Критическая динамика конденсированных сред при интенсивных воздействиях

О.Б.Наймарк Институт механики сплошных сред УрО РАН

Содержание

• Введение. Ударно-волновое нагружение конденсированных сред как "in-situ" конечноамплитудное «зондирование» механизмов переноса импульса и разрушения

• Критическая динамика и закономерности скейлинга при формировании пластических волновых фронтов

•Критическая динамика при разрушении (волны разрушения, фрагментация)

• О некоторых универсальных сценариях развития пластической неустойчивости в металлах и жидкостях.

• Обсуждение результатов

XVII Международная конференция «Забабахинские научные чтения», г.Снежинск 19-23 мая 2025 г.

Эксперименты А.Д. Caxapoвa. Barker-Swegle-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	~104	74
Lead	35-250	~10 ⁴	47
Copper, Steel		~104	
Water	8	2 104	2
Mercury	15	2 10 ³	2.9





Я.И.Френгель (Кинетическая теория жидкостей):

"..Жидкости, являясь конденсированными средами, должны обнаруживать механизмы свойственные течения более твердым телам, но не газам. ...Широко распространенная точка зрения, текучесть что жидкостей реализуется при отсутствии сдвиговой упругости, ошибочной, является 38 исключением, быть, может жидкого гелия II "





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

О термодинамике твердого тела с дефектами

Vanadium



• Argon, Kocks, and Ashby "Thermodynamics and Kinetics of Slip", 1975

Свойства ансамблей мезодефектов

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

Material	I, _{μm} X-ray Microscopy		n, _C m̄ ³ X-ray Microscopy	
Aluminum	0.14	0.2	10 ¹¹	
Nikel	0.08	0.1	10 ¹²	2 10 ¹²
Gold, silver		0.2		2 10 ¹¹
Copper, zinc		0.25		5 10 ¹¹
Beryllium	0.12		5 10 ¹²	
Steel 30CrMCN2A		0.1		
NaCl	2	1-3	10 ⁸ -10 ⁹	10 ⁹
Polyetylene		0.015		6 10 ¹⁵
Polypropylene		0.02		7 10 ¹⁴
РММА		0.02		4 10 ¹²

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

Структурно-статистическая модель



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

$$dF^* = dU^* - T^* dS^* - A_{\xi} d\xi \qquad \qquad E \to E, \quad Q \to kT$$

Generalization of the Boltzmann-Gibbs Statistics

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

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

Effective Field

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

Сравнительный анализ с MTS-PTW-моделью



Феноменология твердых тел с мезодефектами. Структурно-скейлинговые переходы

Неравновесная свободная энергия

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







Эволюционное соотношение

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

Кинетические уравнения

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

$$\frac{dp}{dt} = -L_{p}\left(A\left(\delta,\delta_{s}\right)p - Bp^{s} + C\left(\delta,\delta_{s}\right)p^{s} - D\sigma - \frac{\partial}{\partial x_{i}}\left(\chi\frac{\partial p}{\partial x_{i}}\right)\right)$$

Автоволновые структуры

Автомодельные решения

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

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

Диссипативные структуры обострения

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

$$\zeta = x / L_{c}, \varphi(t) = \Phi_{0}(1 - \frac{t}{t_{c}})^{-m}$$

$$L_{m} = kL_{c}, \quad k = 1, 2, \dots$$

О динамике пластичности



Л.Б.Зуев, В.Е.Панин

Широкодиапазонные определяющие соотношения: переходы от термоактивируемых к автомодельным и 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.

SWEGLE-GRADY универсальность пластических волновых фронтов

Experimental study (plate impact test for copper)



«Резонансное» разрушение в условиях откола

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

«Динамическая ветвь» при отколе



Волны разрушения

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

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



 b).
 PMMA

 Glass
 Image: Solution of the solution

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



Distance, mm

Результаты моделирования



Автомодельность статистики фрагментации



Nevill Mott Nobel Prize, 1977

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



Эксперименты А.Д. Caxapoвa. Barker-Swegle-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	~104	74
Lead	35-250	~10 ⁴	47
Copper, Steel		~104	
Water	8	2 104	2
Mercury	15	2 10 ³	2.9

Viscosity and elasticity of shocked condensed matter





Андрей Дмитриевич Сахаров

Я.И.Френгель (Кинетическая теория жидкостей):

"..Жидкости, являясь конденсированными средами, должны обнаруживать механизмы свойственные течения более твердым телам, но не газам. ...Широко распространенная точка зрения, текучесть что жидкостей реализуется при отсутствии сдвиговой упругости, ошибочной, является 38 быть, исключением. может жидкого гелия II "

•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.



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, УФН, 1958.

•B.V.Derjagin et al., Shear elasticity of low-viscosity liquid at low frequencies. Phys.Rev.A,1990

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

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

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 ~10¹¹ 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.

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].

-

Эксперимент



Модернизированная экспериментальная установки для исследования соно- и









Экспериментальное наблюдение эффектов гидро- и сонолюминесценции



 $\begin{array}{c}
400 \\
300 \\
\hline \\
300 \\
\hline \\
300 \\
\hline \\
0 \\
0 \\
0,5 \\
1,5 \\
2,5 \\
5, \cdot 10^5 c^{-1}
\end{array}$

Зависимость частоты импульсов, регистрируемых фотоумножителем, от скорости деформации



Граница возникновения свечения жидкости в зависимости от толщины канала и скорости потока [2].

Видеокадры наблюдения эффектов гидролюминесценции на трансмиссионном масле (интервал между кадрами ~10 миллисекунд) в канале и сонолюминесценции в диффузоре: а) начало «свечения»; б) развитая гидролюминесценция; в) и г) затухание «свечения» вследствии падения давления в канале диффузора.

[1] 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.
 [2] Колдамасов, А.И., 1991. Плазменное образование в кавитирующей диэлектрической жидкости // ЖТФ, Т. 61, Вып. 2, С. 188 – 190.

Автомодельность полностью развитой турбулентности и неустойчивости пластического сдвига

Karman's instability



•Bramwell S.T., Holdswoth 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



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



Ilya Prigogine



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



Lars Onsager



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