

ГЕОМЕТРИЯ И ФИЗИКА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

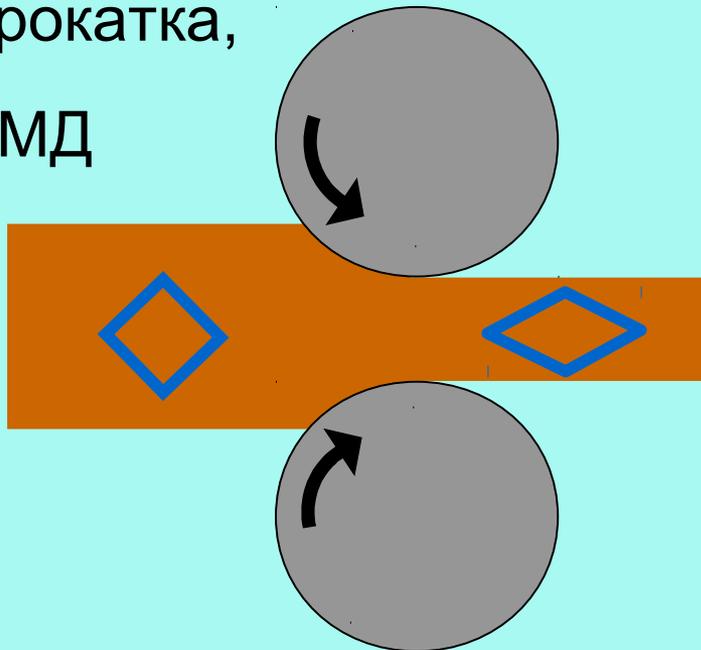
Ян Бейгельзимер

Донецкий физико-технический институт им.А.А.Галкина НАН Украины,
Донецк, Украина, e-mail: yanbeygel@gmail.com

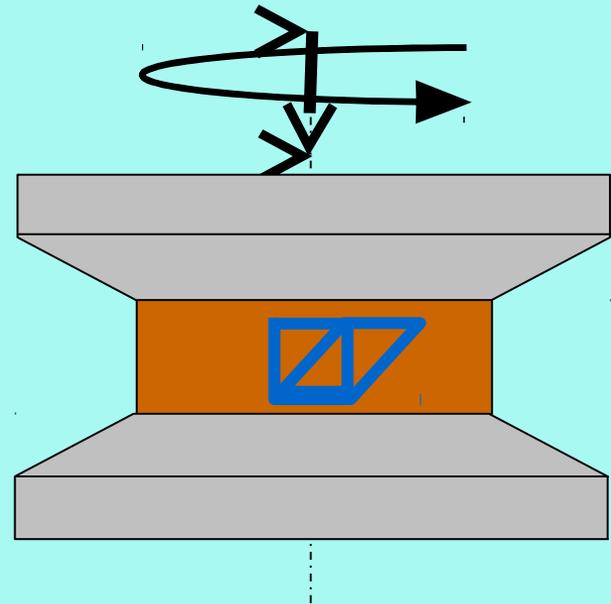
Вместо Введения

Что общего в процессах деформации?

Прокатка,
ОМД



НРТ,
ИПД



≈

Чистый сдвиг

$$e_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{H_0}{H_1}$$

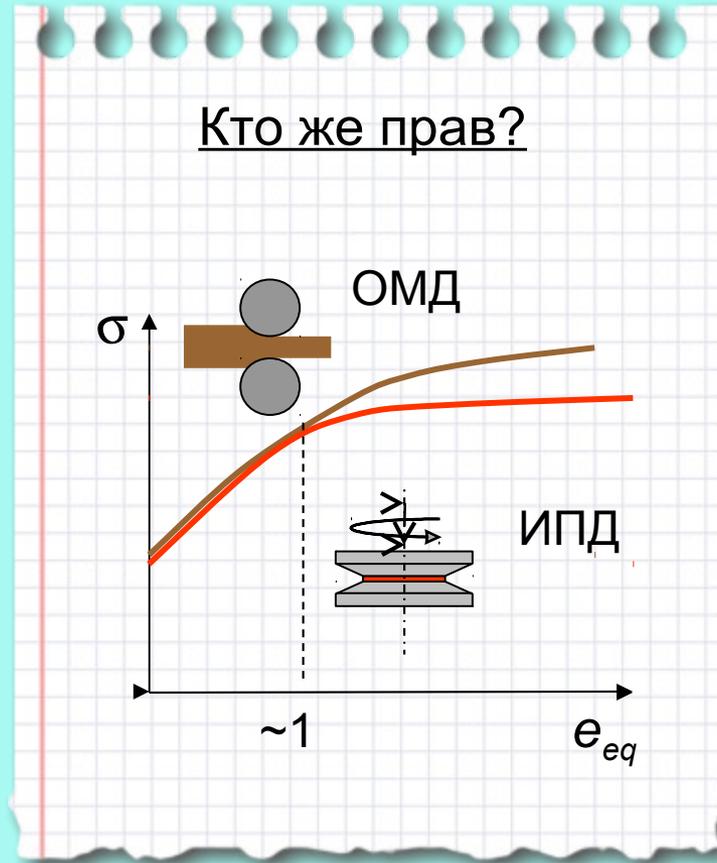
Нет различий

Эксперт А.Б.

Простой сдвиг

$$e_{eq} = \frac{tg\beta}{\sqrt{3}}$$

Проблема



Вопросы

• Различие принципиальное или нет (неверная формула для e_{eq} , текстура, размер образца, давление...)?

• Может быть для НРТ

$$e_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left[\left(1 + \frac{\gamma^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{\gamma}{2} \right] ?$$

Если принять эту формулу, то кривые сближаются.

Проблема имеет давнюю историю

Сдвиг и удлинение эквивалентны

P.Ludwik, 1909

Сдвиг и удлинение принципиально различны

P.W.Bridgman, 1940

Дискуссия обострилась в последнее время в связи с развитием ИПД

Ответы чрезвычайно важны, т.к.
вопросы затрагивают основы
механики и физики пластических
деформаций

Ответы Эксперта А.Б.

• Различие не принципиальное, обусловлено текстурой (*Эксперт А.*) либо неверной формулой для деформации (*Эксперт Б.*). При НРТ эволюция структуры металлов подчиняется универсальным закономерностям.

• Верна формула

$$e_{eq} = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} \quad (\text{Эксперт А.})$$

$$e_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left[\left(1 + \frac{\gamma^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{\gamma}{2} \right] \quad (\text{Эксперт Б.})$$

Выводы по докладу

Неверно!

Эксперт А.Б.

Кроме того:

- Обосновать основные черты нового механизма;
- Предложить ответ на вопрос:

Зачем платить дальше?

Средство достижения цели – Геометрия

Зачем привлекать другую науку? Необходим эксперимент!

Эксперт А.Б.



Геометрия - общий характер выводов

Окончательная бумажка. Фактическая!
Настоящая!! Броня!!!

*Проф. Преображенский,
Собаچه сердце, М.Булгаков*

Нео



НИЯ.

Я

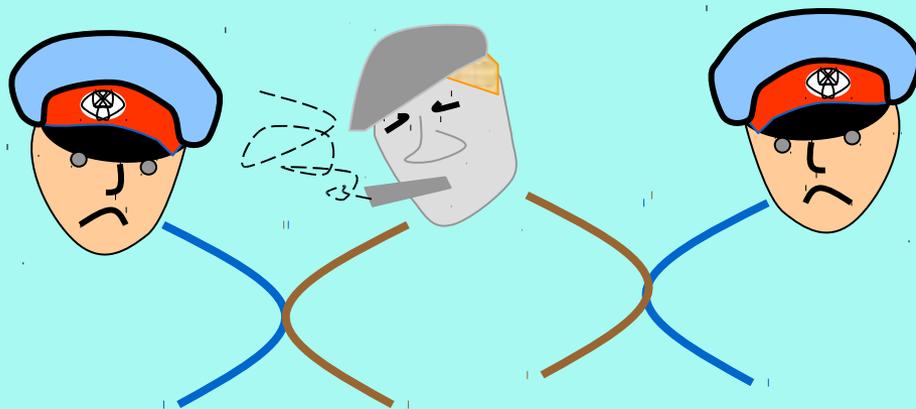
Victor Molev

1

Идея

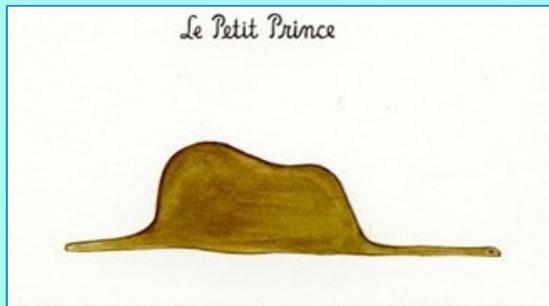
Если два милиционера держат между собой преступника и при этом идут в камеру, то заключённый также вынужден туда идти.

Теорема о двух милиционерах (из теории пределов)



Геометрия ограничивает Физику

Свойства геометрических преобразований накладывают ограничения, во многом определяющие физику пластических деформаций.



Это был удав, который проглотил слона.

Антуан де Сент-Экзюпери «Маленький принц»

О пользе ограничений

Учет ограничений позволяет предложить содержательные ответы на актуальные вопросы без использования сложного математического аппарата и проведения трудоемких экспериментов



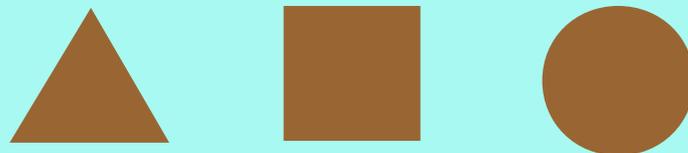
Но дешево не значит плохо

Симметрия

Симметрия (в широком смысле) – инвариантность, проявляемая при преобразованиях

Примеры:

Инвариантность фигуры при поворотах



Инвариантность длины отрезка при перемещении

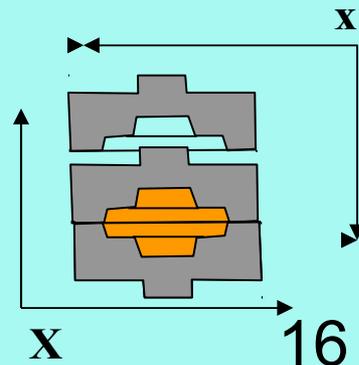


Инвариантность формулы при замене x на y

$$x^2 + y^2 + xy$$

$$y^2 + x^2 + yx$$

Инвариантность процесса при изменении системы координат



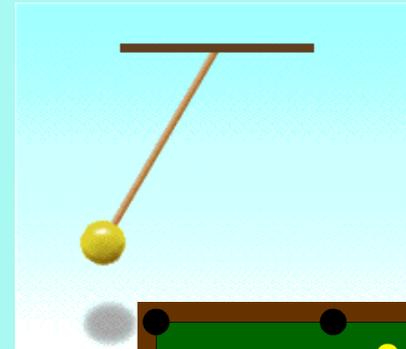
Сила симметрии



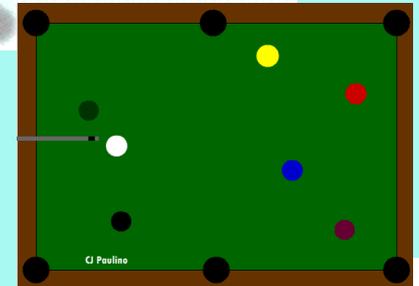
Законы сохранения —
строгое следствие симметрии

Эмми Нетер

Сохранение энергии – инвариантность
относительно сдвига во времени



Сохранение импульса – инвариантность
относительно сдвига в пространстве



Сохранение момента импульса –
инвариантность относительно
поворота



PresenterMedia

Содержание

Часть 1. Эквивалентная деформация при НРТ

Часть 2. Идеальная пластичность, стационарная микроструктура и уникальная симметрия простого сдвига

Часть 3. Перколяционный механизм деформации при простом сдвиге: Геометрические основания

Часть 1

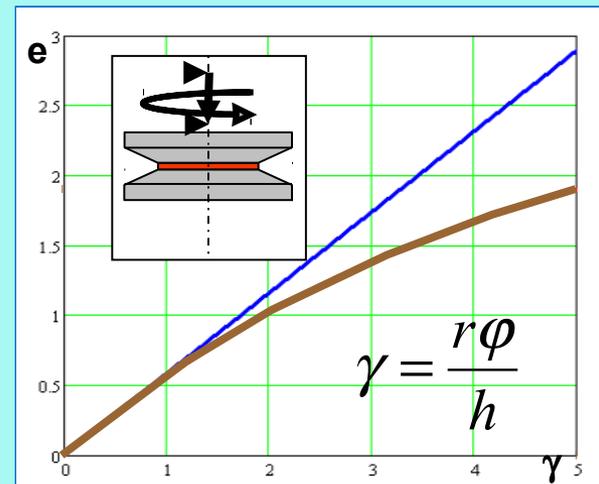
Эквивалентная деформация при НРТ

Три подхода к расчету e_{eq}

1. Мера деформации, обеспечивающая одно и то же упрочнение при разных видах нагружения (P.Ludwik (1909))
2. Дифференциал эквивалентной деформации определяет приращение работы пластической деформации (R. Von Mises (1913), S.C.Shrivastava et al.(1982), J.J.Jonas et al. (2011, 2012))
3. Логарифмическая деформация для максимально удлиненного волокна (A.Nadai (1950), A.Eichinger (1955), S. Onaka (2010, 2011, 2012))

Соотношения для e_{eq}

$$e_{eq} = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} \quad e_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left[\left(1 + \frac{\gamma^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{\gamma}{2} \right]$$

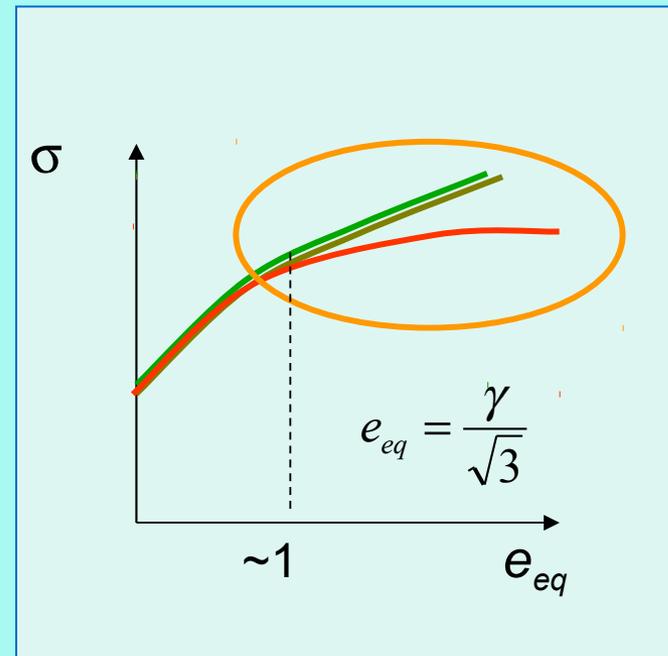
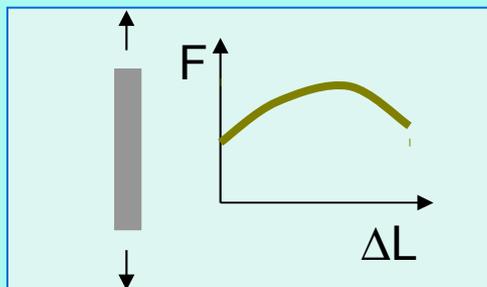
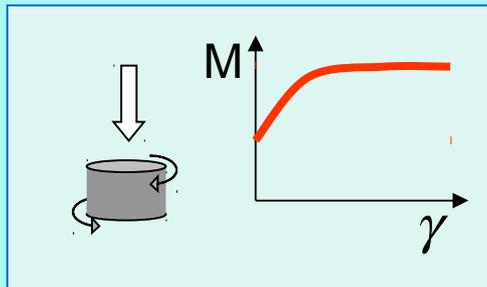
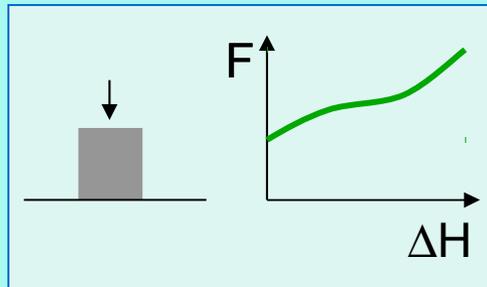


Все три подхода имеют серьезные недостатки

Первый не соответствует эксперименту при больших e_{eq}

1. Мера деформации, обеспечивающая одно и то же упрочнение при разных видах нагружения (P.Ludwik (1909))

Эксперимент показывает, что это справедливо лишь до $e_{eq} \sim 1$



Второй противоречив

2. Дифференциал эквивалентной деформации определяет приращение работы пластической деформации (R. Von Mises (1913), S.C. Shrivastava et al.(1982), J.J.Jonas et al. (2011, 2012))

$$dW = \sigma_{ik} de_{ik} = \sigma_{eq} de_{eq}, \text{ где } de_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3} de_{ij} de_{ij}} \Rightarrow e_{eq} = \int \sqrt{\frac{2}{3} de_{ij} de_{ij}} = \frac{\gamma}{\sqrt{3}}$$

Это справедливо лишь для изотропной модели Von Mises.

Для анизотропного материала:

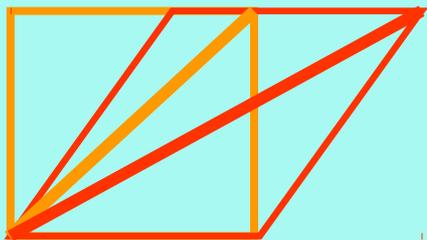
$$de_{eq} \neq \sqrt{\frac{2}{3} de_{ij} de_{ij}} \Rightarrow e_{eq} \neq \frac{\gamma}{\sqrt{3}}$$

Но авторы (J.J.Jonas et al.) сами полагают, что при больших деформациях кручения материал становится анизотропным. Именно этим они объясняют более низкое напряжение течения при кручении. Следовательно, при больших деформациях кручения, определение (2) не согласуется с соотношением

$$e_{eq} = \frac{\gamma}{\sqrt{3}}$$

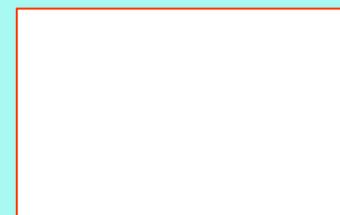
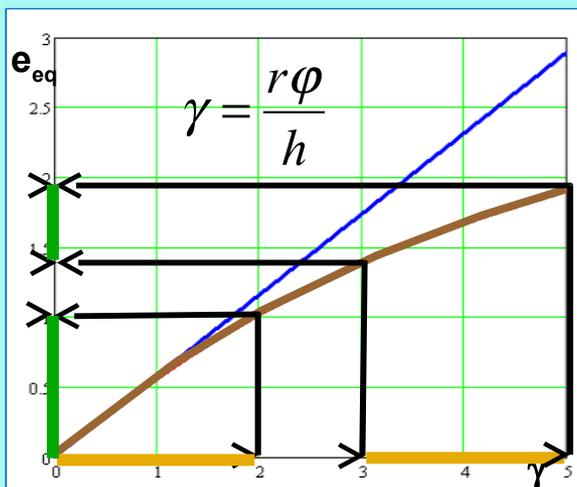
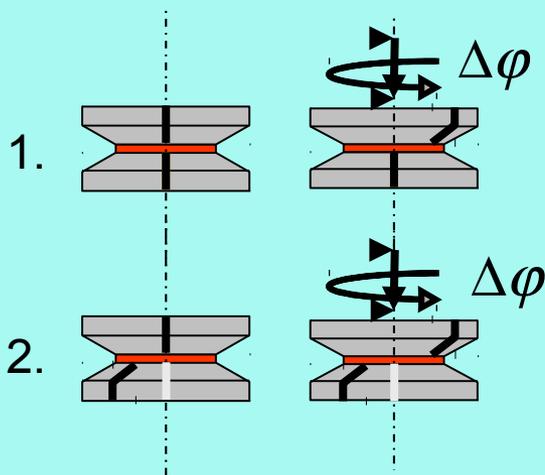
Третий не удовлетворяет требованию независимости от системы координат

3. Логарифмическая деформация для максимально удлиненного волокна (A.Nadai (1950), A.Eichinger (1955), S. Onaka (2010, 2011, 2012))



$$e_{eq} = \ln \frac{l}{l_0} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left[\left(1 + \frac{\gamma^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{\gamma}{2} \right]$$

Приращение эквивалентной деформации зависит от начала отсчета угла поворота наковален.



Что же такое «эквивалентная деформация»?

Скалярный управляющий параметр процесса деформирования

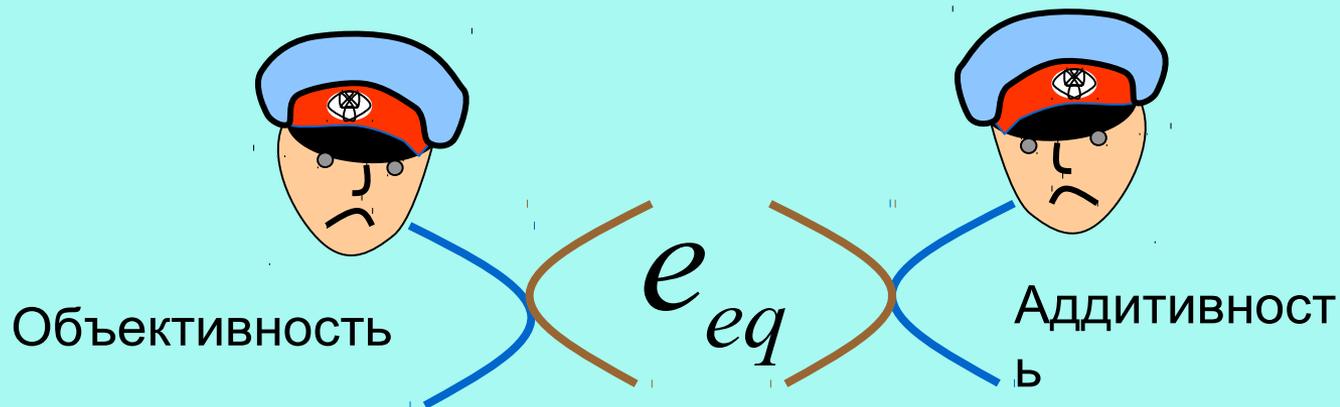
Параметр, величина которого задается извне и определяет процессы в системе.

Теория систем



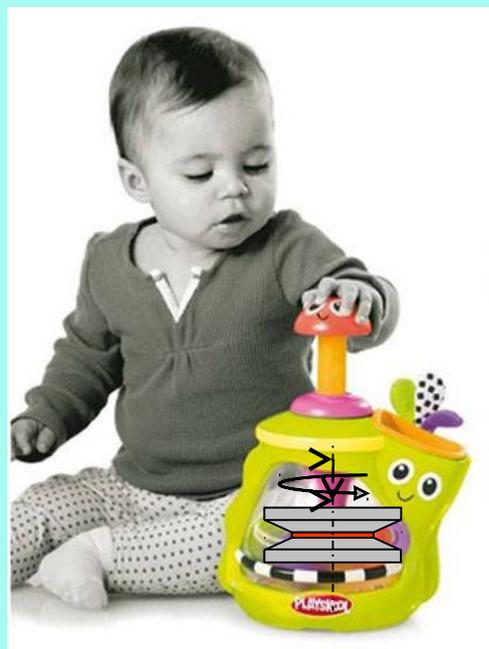
Эквивалентная деформация

Любое осмысленное определение эквивалентной деформации обязательно должно удовлетворять требованиям объективности и аддитивности.



Объективность

Эквивалентная деформация не должна зависеть от того, что кто-то игрался с наковальнями перед нами.



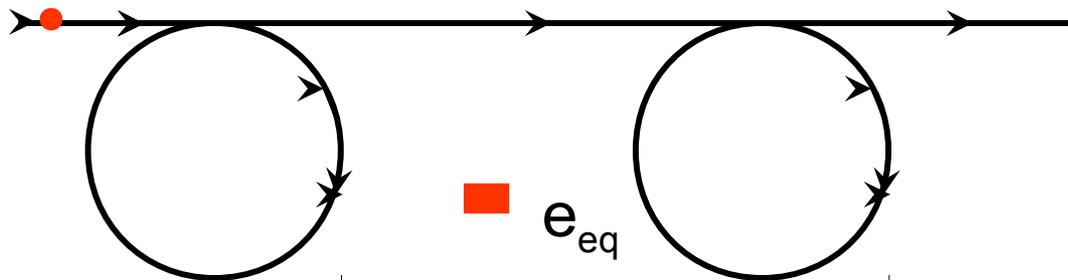
Все, что не изменяет процесс деформирования (изменение системы координат, единиц измерения, размера образца и т.д.), не должно влиять на величину эквивалентной деформации.

АДДИТИВНОСТЬ

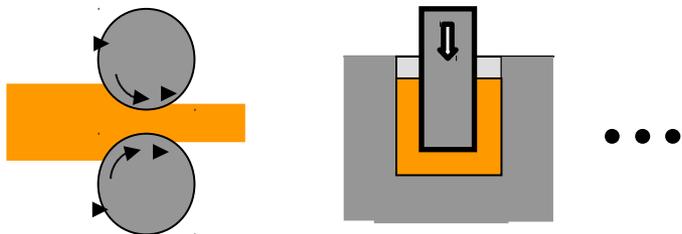
Накопление эквивалентной деформации

$$e_{eq} = \int_0^t \dot{e}_{eq} dt$$

ОМД с операциями ИПД



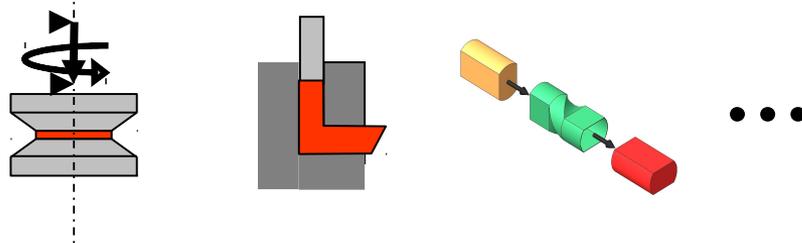
ОМД: изменение формы



СИМВОЛ



ИПД: возвращение к исходной форме или без изменения формы (простой сдвиг)



СИМВОЛ



Управляющий параметр q для кручения

1. Масштабная инвариантность

$$q = q(\gamma)$$

2. Аддитивность

$$q_2 = q_1 + q_{12}$$

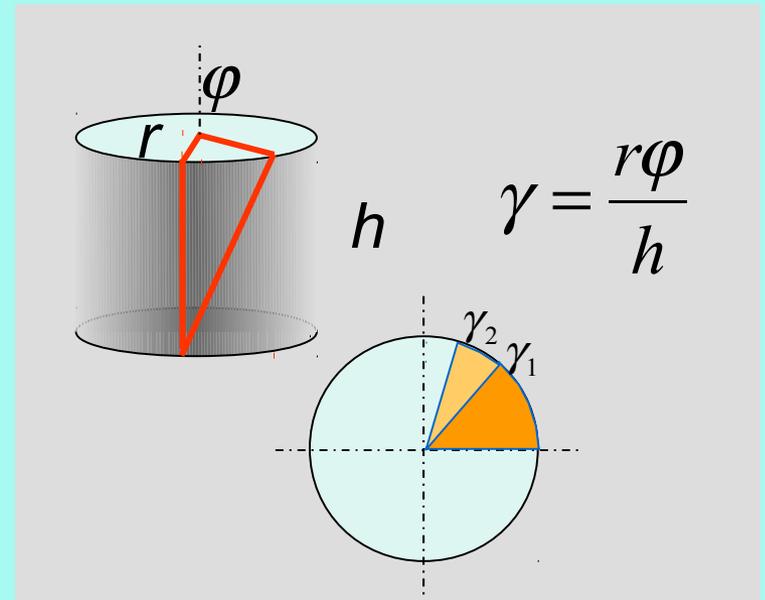
3. Инвариантность относительно начала отсчета угла поворота

$$q_{12} = q(\gamma_2 - \gamma_1)$$

$$\Rightarrow q(\gamma_1 + \Delta\gamma) = q(\gamma_1) + q(\Delta\gamma)$$

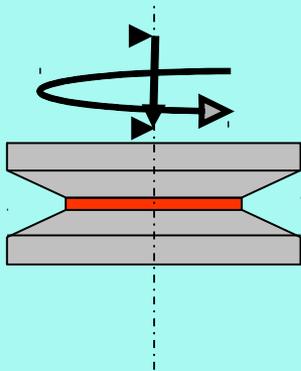
$$(\Delta\gamma = \gamma_2 - \gamma_1)$$

$$\Rightarrow q = k\gamma$$



$$q = k\gamma$$

Ограничения позволяют сделать
однозначный выбор формулы



$$e_{eq} = \frac{\gamma}{\sqrt{3}}$$

$$e_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left[\left(1 + \frac{\gamma^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{\gamma}{2} \right]$$

Управляющий параметр f для удлинения

1. Масштабная инвариантность

$$f = f(\lambda) \quad \text{где } \lambda = \frac{l}{l_0}$$

2. Аддитивность

$$f_2 = f_1 + f_{12}, \quad \text{но } f_{12} = f\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)$$

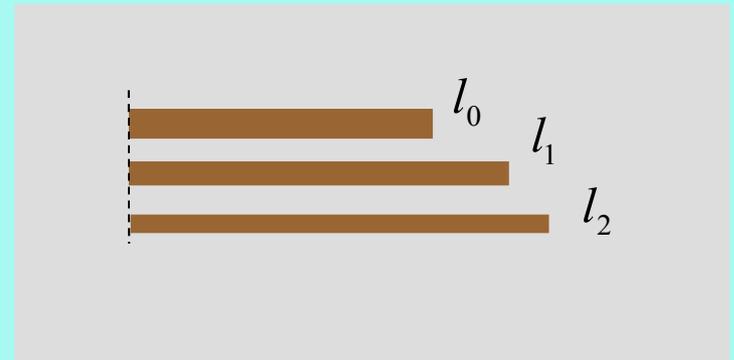
$$\Rightarrow f(\lambda_2) = f(\lambda_1) + f\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)$$

$$\Rightarrow f(\lambda_1 + \Delta\lambda) - f(\lambda_1) = f\left(1 + \frac{\Delta\lambda}{\lambda_1}\right)$$

$$\text{При } \frac{\Delta\lambda}{\lambda_1} \ll 1, \quad \Delta f(\lambda) = f(1) + f'(1) \frac{\Delta\lambda}{\lambda}.$$

$$\text{Но } f(1) = 0 \quad \Delta\lambda \rightarrow 0, \Rightarrow \frac{df}{d\lambda} = \frac{f'(1)}{\lambda}$$

$$\Rightarrow f = f'(1) \ln \lambda$$



$$f = f'(1) \ln \lambda$$

Von Mises strain удовлетворяет требованиям объективности и аддитивности

Von Mises strain:
$$e_m = \int \sqrt{\frac{2}{3} de_{ij} de_{ij}}$$

Простой сдвиг: $e_m = \frac{\gamma}{\sqrt{3}}$, одноосное удлинение: $e_m = \ln \lambda$

$$e_{eq} = e_m$$

Вопросы

Различие принципиальное, обусловлено уникальной симметрией простого сдвига.

Формула

$$e_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left[\left(1 + \frac{\gamma^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{\gamma}{2} \right]$$

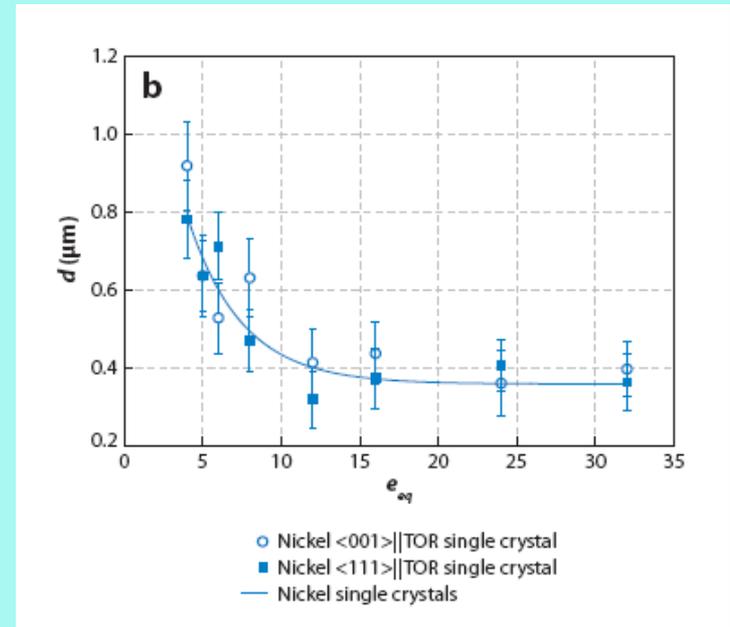
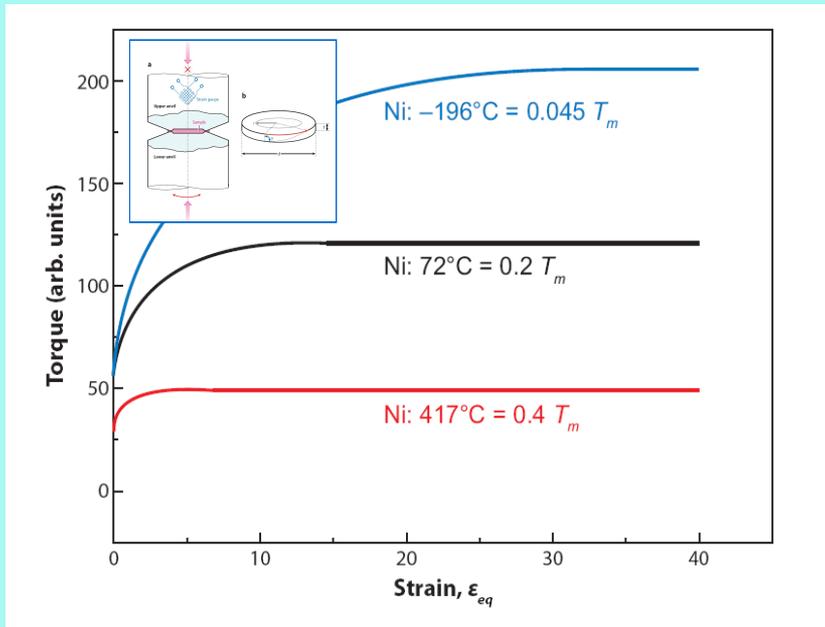
неверна, т.к. противоречит симметрии процесса. Верна формула

$$e_{eq} = \frac{\gamma}{\sqrt{3}}$$

Часть 2

Идеальная пластичность, стационарная
микроструктура и уникальная симметрия
простого сдвига

Идеальная пластичность и стационарная микроструктура при НРТ



R. Pippan et al. // Annual Review of Materials Research, Vol. 40: 319-343 (August 2010)

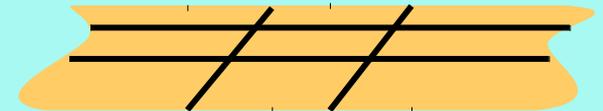
Уникальная симметрия простого сдвига

Простой сдвиг

$$x^1 = X^1 + \gamma \cdot X^2$$

$$x^2 = X^2$$

$$x^3 = X^3$$

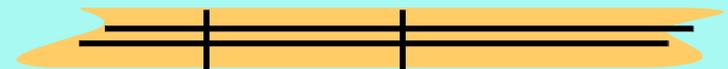


Чистый сдвиг (плоское удлинение)

$$x^1 = kX^1$$

$$x^2 = k^{-1}X^2$$

$$x^3 = X^3$$

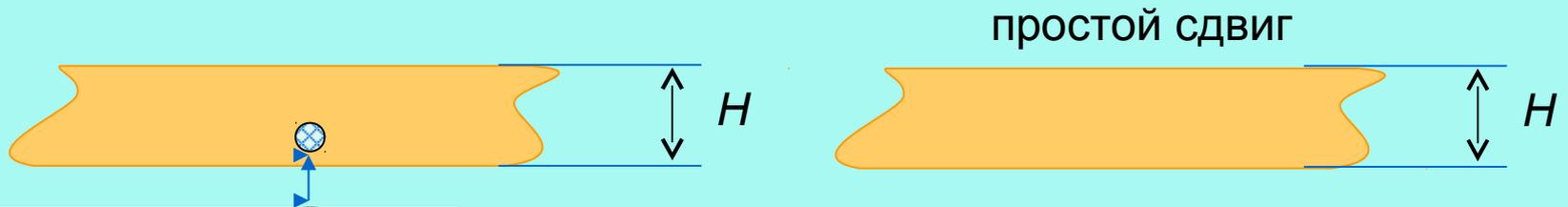


При преобразовании «простой сдвиг» инвариантом является ширина слоев, параллельных направлению сдвига.

Простой сдвиг вдоль фиксированной плоскости образует отдельную группу аффинных преобразований.

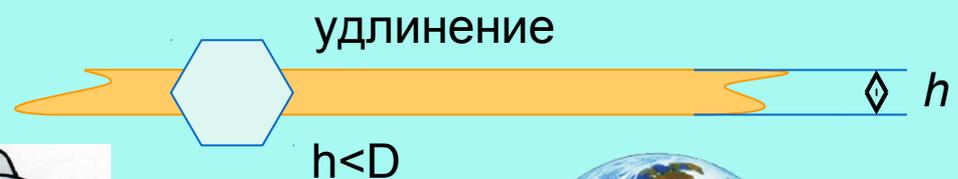
Только такая симметрия допускает, в принципе, деформацию со стационарной структурой

Мысленный эксперимент



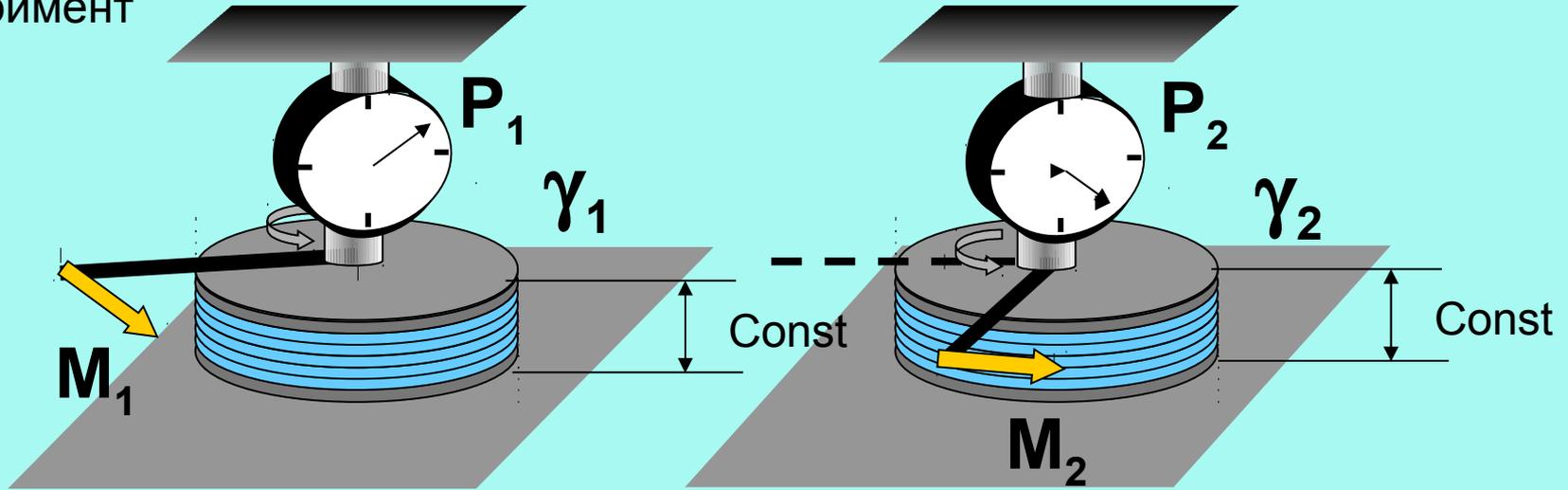
«...а другой доказывал, что внутри земного шара имеется другой шар, значительно больше наружного» .

Швейк о сумасшедшем доме



Связь идеальной пластичности с симметрией простого сдвига

Мысленный эксперимент



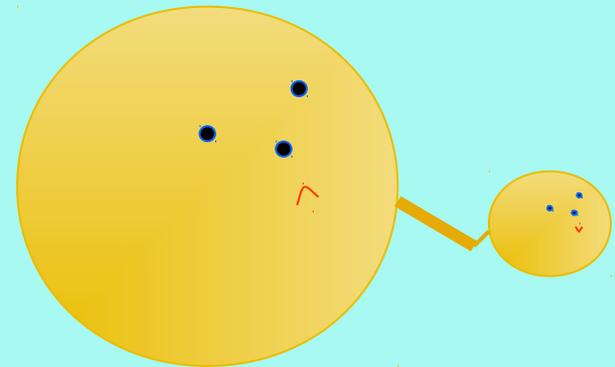
Из соображений размерности: $p(r, \gamma) = \sigma(\gamma) \cdot f(r, \gamma)$ (f - безразмерная функция)

$$\Rightarrow P(\gamma) = \int_S p(r, \gamma) dS = 2\pi\sigma(\gamma) \int_0^R f(r, \gamma) r dr. \quad \text{Из симметрии: } f(r, \gamma_1) = f(r, \gamma_2)$$

$$\Rightarrow \frac{P(\gamma_1)}{\sigma(\gamma_1)} = \frac{P(\gamma_2)}{\sigma(\gamma_2)} = const$$

Простой сдвиг под постоянным давлением возможен лишь для идеально пластического материала. Для простого сдвига упрочняемого материала необходимо увеличивать давление с ростом деформации.

Простой сдвиг геометрически предрасположен
к идеальной пластичности
и стационарной микроструктуре



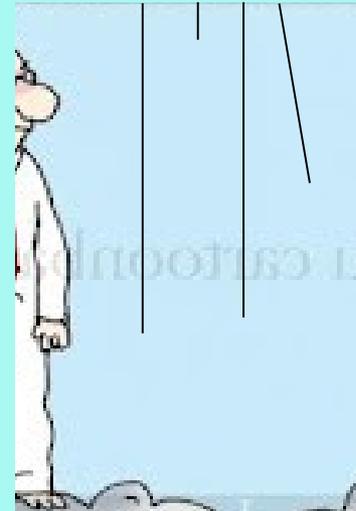
*Генетическая
предрасположенность*

Простой сдвиг принципиально не эквивалентен удлинению

Два управляющих параметра



Эквивалентная деформация

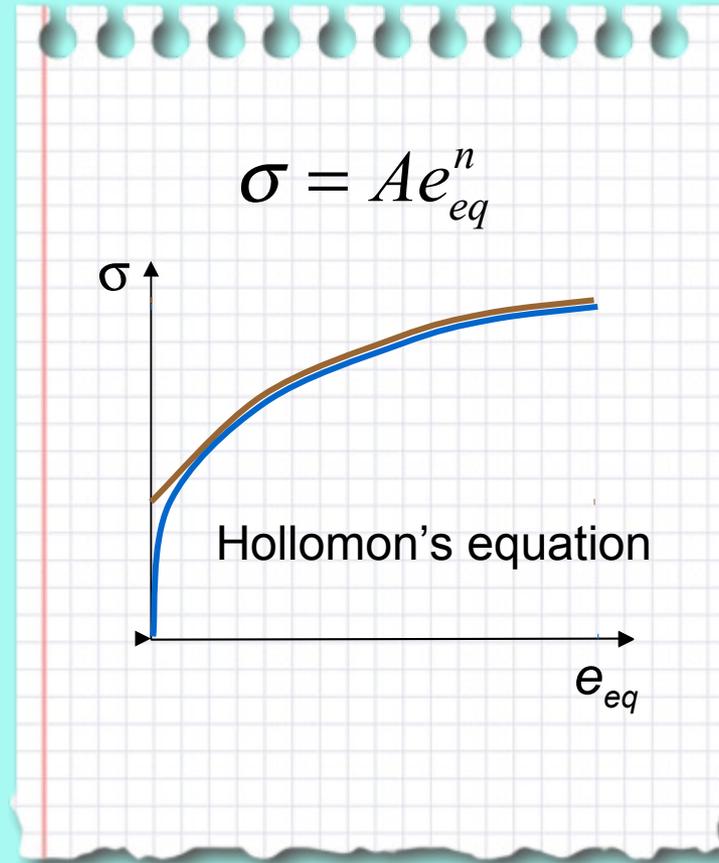


-Простой,
-Чистый,
-Простой...

Идеальная пластичность и стационарная
микроструктура при простом сдвиге связаны с
изменением механизма деформации

Утверждение, которое сейчас будет обосновано

Степенная аппроксимация кривой упрочнения



Степенные зависимости, никогда не получаются случайно.

Г.И.Баренблатт

- Самоподобие
- Неизменные механизмы



Степенной закон упрочнения и неизменный механизм деформации

Степенной закон упрочнения и самоподобие развития дефектной структуры

Эквивалентное напряжение σ_{eq} определяется микроструктурой, которая, при низких гомологических температурах и монотонном нагружении, является функцией эквивалентной деформации e_{eq} :

$$\sigma_{eq} = f(e_{eq}) \quad (1)$$

Покажем, что на стадии самоподобного развития микроструктуры, $f(e_{eq})$ представляет собой степенную функцию.

Рассмотрим три последовательных состояния материала, характеризуемые следующими параметрами: $(e_{eq1}; \sigma_{eq1})$, $(e_{eq2}; \sigma_{eq2})$, $(e_{eq3}; \sigma_{eq3})$. Так как процесс деформации самоподобен, то выделенного состояния нет, поэтому:

$$\frac{\sigma_{eq2}}{\sigma_{eq1}} = \varphi\left(\frac{e_{eq2}}{e_{eq1}}\right), \quad (2)$$

$$\frac{\sigma_{eq3}}{\sigma_{eq1}} = \varphi\left(\frac{e_{eq3}}{e_{eq1}}\right), \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_{eq3}}{\sigma_{eq2}} = \varphi\left(\frac{e_{eq3}}{e_{eq2}}\right). \quad (4)$$

Перемножая (2) на (4) и сравнивая с (3), получаем:

$$\varphi\left(\frac{e_{eq3}}{e_{eq1}}\right) = \varphi\left(\frac{e_{eq3}}{e_{eq2}}\right) \cdot \varphi\left(\frac{e_{eq2}}{e_{eq1}}\right) \quad (5)$$

Отсюда следует, что функция $\varphi(x)$ удовлетворяет следующему уравнению:

$$\varphi(x_1 \cdot x_2) = \varphi(x_1) \cdot \varphi(x_2), \quad (6)$$

Это означает, что:

$$\varphi(x) = x^n \quad (7)$$

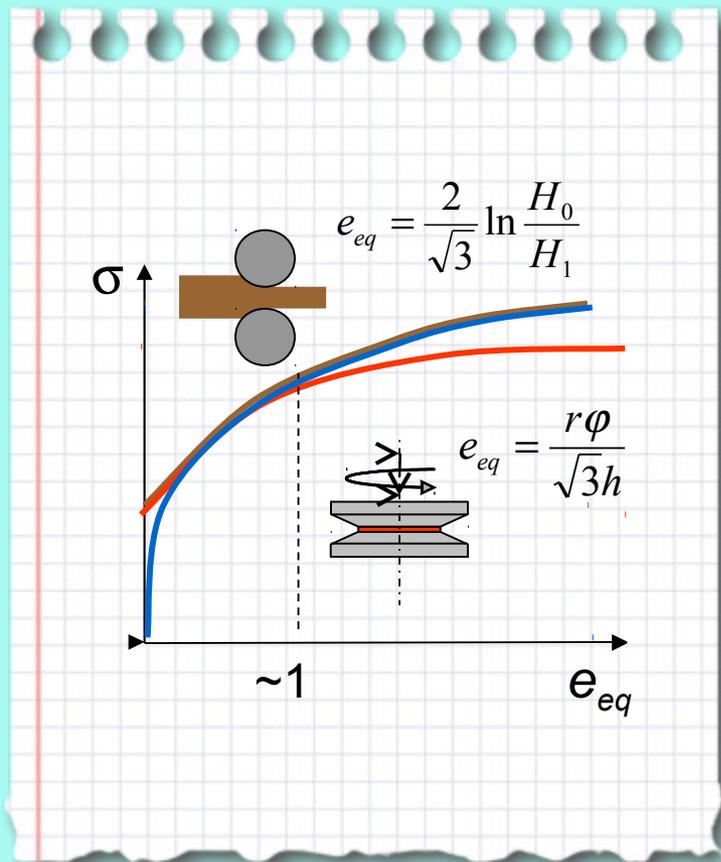
Таким образом, $\sigma_{eq} = Ae_{eq}^n$.

Взаимосвязанные явления

- Степенной закон упрочнения (промежуточная асимптотика)
- Неизменные механизмы деформации
- Самоподобие (автомодельность) множества границ зерен
- Логонормальный закон распределения зерен по размерам

Y. Beygelzimer, *Mechanics of Materials*, Vol. 37, No. 7, pp. 753--767 (2005).

При простом сдвиге, в определенный момент включается новый механизм деформации



Идеальная пластичность и стационарная
микроструктура при простом сдвиге связаны с
новым механизмом деформации

Утверждение обосновано

Часть 3

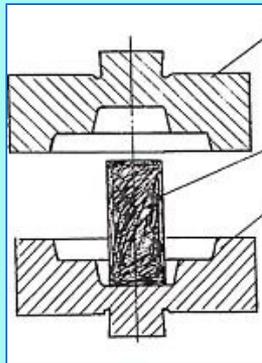
Перколяционный механизм деформации при простом сдвиге: Геометрические основания

Y. Beygelzimer, N.Lavrinenko Perfect plasticity of metals under simple shear as the result of percolation transition on grain boundaries
[arXiv:1206.5055v1](https://arxiv.org/abs/1206.5055v1) [cond-mat.mtrl-sci] ((Submitted on 22 Jun 2012)

Разные масштабные уровни деформации – разные преобразования

Макроскопический уровень: Аффинные преобразования

До деформации

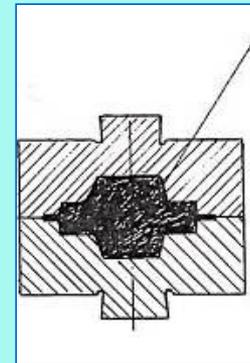


$$d\mathbf{x} = \mathbf{F}(\mathbf{X})d\mathbf{X}$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}\mathbf{U}$$

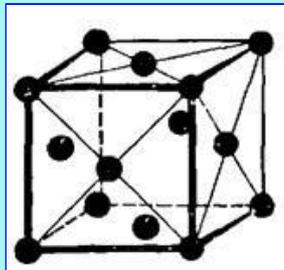
$$\mathbf{R}\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{I}$$

После деформации



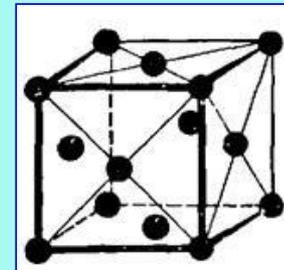
Кристаллическая решетка: Изометрические преобразования

До деформации

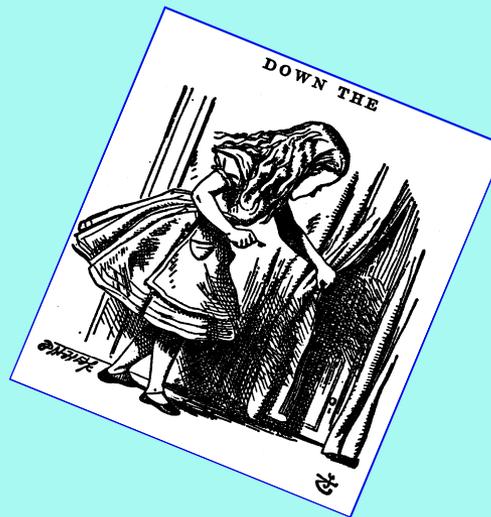
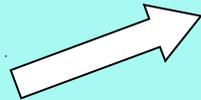


$$d\mathbf{x} = \mathbf{R}d\mathbf{X}$$

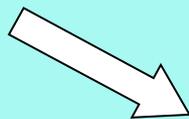
После деформации



Изометрические преобразования (движения)



Трансляция,
Поворот

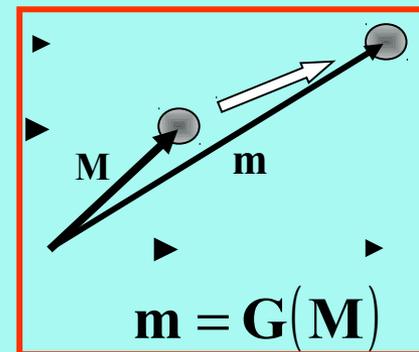
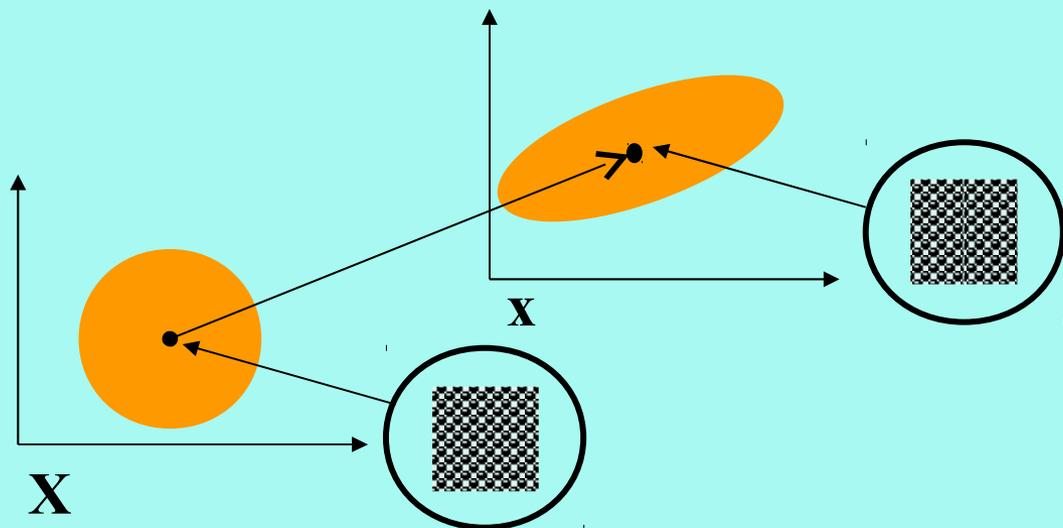


Симметрия

Аффинные преобразования



Пластическая деформация - изометрическое преобразование с особенностями



Теорема: **Непрерывное** преобразование, изометрическое в малой окрестности каждой точки, является изометрическим во всей области

А. С и г а л о в, ДАН, 1946, № 1

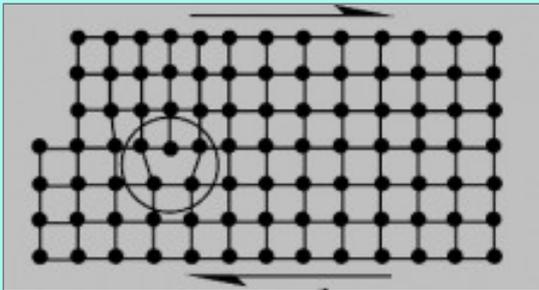
⇒ Большая деформация осуществляется **разрывами изометрии**

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}) = \frac{d\mathbf{x}}{d\mathbf{X}}$$

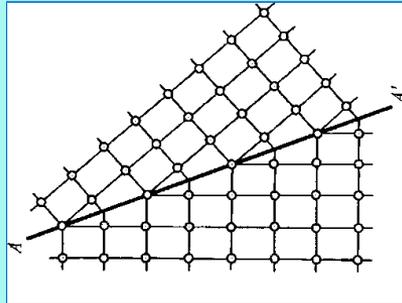


Деформации, обусловленные разрывами изометрических преобразований

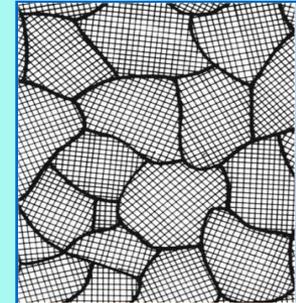
Дислокация: разрыв трансляции



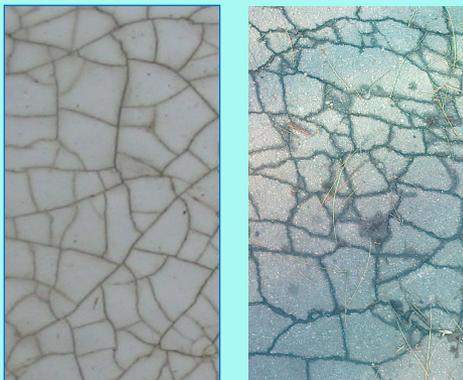
Двойникование: разрыв симметрии



Фрагментация при пласт. деформации: разрыв поворота



Плитка, асфальт: разрывы трансляции



Порошки: разрывы трансляции и поворота

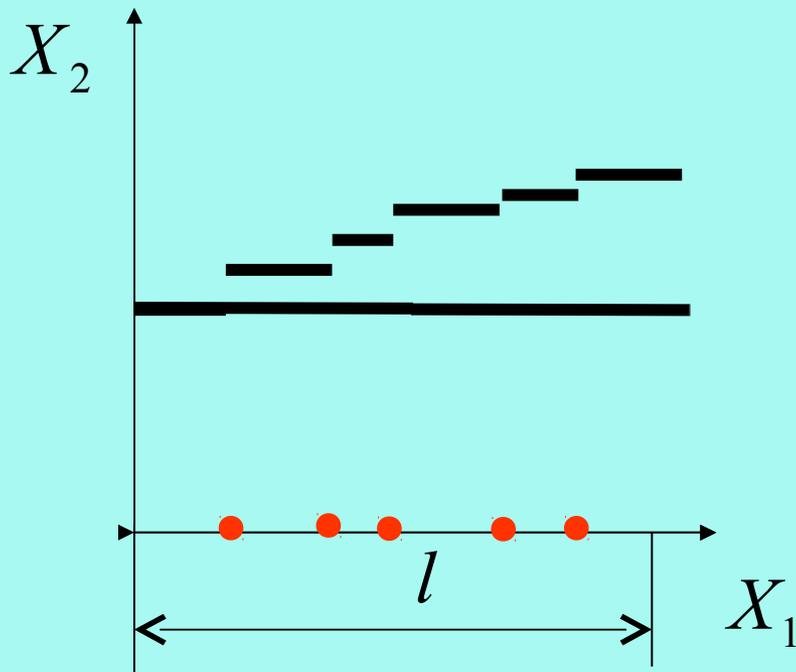


Транспортер: Разрыв поворота



Потоки разрывов на микроуровне обеспечивают производные (деформации) на макроуровне

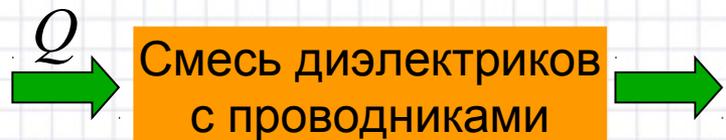
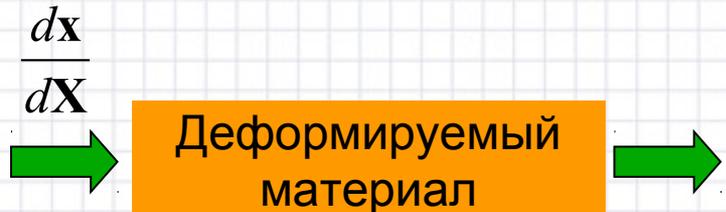
$$\frac{dx_2}{dX_1} = \frac{\sum (\Delta x_2)_i}{l} = \sum \left(\frac{\Delta x_2}{l} \right)_i = \sum \Delta q_i = Q$$



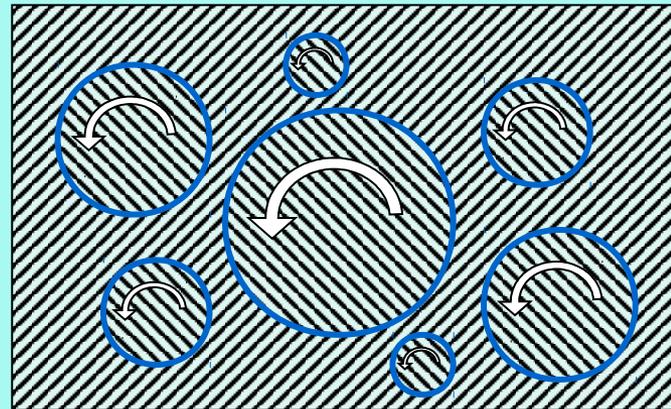
Электрическая аналогия

Градиент смещений – заряд Q

Градиент скорости – ток



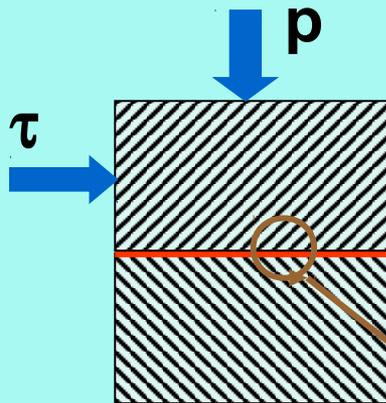
Стационарная микроструктура – стационарное множество разрывов изометрии



Высокоугловые границы деформационного происхождения – проводники разрывов изометрии

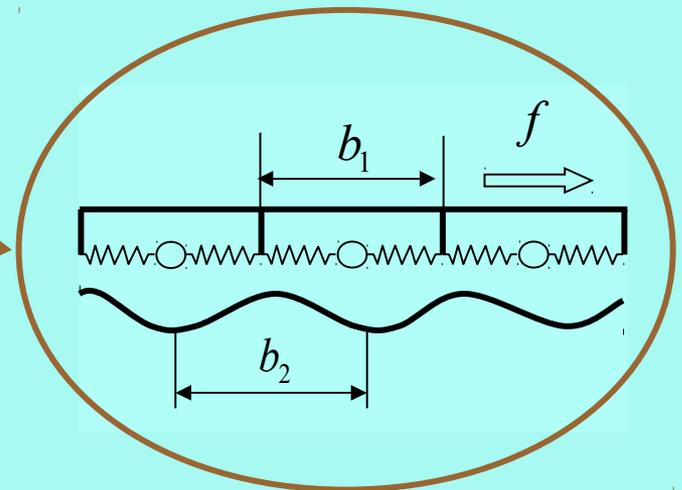
Прямолинейный участок границы, проскальзывание, Stick-Slip effect

Stick-Slip effect – временное блокирование
после проскальзывания

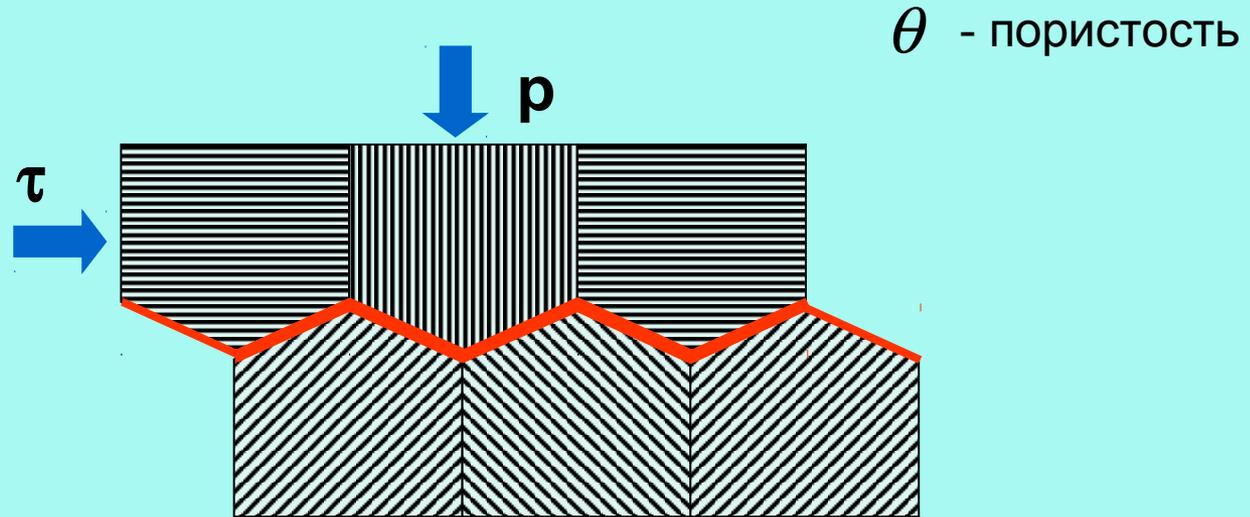


$$\tau = k$$

- Зернограничные дислокации
- Молекулярная динамика
- Frenkel-Kontorova model
- Prandtl-Tomlinson model



Искривленный участок границы: образование пустот (вакансий, пор)



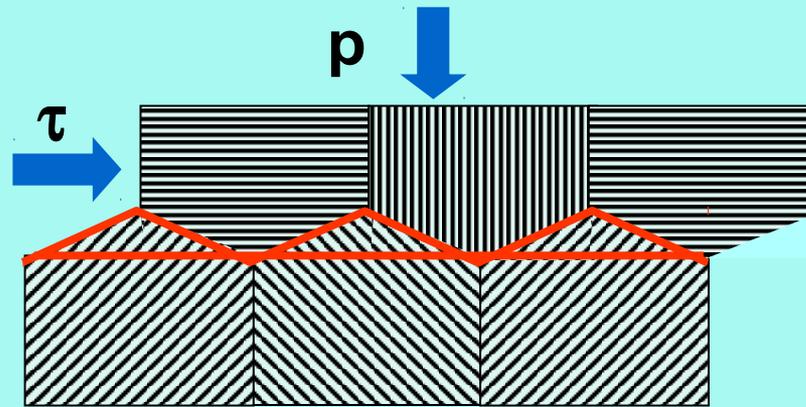
$$\tau = k + \alpha p$$

$$\frac{d\theta}{d\gamma} = \alpha - c\theta \frac{p}{k}$$

Работа давления на
увеличении объема

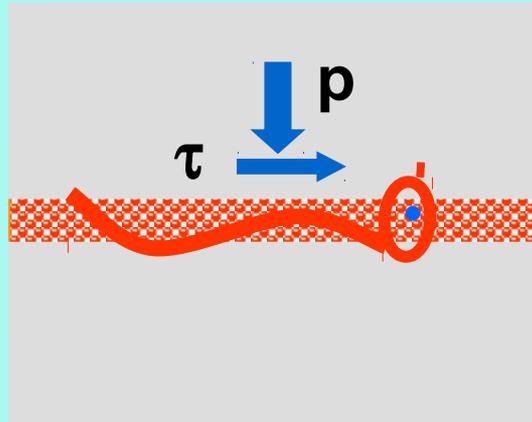
Y. Beygelzimer, Mechanics of Materials,
Vol. 37, No. 7, pp. 753--767 (2005).

Искривленный участок границы:
миграция границ зерен, диффузия



$$\tau = k\beta(Z) \quad Z = \dot{\gamma} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$$

Модель высокоугловой границы в виде «Тела Сингулярности» («Body of Singularity» (BS))



BS

$$\tau = k\beta(Z) + \alpha p \quad Z = \dot{\gamma} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$$

$$\frac{d\theta}{d\gamma} = \alpha - c\theta \frac{p}{k} \quad \text{+ Stick-Slip effect}$$

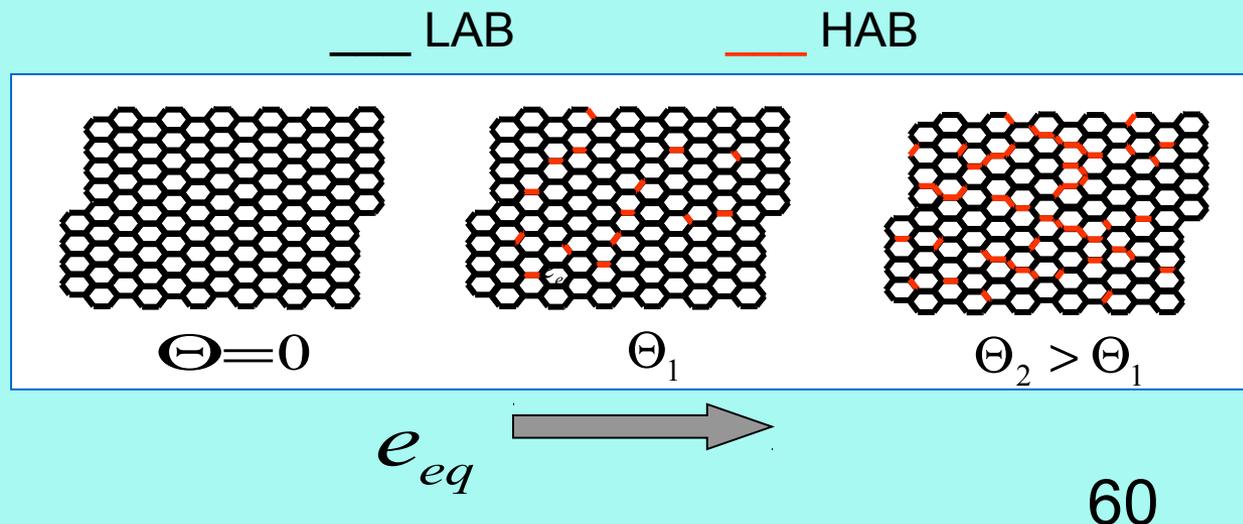
Аналог «Тела Трения» (“Body of Friction”)

Я. Бейгельзимер и др., Трение и износ, Т.14, №3 (1993)

Геометрическая модель эволюции структуры металлов при пластической деформации

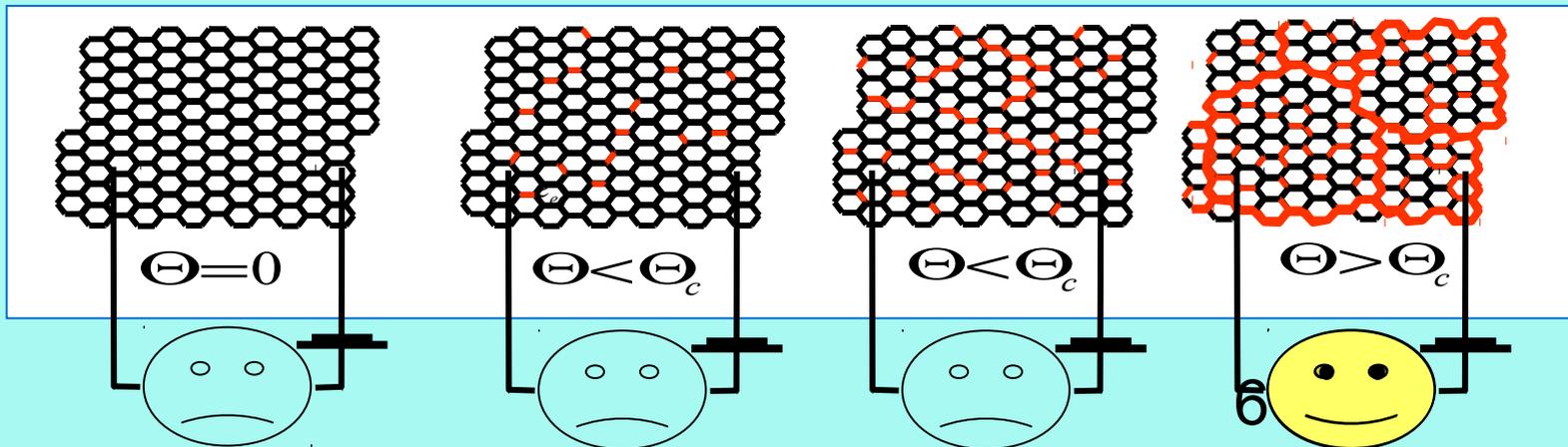
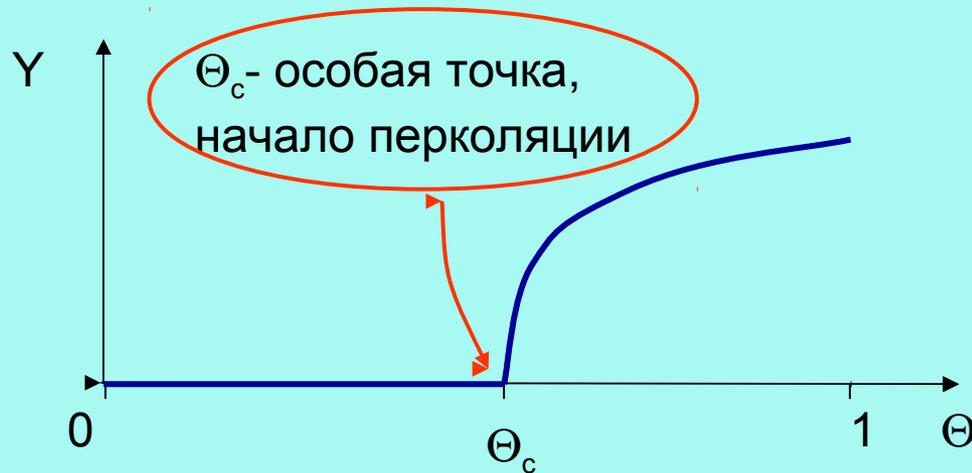
- Имеется шестиугольная* сеть из черных звеньев (___LAB), моделирующая ячеистую структуру с малоугловыми границами.
- Отдельные звенья в ней заменяются, случайным образом, на красные (___HAB), моделирующие высокоугловые границы. Относительная доля Θ красных звеньев увеличивается с ростом деформации.

*Тройные узлы (triple points) структуры \Rightarrow сеть шестиугольная

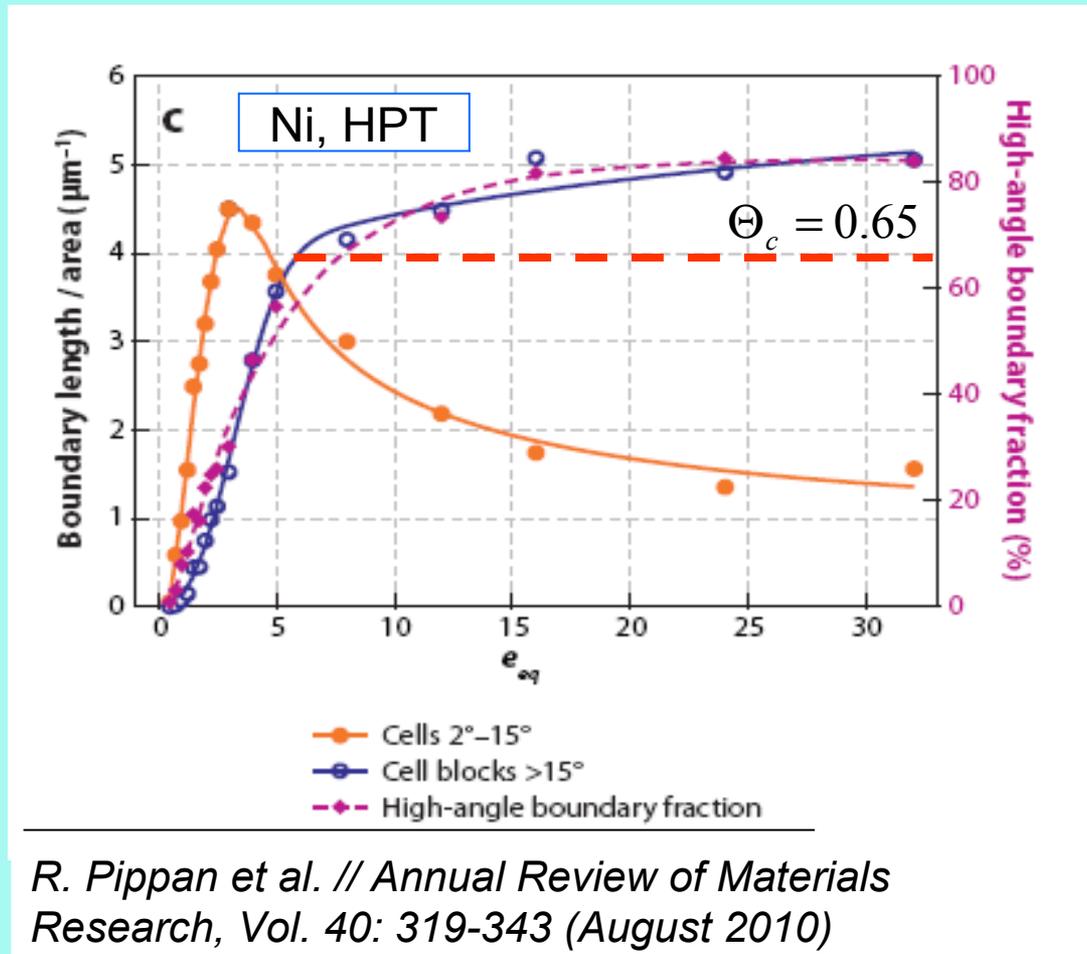


Перколяция – новое качество

Теорема: при $\Theta = \Theta_c$ красные звенья образуют перколяционный кластер, насквозь пронизывающий всю сеть. Для неограниченной шестиугольной сети $\Theta_{c0} = 0.65$.



Качественные изменения при $\Theta_c = 0.65$?



Перколяционный кластер: модель Шкловского-- Де-Жена

Проводящий «скелет» перколяционного кластера имеет вид крупноячеистой сети, с размером ячеек:

$$L = l |\Theta - \Theta_c|^{-1.33}$$

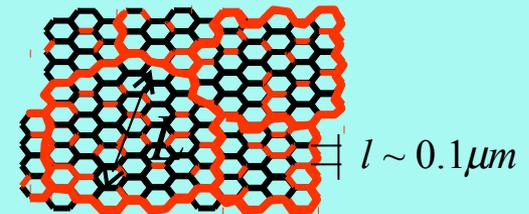
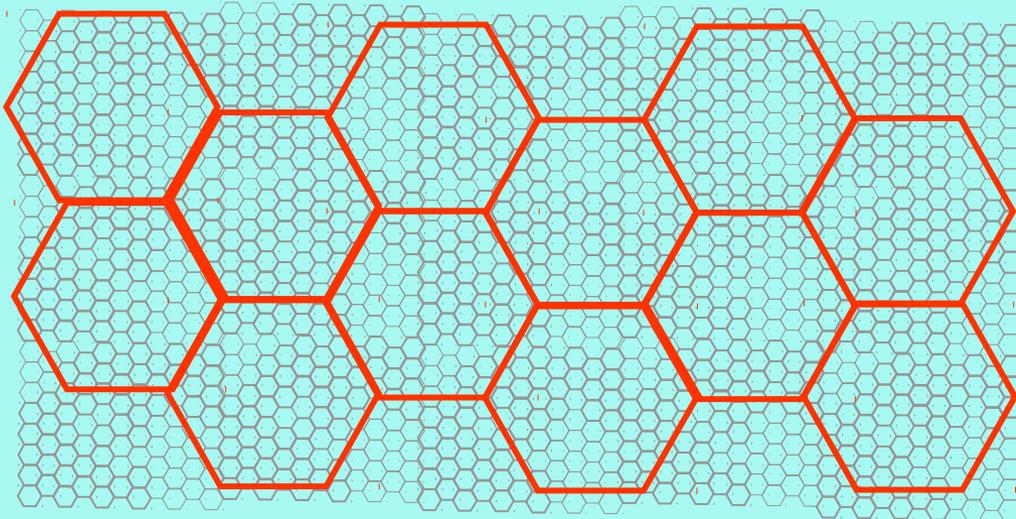


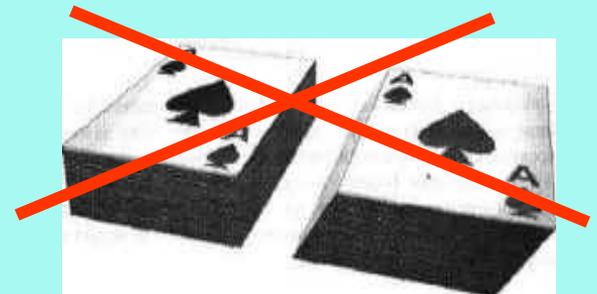
Схема проводящего «скелета» перколяционного кластера

Нет сплошных прямых проводящих путей

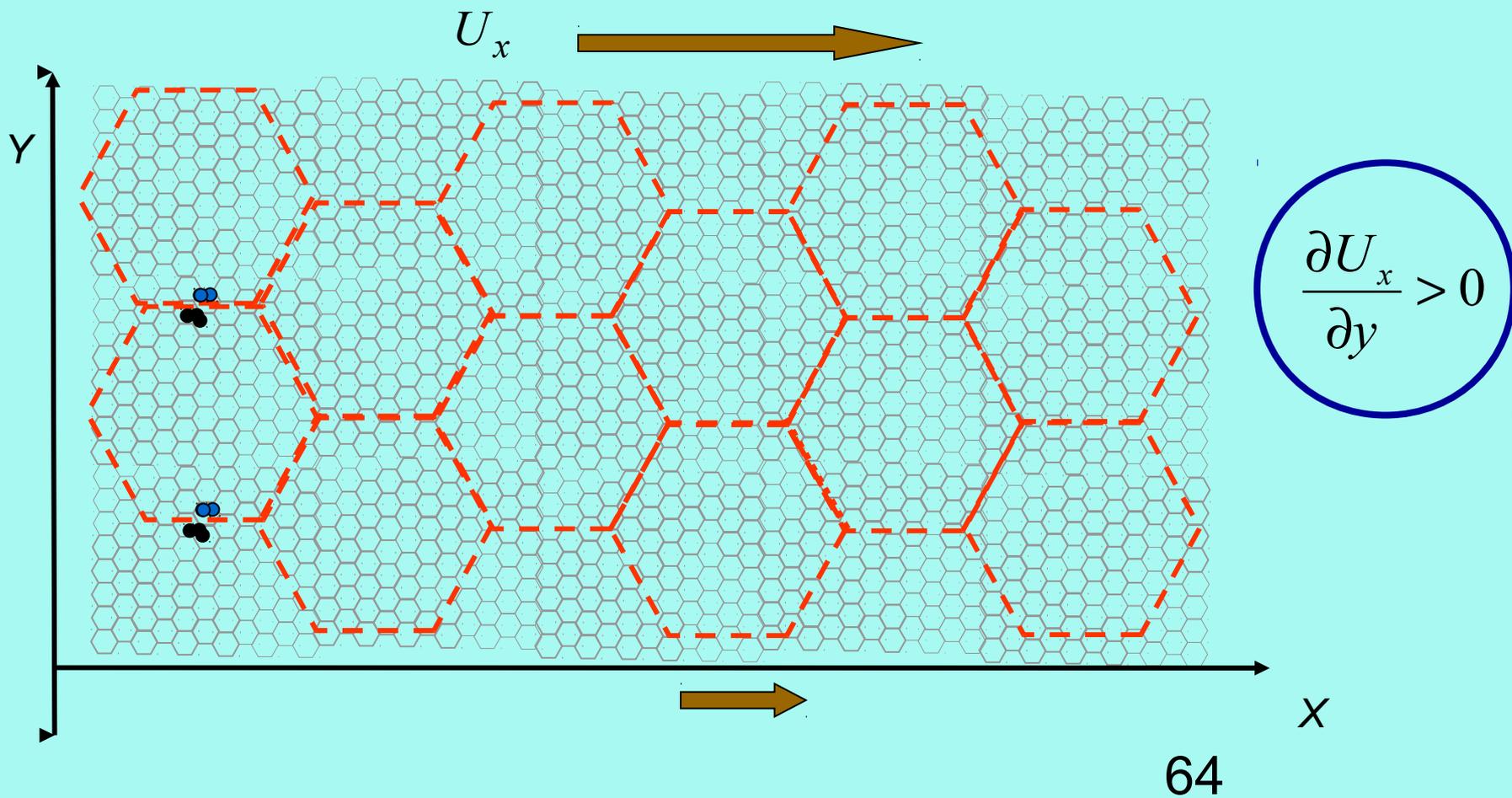


$$\Theta_c = 0.65$$

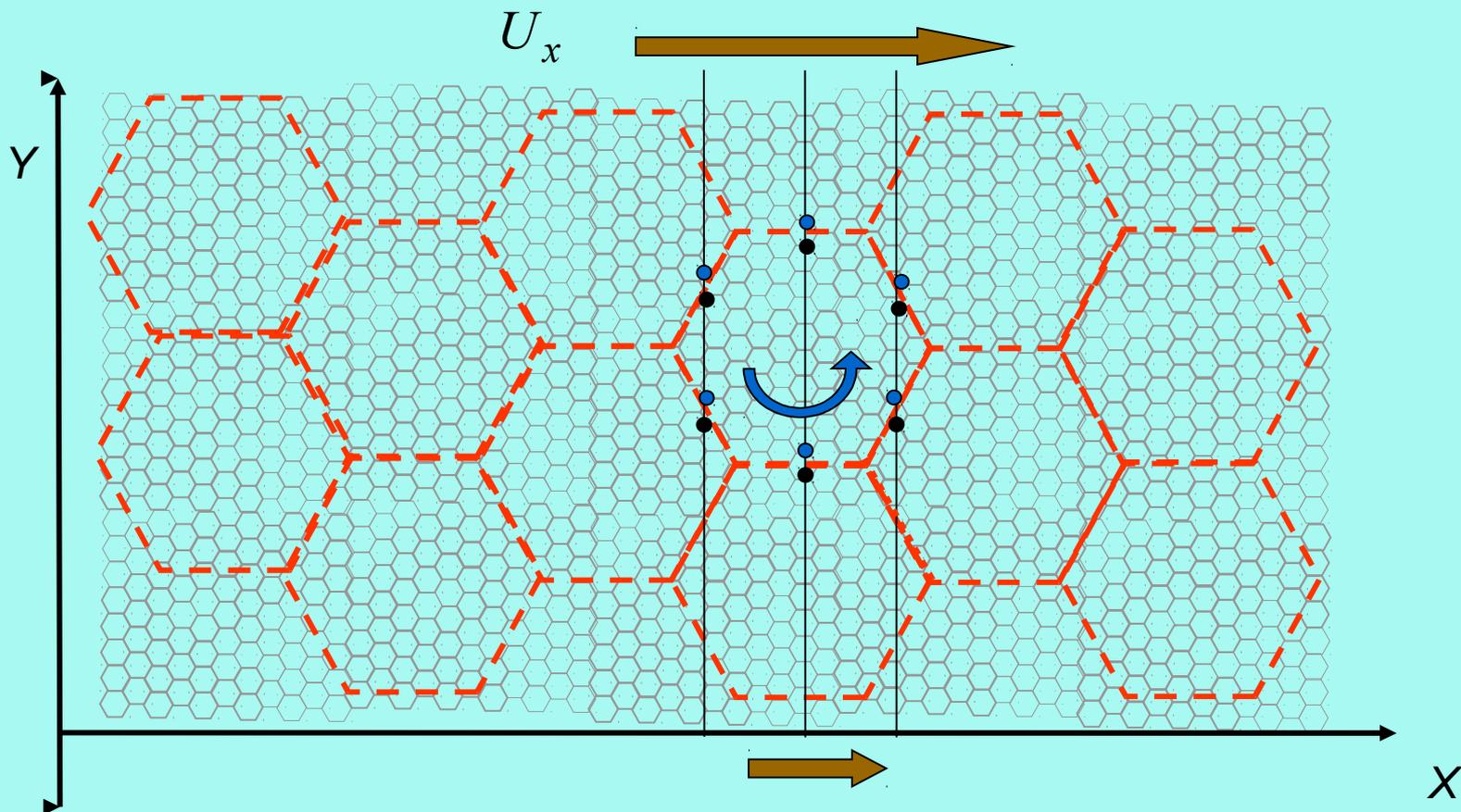
Сдвиг по типу колоды карт
требует гораздо большей
удельной доли высокоугловых
граней



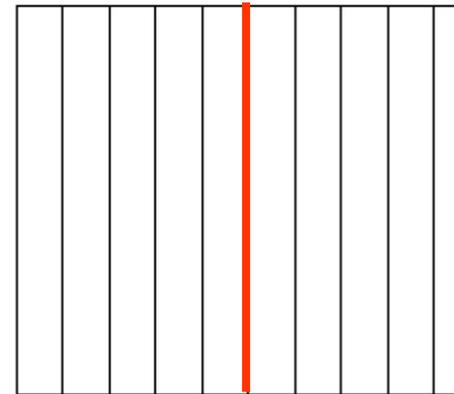
Перколяция разрывов по кластеру BS



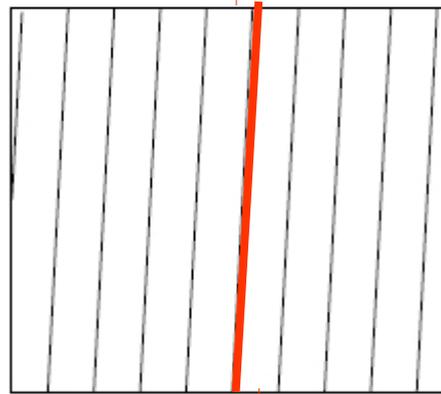
Внутренние области перколяционного кластера поворачиваются



Как это работает? Кинематика

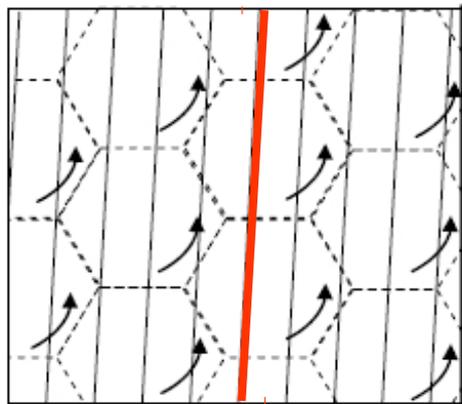


1



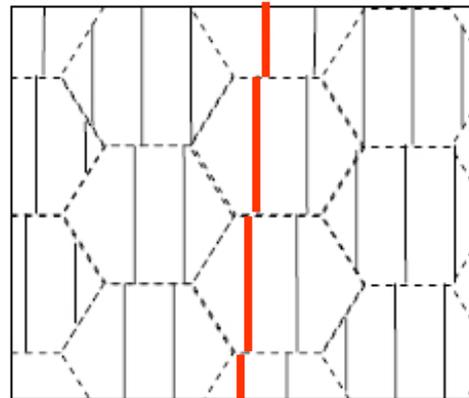
2

ΔE_i



3

ΔP_i



4

$\Delta G_i = \Delta P_i \Delta E_i$

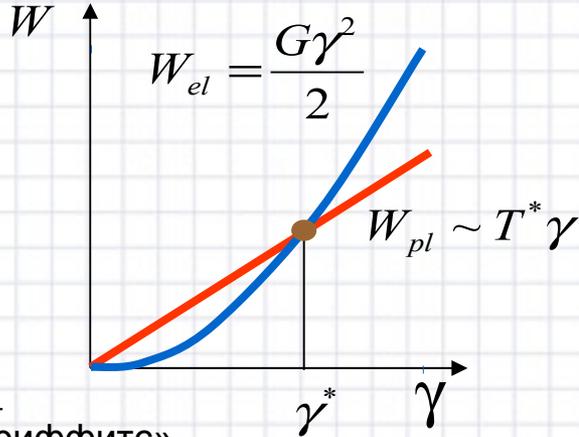
Один шаг простого сдвига:

ΔE_i - малая упругая деформация (аффинное преобразование);

ΔP_i - изометрическое преобразование с особенностями;

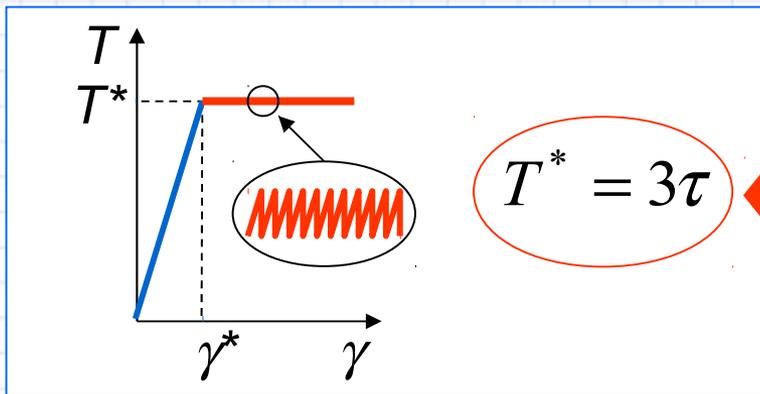
ΔG_i - суммарное преобразование;

Как это работает? Напряжения, Энергия



Анализ
«а-ля Гриффитс»

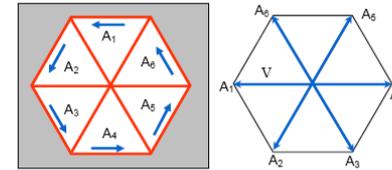
$$W_{el} = W_{pl} \text{ Ю} \quad \gamma^* \sim \frac{T^*}{G}$$



Оценка напряжения течения в режиме идеальной пластичности методом верхней границы

Разобьем 6-угольник на правильные жесткие треугольники. Построим годограф скоростей.

Анализ «а-ля Тейлор» Годограф скоростей



$V = \frac{\sqrt{3}}{2} L \dot{\gamma}$, $\dot{\gamma}$ - скорость деформации сдвига, L - сторона шестиугольника

$\dot{W}_s = 6V\tau L + \frac{6V\tau L}{2} = 9\frac{\sqrt{3}}{2} L^2 \dot{\gamma} \tau$ - мощность всех пластических сдвигов в расчете на один шестиугольник

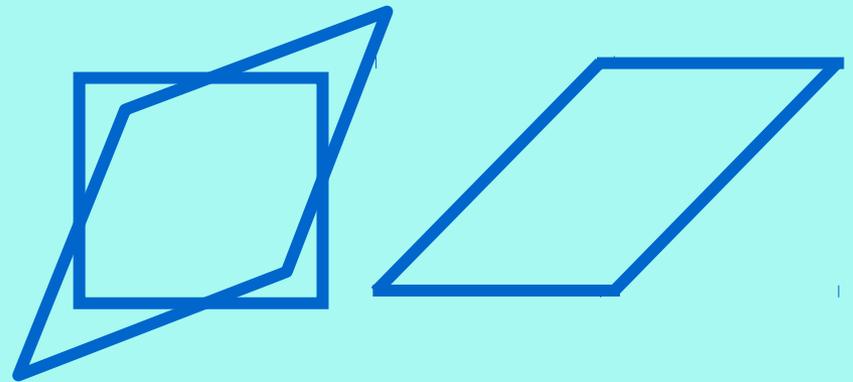
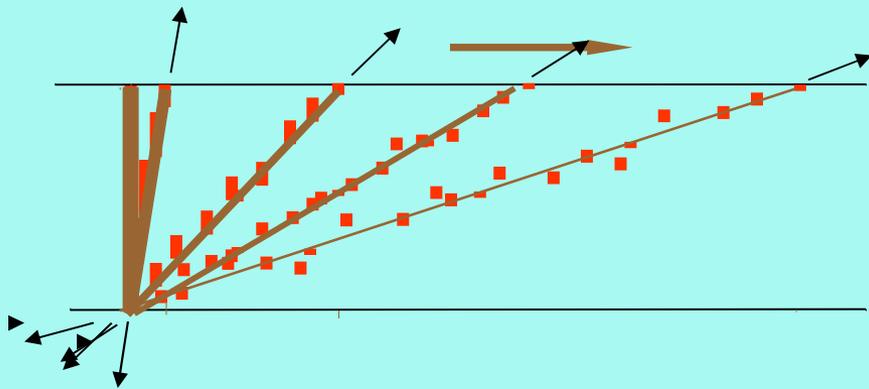
$\dot{W}_{pl} = T^* \dot{\gamma} S$ - мощность пластической деформации в расчете на один шестиугольник

T^* - напряжение сдвига, $S = \frac{3\sqrt{3}}{2} L^2$ - площадь шестиугольника

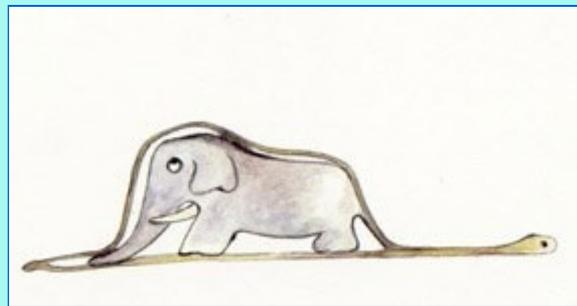
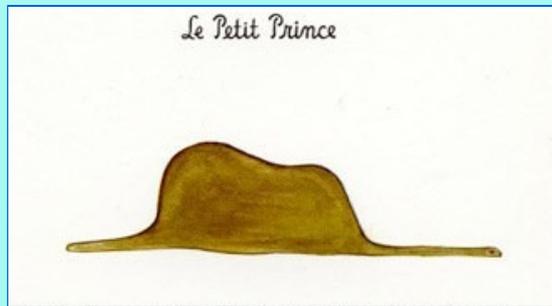
Приравнявая \dot{W}_{pl} к \dot{W}_s , получаем:

$$T^* = 3\tau \Rightarrow \sigma^* = \sqrt{3}T^* = 3\sqrt{3}\tau, \quad \sigma^* - \text{напряжение течения}$$

Странная деформация простого сдвига



Разная физика при схожей геометрии



Простой сдвиг без деформации!
Ее заменяет распределенный поворот.

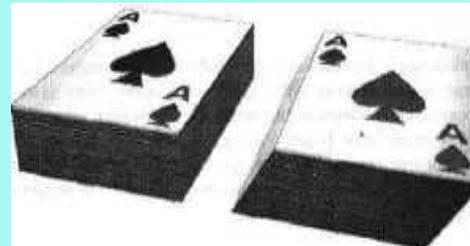
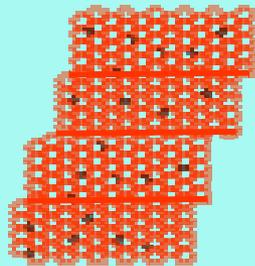


«Видала я котов без
улыбки. Но улыбку без
кота!..» *Алиса*

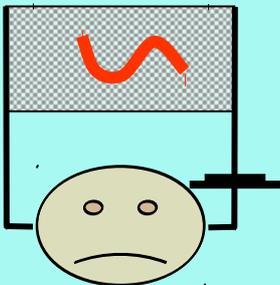
Возможные варианты развития событий после образования перколяционного кластера НАВ

Вариант 1. При $\Theta = \Theta_c$ механизм деформации не изменяется, фрагментация продолжается пока доля НАВ не вырастет практически до $\Theta \approx 1$, и не появятся прямые пути для прохождения разрывов. После этого механизм изменяется качественно, происходит сдвиг по типу колоды карт.

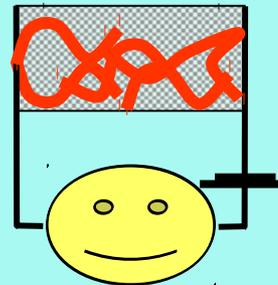
$\Theta \approx 1$



Вариант 2. При $\Theta = \Theta_c$ механизм деформации изменяется качественно (резко увеличивается роль НАВ).



Проводник окружен изолятором. Малая роль НАВ в деформации



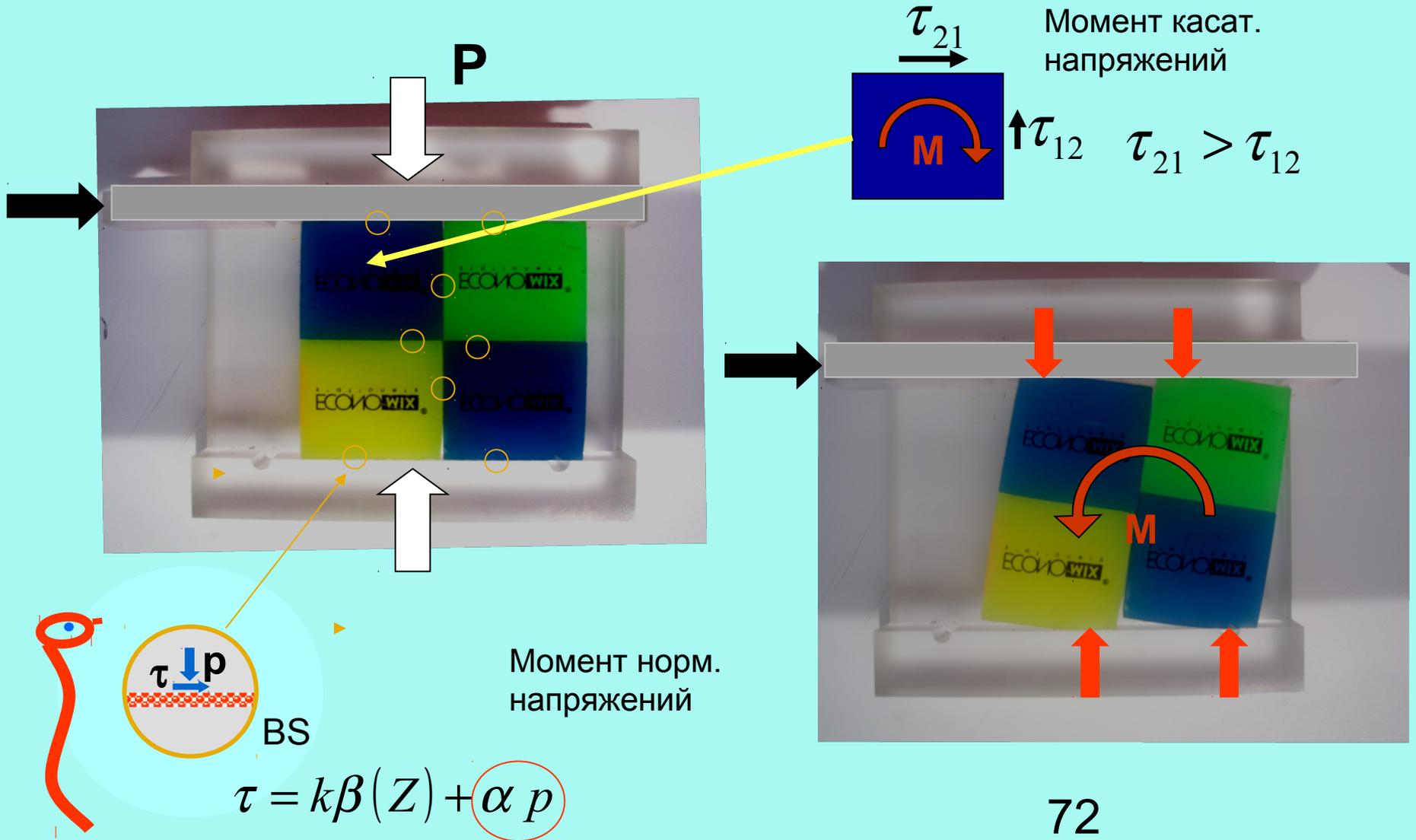
Проводник пронизывает изолятор насквозь. Определяющая роль НАВ в деформации

Какой вариант реализуется?

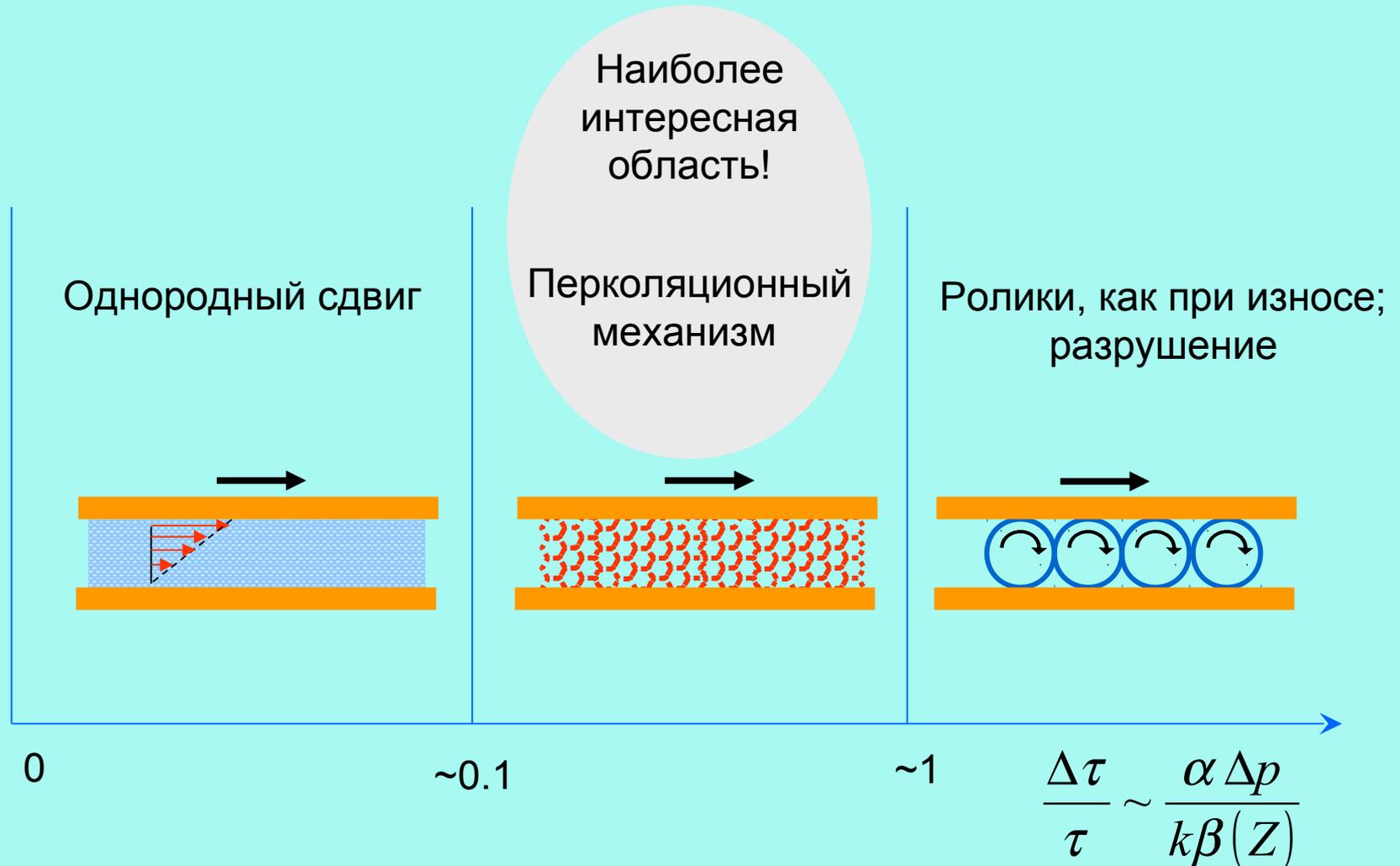


Зависит от свойств Body of Singularity.

Вариант 2 требует силовых моментов. Они связаны с давлением и образованием пустот



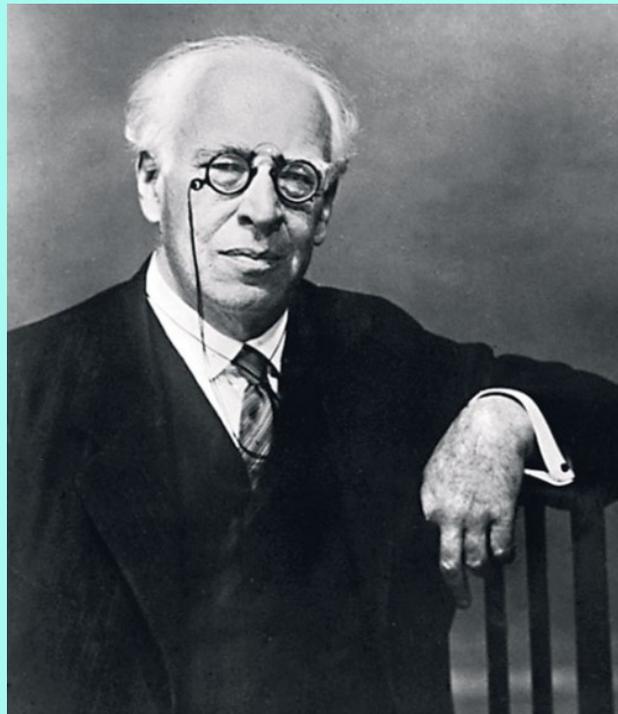
Микромеханизмы простого сдвига



Вместо Заключения

Рассуждения, картинки, простые формулы...

А где же доказательства? Где эксперимент?



Не верю!

К. Станиславский

Согласие с экспериментом не всегда доказывает теорию

Metal Science Vol. 18 December 1984

Deformation of metals to high strains using combination of torsion

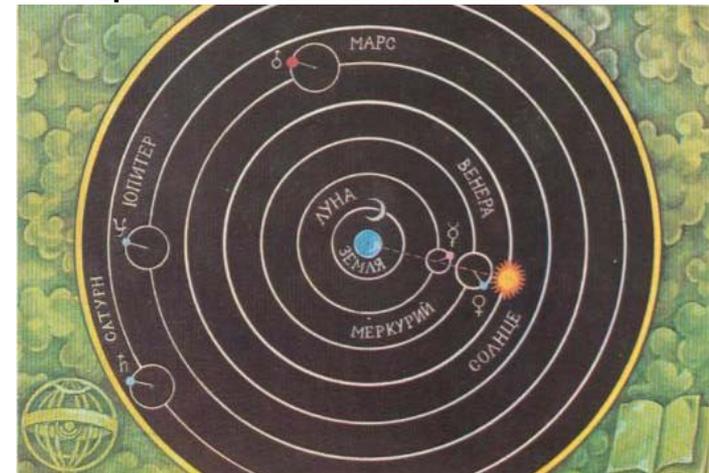
direction. On twisting through 1.5 rev ($\bar{\epsilon} = 4.3$) the structure is much more equiaxed than was the case after twisting through 1 rev. The structure is shown in Fig. 8a.

«Формула (1) очевидно не согласуется с экспериментом. Верна формула (2), которая уравнивает

прокатку с НРТ».

$$e = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} \quad (1), \quad e = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left[\left(1 + \frac{\gamma^2}{4} \right)^{1/2} + \frac{\gamma}{2} \right] \quad (2)$$

Принцип объективности



Система мира Птолемея хорошо согласовывалась с наблюдениями. Неподвижность Земли на протяжении тысячелетий казалась очевидной.

нами

Геометрия устанавливает рамки,

Симметрия

- Верна формула

$$e_{eq} = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} \quad e_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left[\left(1 + \frac{\gamma^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{\gamma}{2} \right]$$

- Различие принципиальное обусловлено разной симметрией
- Если $P = \text{const}$, то идеальная пластичность
- Идеальная пластичность - новый механизм деформации

Скейлинг

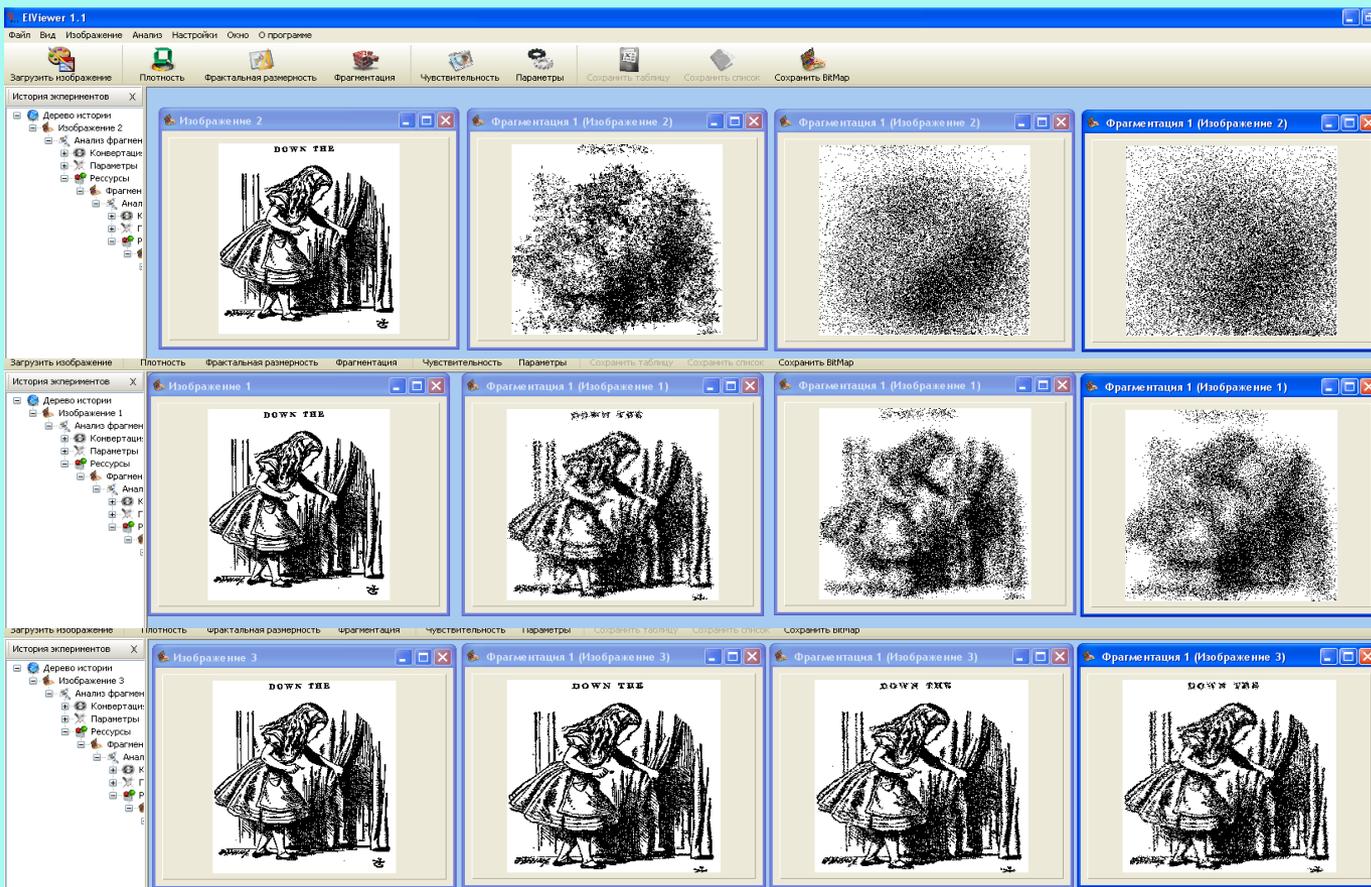
Аддитивность

Зачем платить дальше?

...обосновывает новые направления исследований и прикладных разработок

- Пластическая деформация как изометрическое преобразование с особенностями
- Свойства Body of Singularity
- Перколяционный механизм деформации
- Турбулентные движения в твердом теле
- Технологии, основанные на интенсивных движениях в твердом теле, например: гомогенизация сплавов, формирование композитов и т.д.

Моделирование турбулентных движений в твердом теле



Разработка программы EIVIEWER 1.0 и моделирование совместно со студентом 5-го курса мат.фака ДонНУ Максимом Орловым

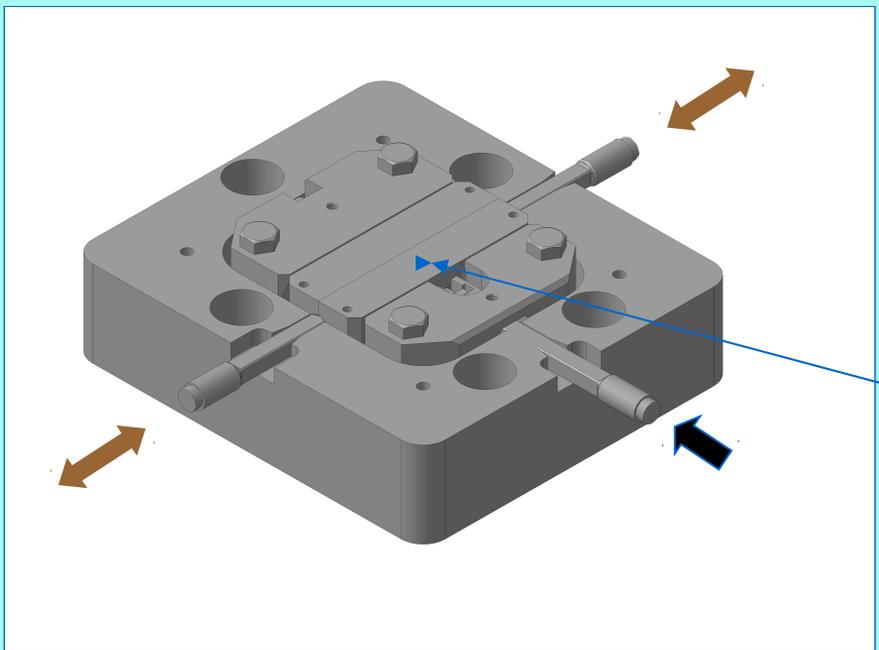
«Захватывающие» возможности винтовой экструзии

Винтовая экструзия образцов сложного состава в активных средах

Захватывание вещества на поверхности



Транспорт вещества. Твердофазные реакции



Спасибо за внимание

