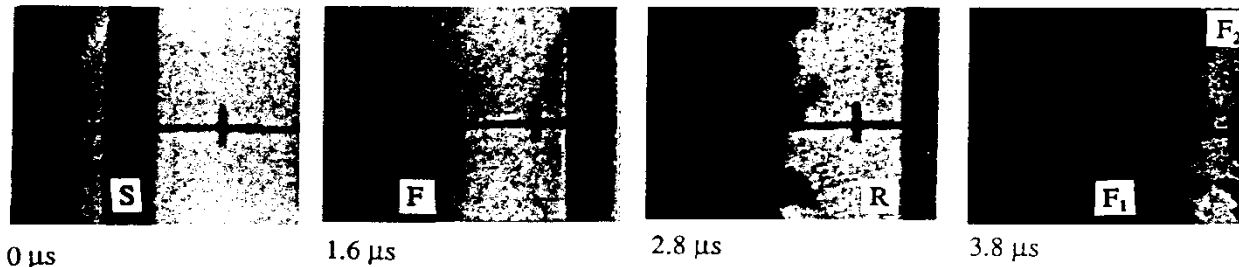
Cumulative distribution function of time interval



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?

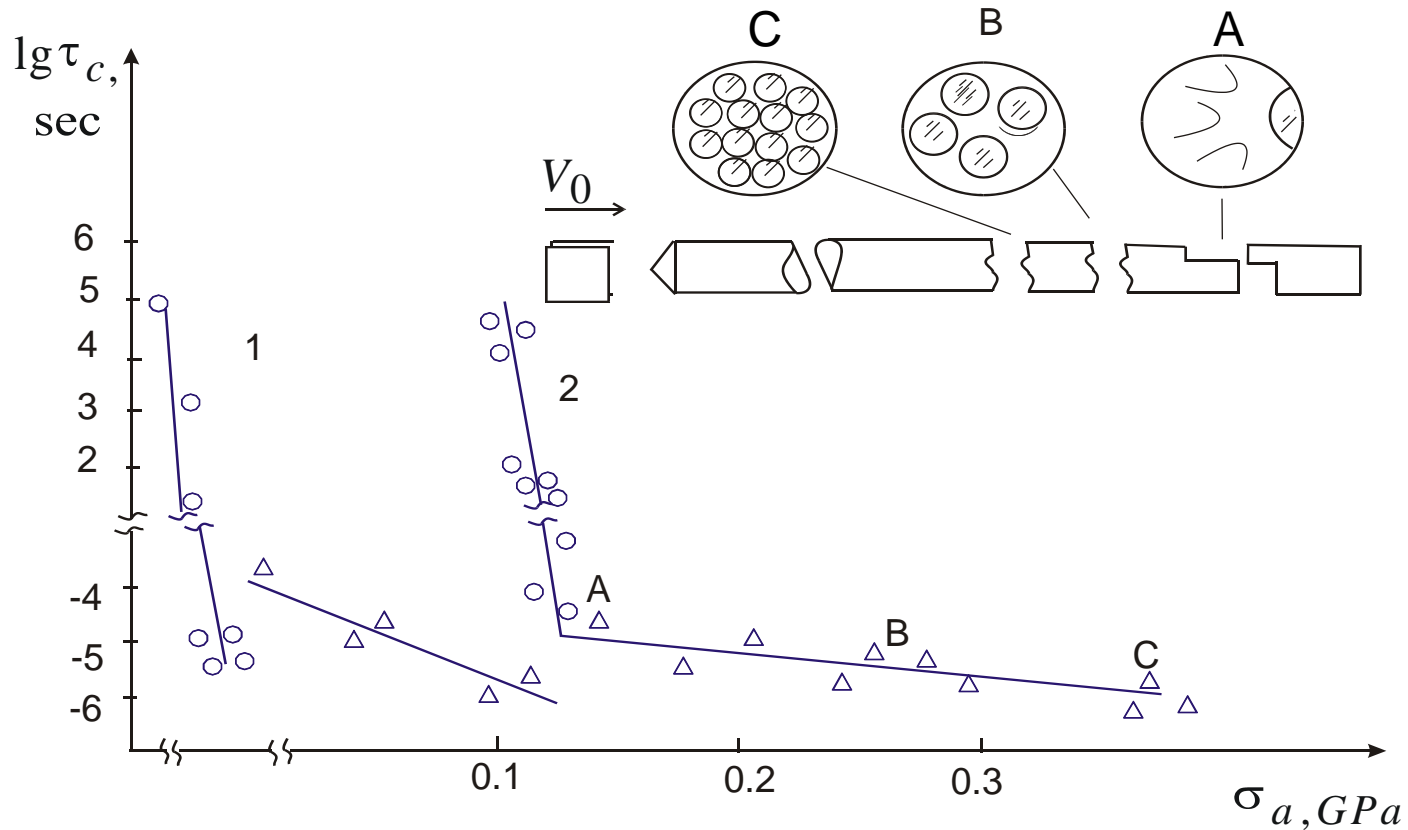
What is the material state behind a failure wave?

What are the kinetics of failure process and failure wave?

«Резонансное» разрушение в условиях откола

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

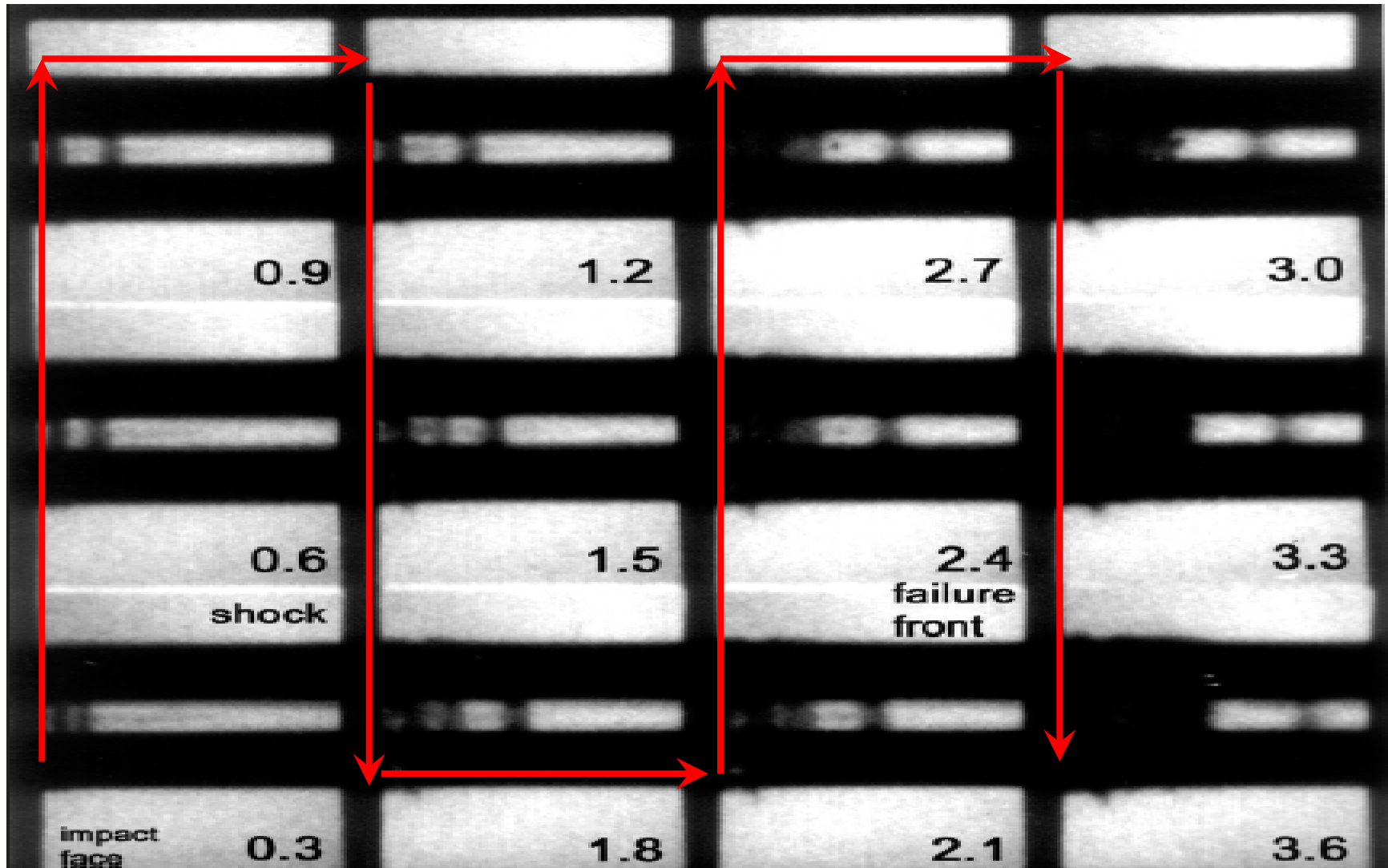
«Динамическая ветвь» при отколе



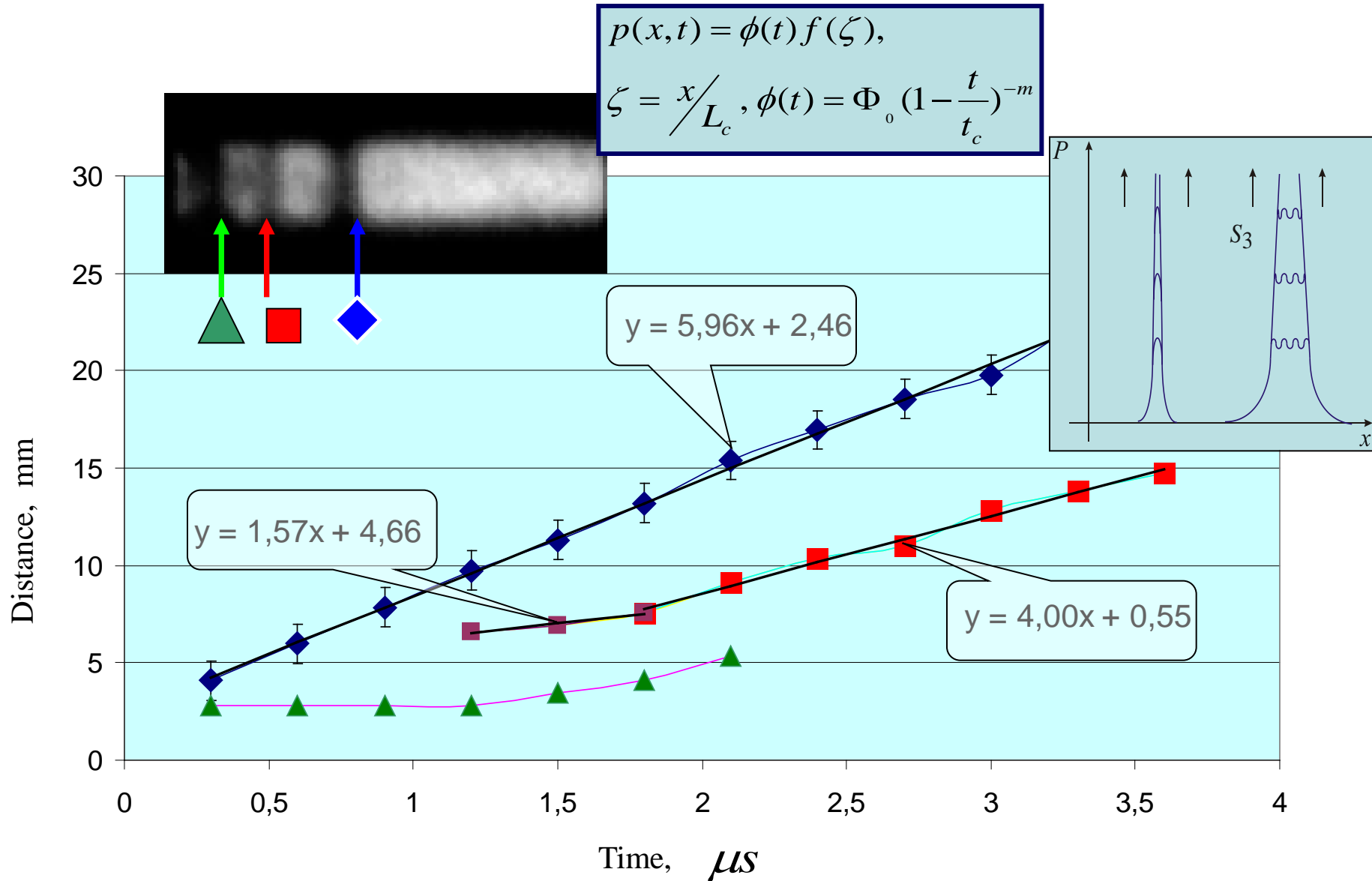
Зависимость времени откольного разрушения t_c от амплитуды напряжений σ_a при ударно-волновом нагружении (PMMA (1) и ультрафтор (2))

Failure waves in fused quartz

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

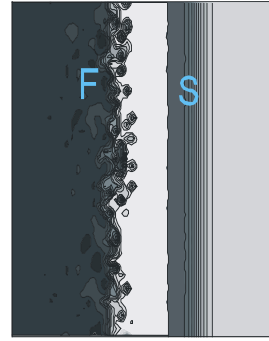
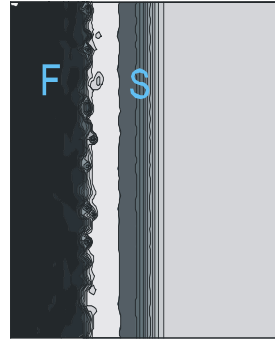
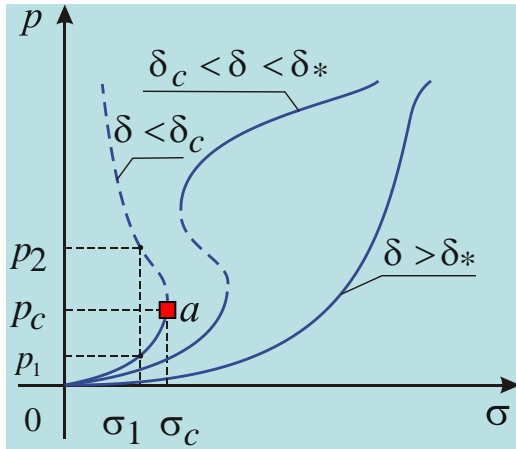


Скорости волновых фронтов

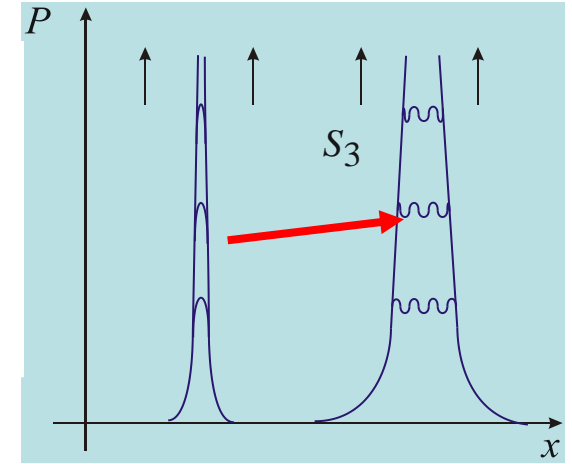


Моделирование волновых фронтов

Characteristic non-linearity



“Blow-up” collective modes



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

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

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

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

Self-similar solution

For $p > p_c$:
 Driving force
 Non-locality parameter

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

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

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

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

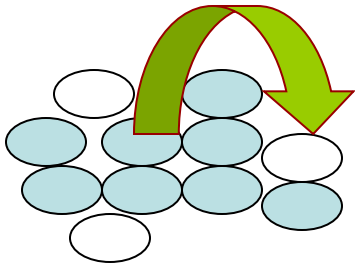
$$\xi = x / \varphi(t)$$

“Blow-Up” Front:

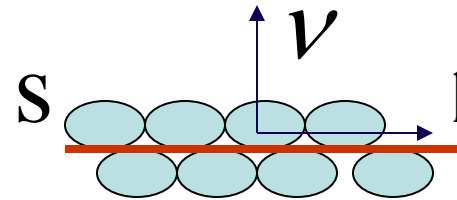
$$x_f = \xi_f \chi_0^{1/2} S_0^{-\frac{q}{2(\beta-1)}} t^{\frac{\beta-q+1}{2(\beta-1)}}$$

Я.И.Френкель “Кинетическая теория жидкостей”

- Определение точки плавления, традиционно используемое в термодинамике, использует сопоставление потенциалов для жидкого Φ_1 и твердого состояний Φ_2
- Этот метод основан на косвенном предположении о том, что две фазы качественно различны, т.е. промежуточное состояние, связывающее последние, не существует.
- Определение статистического интеграла, свободной энергии должно включать все возможные фазовые координаты для твердого, жидкого и промежуточного состояний.



$$\int \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) d\Gamma$$



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

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

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

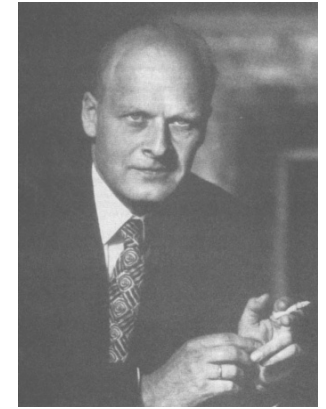
Структурно-скейлинговые переходы в ансамблях дефектов и некоторые автомодельные закономерности неустойчивости в жидкостях



Илья Пригодине

Gregory L. Eyink, Katepalli R. Sreenivasan. *Onsager and the theory of hydrodynamic turbulence*. REVIEWS OF MODERN PHYSICS, 2006.

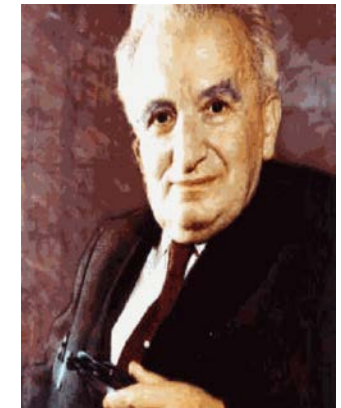
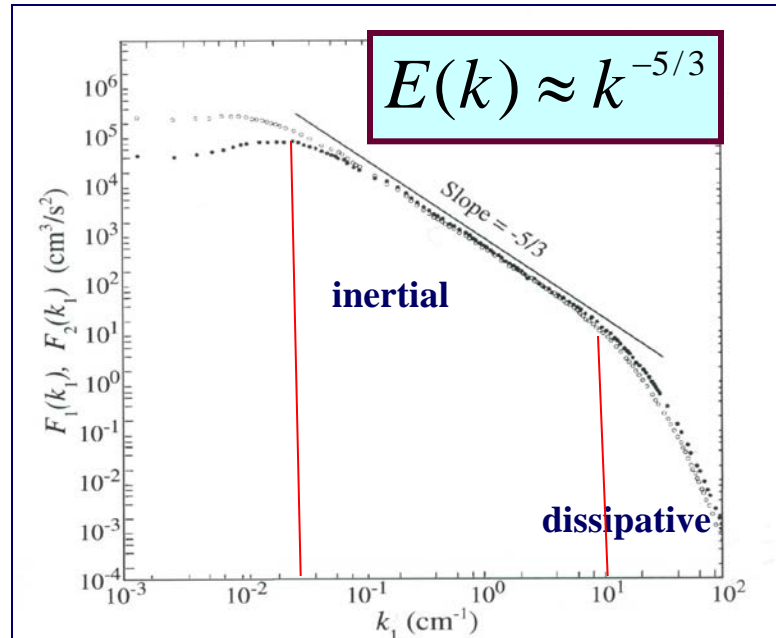
В.В.Новожилов:
**Пластичность – «замороженная»
турбулентность**



Lars Onsager



Андрей Николаевич
Колмогоров



Theodore von Karman

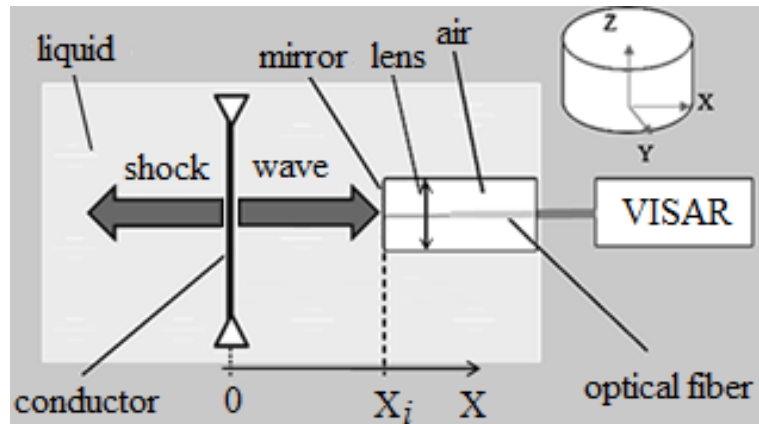
Колмогоров А.Н., //ДАН СССР.-1941.-Т.30,31,32.

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

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)

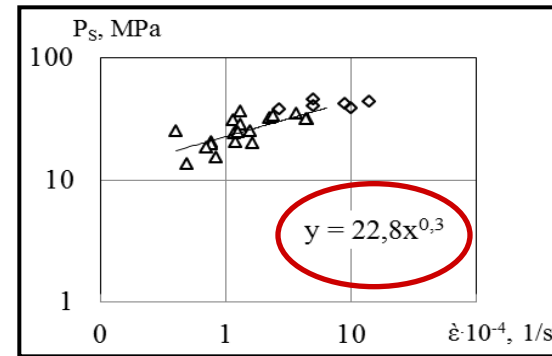
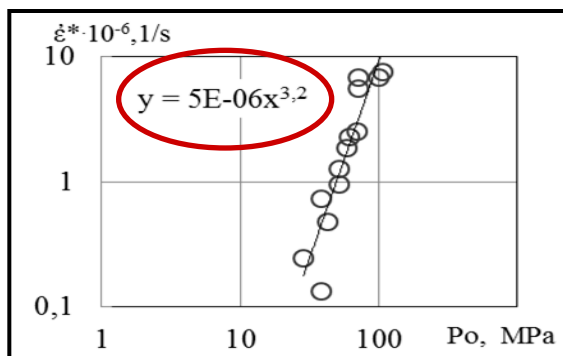
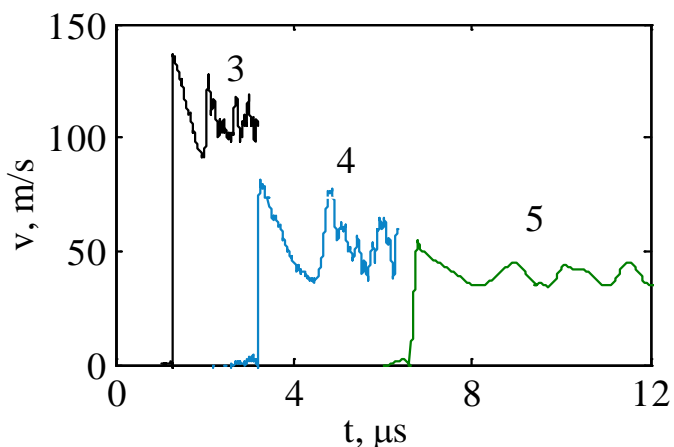


Fig.1. a) Particle velocity profiles: 3 – 10 mm; 4 – 14 mm; 5 – 25 mm. b) strain rate versus pulse amplitude. c) spall strength versus strain rate деформации.

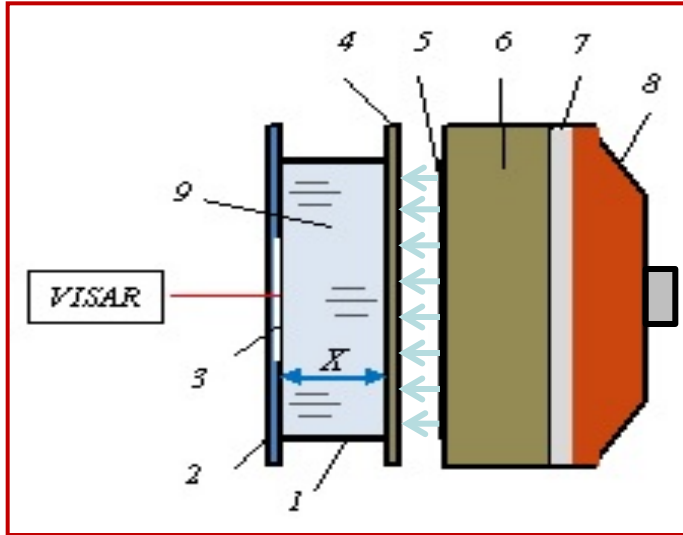


Рис. 1. Схема эксперимента

Таблица 1. Параметры сборок

1	кольцо, St	$X=2-20$	от 50
2	окно, ПММА	2	70
3	отражатель, Al	0.007	2.6
4	экран, ПММА	2	70
5	ударник, Al	0.4	50
6	ослабитель, StЗ	20	120
7-8	взрывная коническая линза		

Скорость деформации на фронте волны сжатия $\sim 10^6 \div 10^7$ 1/с
и на фронте волны разрежения $\sim 3 \times 10^4 \div 17 \times 10^4$ 1/с.



Рис. 2. Регистрации скорости свободной поверхности системой VISAR [1]

B.V.Derjagin: Anomalous Water

Numerous investigations of the shear mechanical properties of liquids by other methods indicate that the liquids are Newtonian up to supersonic frequencies. This means that the shear elasticity must be absent also at the frequency of our experiment of 73.5 kHz. Below we shall prove that this contradiction is an apparent one. The shear mechanical properties are usually measured by two methods. The first method is based on a determination of mechanical impedance, when a rotating piezoquartz vibrator is immersed in the liquid under investigation.⁷ In this method, the setup is calibrated by a standard liquid, which is considered to be explicitly Newtonian. Afterwards, on determining the constant of the setup, other liquids are investigated. In accordance to our data,³⁻⁷ all the liquids possess a shear elasticity at the frequencies of shear oscillations of about 10^5 Hz; that is, in nature there is no explicitly Newtonian standard liquid. Therefore, it would be incorrect to measure the shear mechanical properties of liquids by the method of rotary or twisting oscillations.

TABLE I. Values of the shear elasticity and the tangent of the mechanical loss angle.

Liquids	T (°C)	G' (10^{-6} dyn cm $^{-2}$)	$\tan\theta$
Water	23	0.31	0.3
Cyclohexane	22	0.22	0.09
Hexadecane	24	0.75	0.08
Dibutylphthalate	21	0.82	0.21

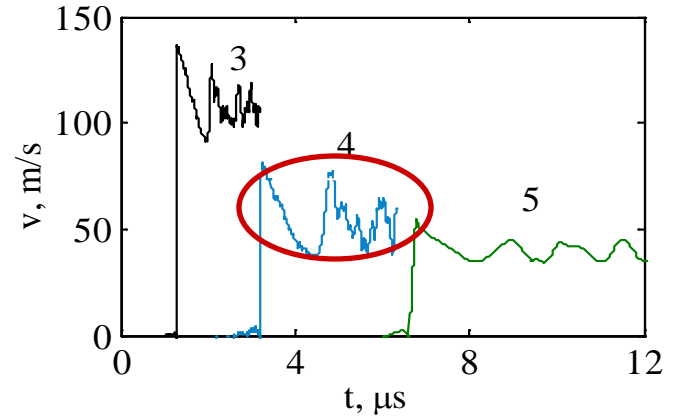
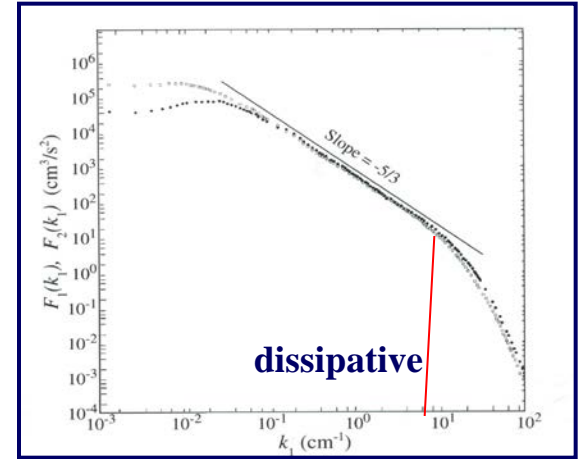
V.V.Новожилов: Пластичность – «замороженная» турбулентность

- 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.

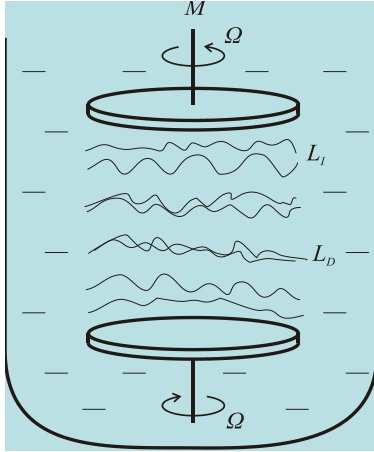
A unique series of works setting forth and experimentally...
liquids...
basic...
measu...
wave...
another...
0.25 – 3...
of this...
layer t...
be calc...
cerine...
weights.



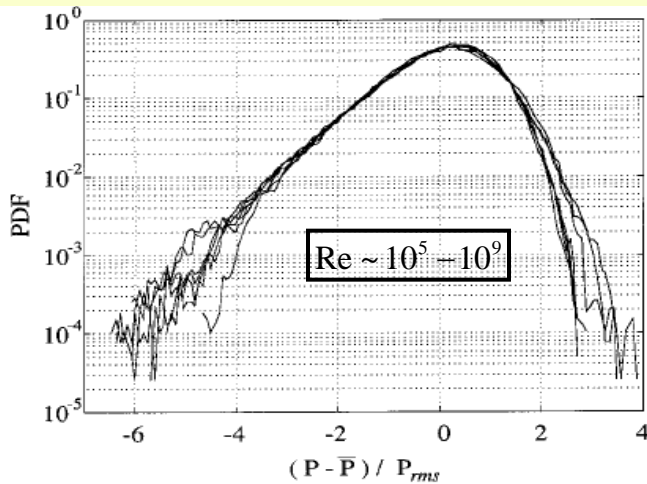
Колмогоров А.Н. О логарифмически нормальном законе распределения частиц при дроблении. // Доклады АН СССР, 1941. Т. 31, 2, - С. 99-101

Автомодельность полностью развитой турбулентности и неустойчивости пластического сдвига

Karman's instability

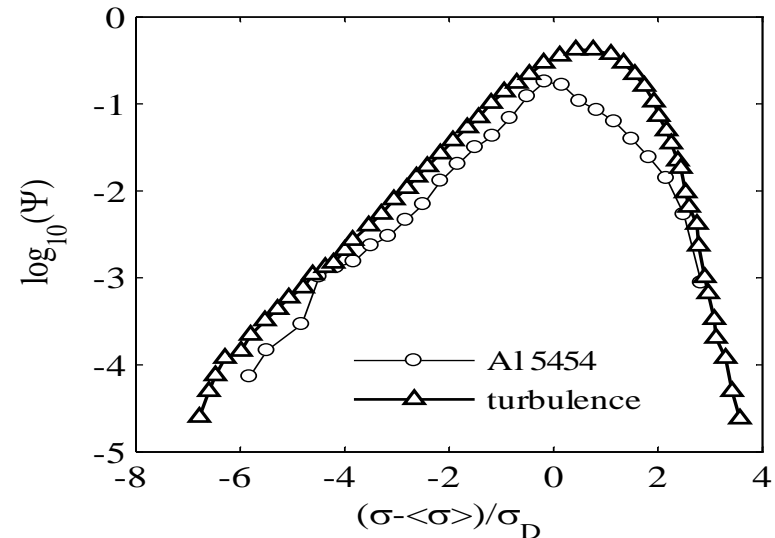
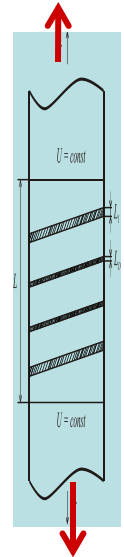
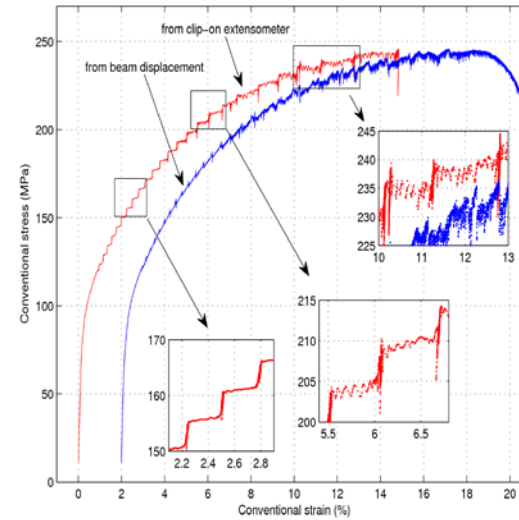


•Bramwell S.T., Holdsworth P.C.W., Pinton J-F. *Universality of rare fluctuations in turbulence and critical phenomena* // Nature, 1998, v.396, p.554.



Независимость PDF от числа Рейнольдса в диапазоне четырех порядков

•Plastic Strain Instability in AlMg alloy

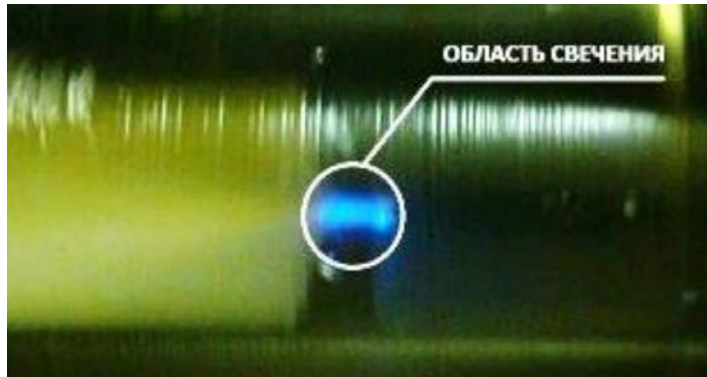


PDF universality in fully developed turbulence

(Pinton J.-F., Holdsworth P.C.W. Power fluctuations in a closed turbulent shear flow//Phys.Rev.E. 1999)

- Экспериментальные исследования развитого стационарного турбулентного потока (схема Кармана - турбулентность в замкнутом объеме, инициированная вращающимися дисками), установили **статистическую автомодельность функции распределения флуктуаций мощности, инжектированной в жидкость.**
- Статистическая автомодельность проявляется в универсальности функции распределения флуктуаций мощности, измеряемой на вращающихся дисках в пределах **четырёх порядков чисел Рейнольдса** в области значений последних, соответствующих развитой турбулентности .
- Универсальность функции распределения флуктуаций соответствует режиму **резкого падения мощности**, инжектируемой в поток, и связывается с генерацией когерентных структур на масштабах, **близких к интегральному масштабу системы.**
- Функция распределения для нормированной на величину стандартного отклонения флуктуации мощности P обнаружила независимость от числа Рейнольдса и присутствие характерных ветвей с выраженной дисперсией в области значений, отличающихся от средних .
- **Когерентность понимается в смысле распространения пространственно-временных масштабов структур, модифицирующих течение, на интегральный масштаб.**

Гидролюминесценция. Граница возникновения свечения жидкости в зависимости от толщины канала



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

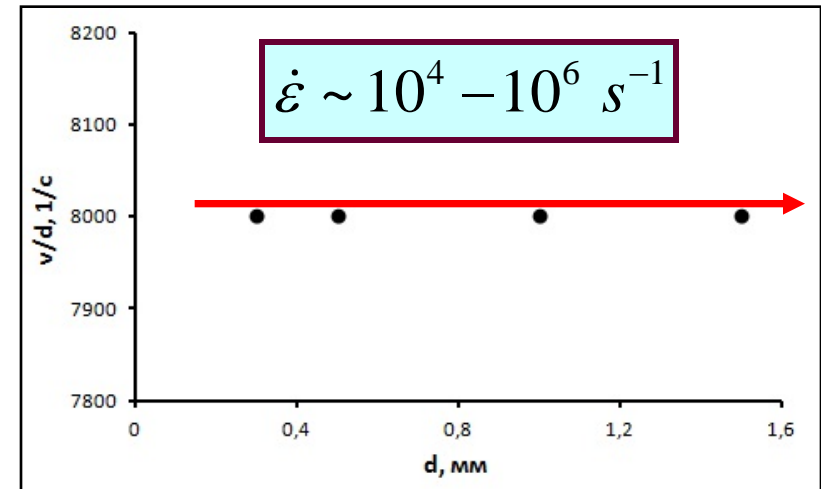
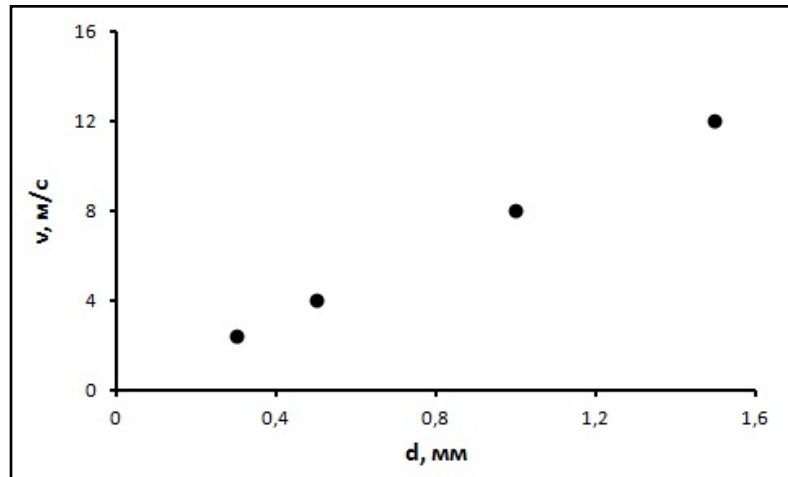


Рис.1. Граница возникновения свечения жидкости в зависимости от толщины канала и скорости потока [Герценштейн С.Я., Монахов А.А. Электризация и свечение жидкости в коаксиальном канале с диэлектрическими стенками // «Механика жидкости и газа», № 3, с. 114 – 119, 2009. 46].

Van der Meulen, J. H. J. 1986 The relation between noise and luminescence from cavitation on a hydrofoil. In Proc. Joint ASCE/ASME Conf. New York, NY: American Society of Mechanical Engineers

By varying the hydrofoil incidence angle, van der Meulen was able to identify four distinct regimes of cavitation behaviour:

1. At the shallowest angles (2°), the cavitation bubbles were of hemispherical form and remained separate from one another.
2. As the angle of attack was increased to approximately 4° , separated bubbles gave way to a continuous cavity, which took the form of a sheet attached to the leading edge of the foil.
3. When the angle of attack was increased further (7°), the sheet became progressively more unstable, giving rise to the production of clouds of cavitation bubbles.
4. At the highest angle of attack (12°), the boundary layer separates at the leading edge of the hydrofoil and the cavities form in the core of the vortical structures generated in the recirculation zone.

Luminescence from hydrodynamic cavitation

M. FARHAT, A. CHAKRAVARTY AND J. E. FIELD. Proc. R. Soc. A (2011) 467, 591–606

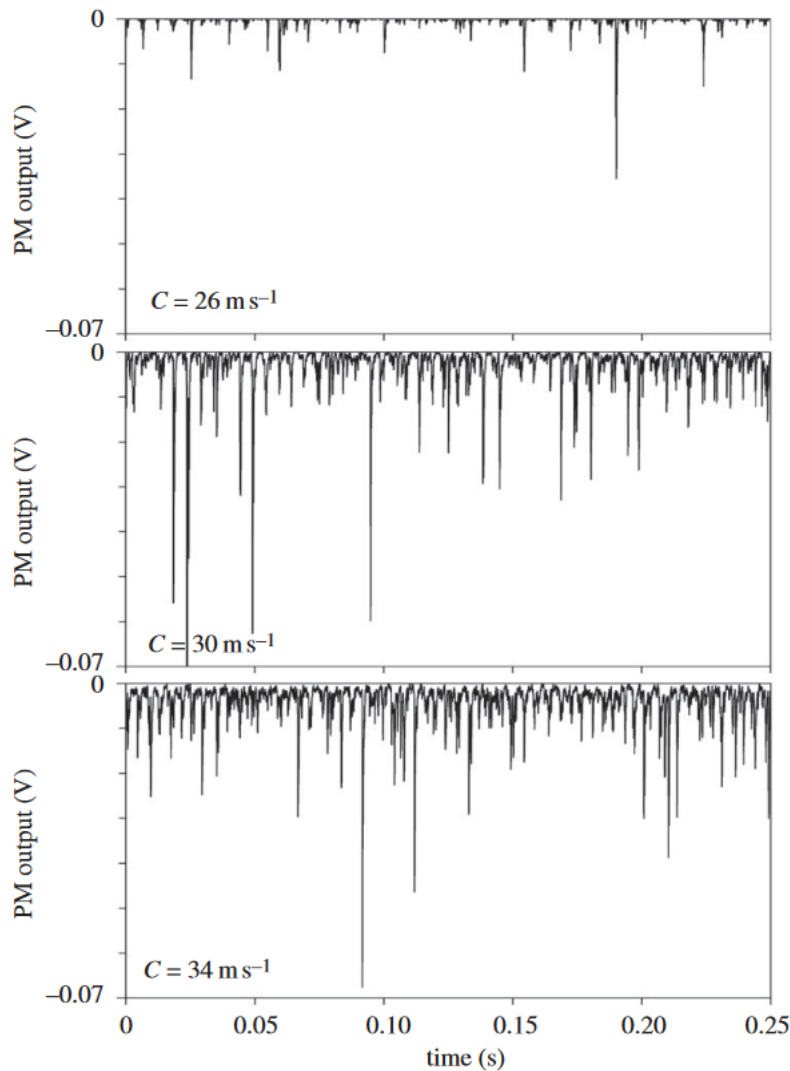


Figure 5. Temporal records of SL emission at different upstream velocities.

Van der Meulen (1986):

However, as the erosion data were a measure of the cavitation occurring within a small distance of the surface of the foil, and the noise data corresponded to all cavitation, irrespective of where it occurred, the identification of the power-law scaling of the various measures of cavitation activity was thought to be of more significance than direct comparisons.

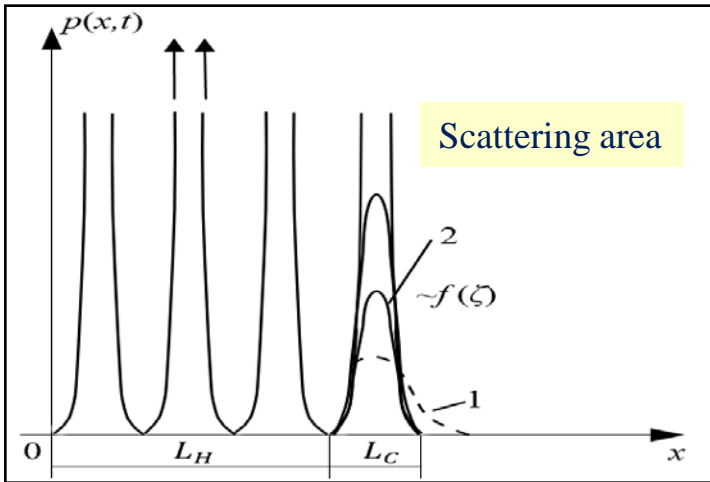
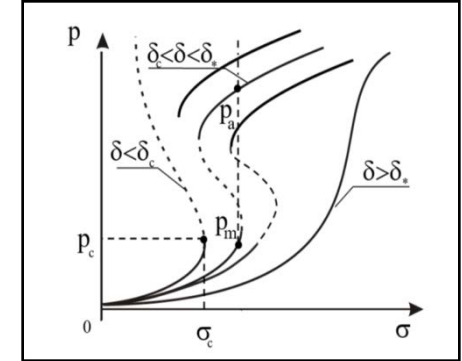
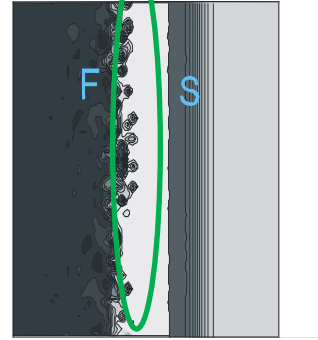
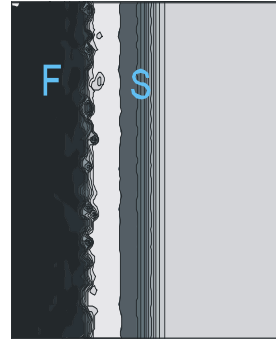
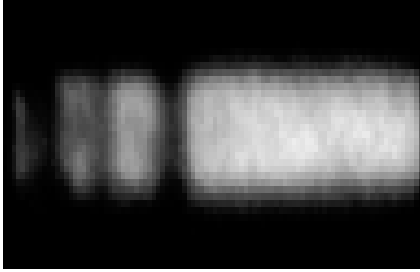
$$p \sim C^n$$

....The intensity of the emitted cavitation luminescence increased with increasing velocity of the water flow (as the water velocity is perturbed by the hydrofoil, a reference velocity, C , upstream of the blade is generally quoted). **He interpreted the results in terms of power-law behaviour, the exponent of C being between 3.9 and 7.2.** Similarly, he found the noise (measured using a hydrophone) generated by the cavitation was also positively correlated to C , with an exponent between **4.8 and 5.9.**

Salvador Dali's Self-organized Criticality



Волны разрушения как акустический предел ВН-фазовых переходов. МИНИМАЛЬНЫЙ предел вязкости



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

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

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

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

Сахаров А. Д. Вакуумные квантовые флуктуации в искривленном пространстве и теория гравитации // Доклады АН СССР, 1967.

- метрическая упругость
- индуцированная гравитация.

Plenty of Nothing: Black Hole Entropy in Induced Gravity (V.P. Frolov and D.V. Fursaev)

$$\frac{\eta}{S} \sim \frac{\hbar}{k_B}$$

$$S = k_B \ln Z$$

$$\xi = \left(\frac{\hbar}{\rho(G/\rho)^{1/2}} \right)^{1/4} \approx (10^{-9} - 10^{-10}) m$$

KSS universal lower bound for condensed matter: the Sakharov limit !???

$$\eta \sim 10^4 P_Z$$

The minimal length of fragments in the acoustic limit:

Автомодельность статистики фрагментации



Nevill Mott

Mott, N.F. Fragmentation of Shell Cases. Proc.Royal Soc., 1947.-A189, P.300-308.

«... Проблема фрагментации имеет фундаментальное значение... Она может пролить свет на то, что произошло с нашей Вселенной после Большого Взрыва...»

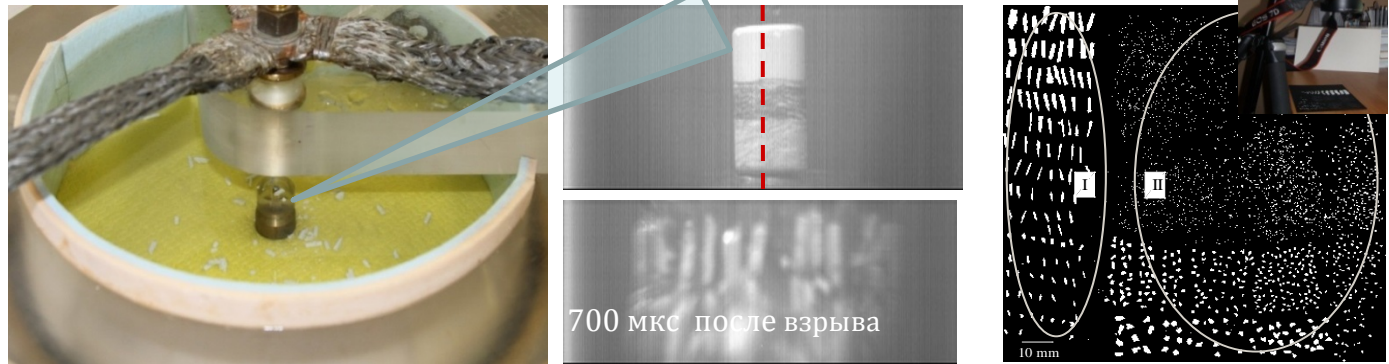
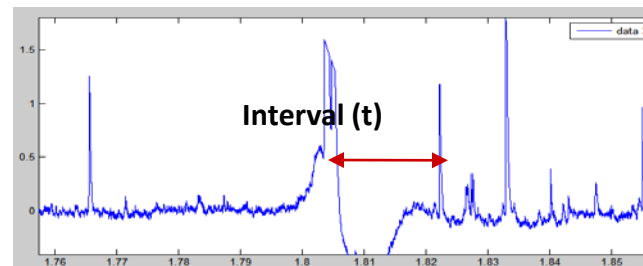
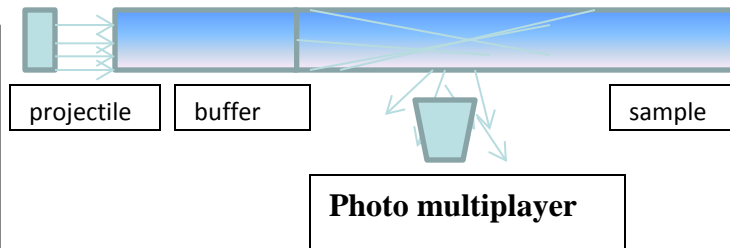
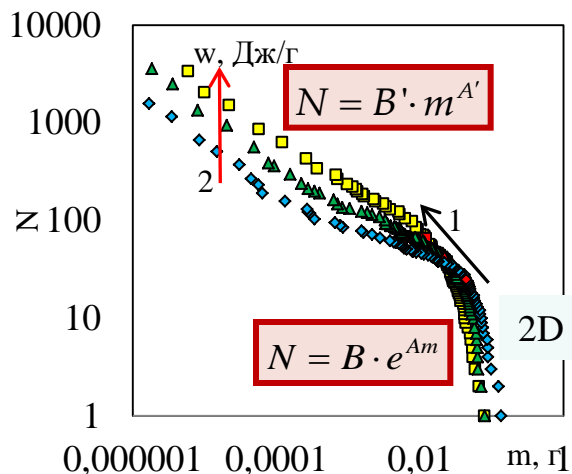
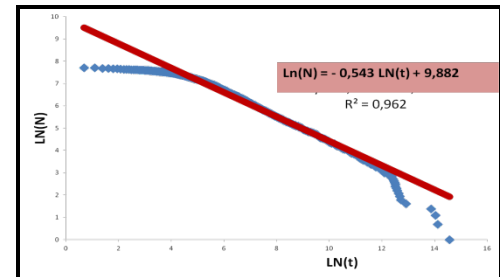


Рис.1 Фрагментация керамического трубчатого образца УВ нагружением в жидкости

Суммарная масса фрагментов не менее **98%** массы исходного образца. Общее количество фрагментов изменялось от **1600** до **4800** в зависимости от удельной энергии нагружения

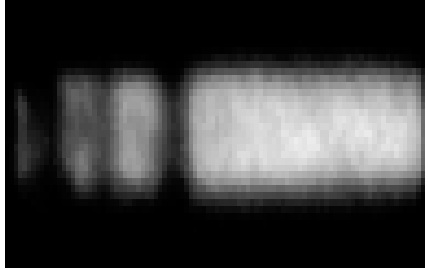


Cumulative distribution function of time intervals



Волны разрушения как акустический предел ВН-фазовых переходов

предел вязкости

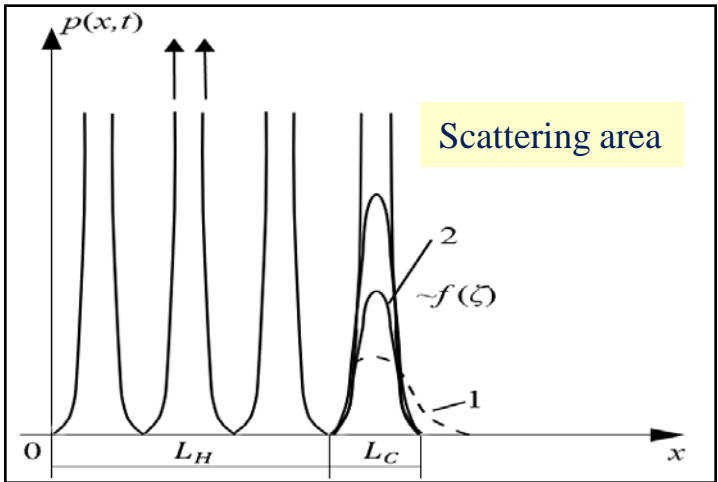
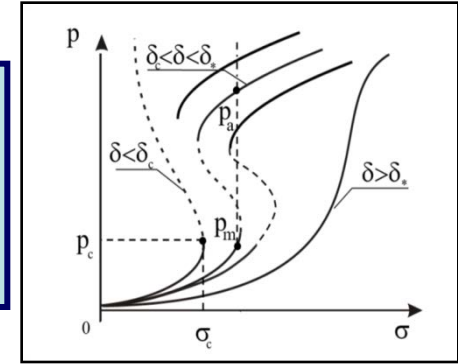


$$p(x,t) = \frac{1}{2} p_a \left[1 - \tanh(\xi l^{-1}) \right]$$

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

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

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



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

Акустический предел. (Bekenstein-Hawking entropy) :

$$G = \rho C^2$$

$$S = k_B \ln Z^*$$

$$F \sim -T_{eff} \ln Z^*,$$

Увеличение плотности энергии:

$$G = \rho C^2 \dots\dots$$

$$\frac{\eta}{S} \sim \frac{\hbar}{k_B}$$

The minimal length of fragments in the acoustic limit:

$$\xi = \left(\frac{\hbar}{\rho(G/\rho)^{1/2}} \right)^{1/4} \approx (10^{-9} - 10^{-10}) m$$

$$\sigma = 1/2 G \Phi_0 \left(1 - t/t_c \right)^{-m} \varpi_f L_c$$

$$\varpi_f = (\partial(f(\zeta))/\partial\zeta)_f$$

$$Y_f \sim 1/(2G) \Phi_0^2 L_c^2 \varpi_f^2$$

«Индукированная гравитация»:

KSS universal lower bound for condensed matter: the Sakharov limit !???

$$\eta \sim 10^4 P_Z$$

Discussion.....

This increase in the ratio would suggest the concentration of the emission into fewer, brighter cavitation events, in support of option (iii) discussed in §2. This concentration into fewer more energetic collapses, when the conditions driving cavitation at a hydrofoil become more extreme, is well known to submariners through the ‘anomalous depth effect’.

Propeller cavitation in a submarine is extremely unwanted, as it can readily reveal the location of the vessel to passive sonar. Submariners know that, once a propeller has begun to generate cavitation, submerging will tend to reduce cavitation noise. However, when the cavitation is strong and the vessel is at high speed, increasing the depth of the vessel will first cause an increase in the cavitation noise, before suppression occurs. This so-called ‘anomalous depth effect’ is due to the fact that an increase in static pressure increases the violence of those individual collapses that do occur, while reducing the number of energetic cavitation events (Leighton 1998). The evidence above in support of option (iii) is bolstered by the imageintensifier images (figure 2). These indicate that the spatial distribution of the luminescence (in the case addressed in the present work) is substantially independent of the velocity of the water flow, the effect of increasing velocity being to increase the average intensity of the luminescence. If options (i) and (ii) of §2 were applicable, then such constancy with varying flow speed