

**Вихри и перемешивание
при винтовой
экструзии**

*Бейтс-Дзимар Я.Е., Верюхин В.Н., Сынков С.Г., Решетов А.В.,
Орлов Н.В., Цокорьева О.В., Сынков А.С., Кулагин Р.Ю.*

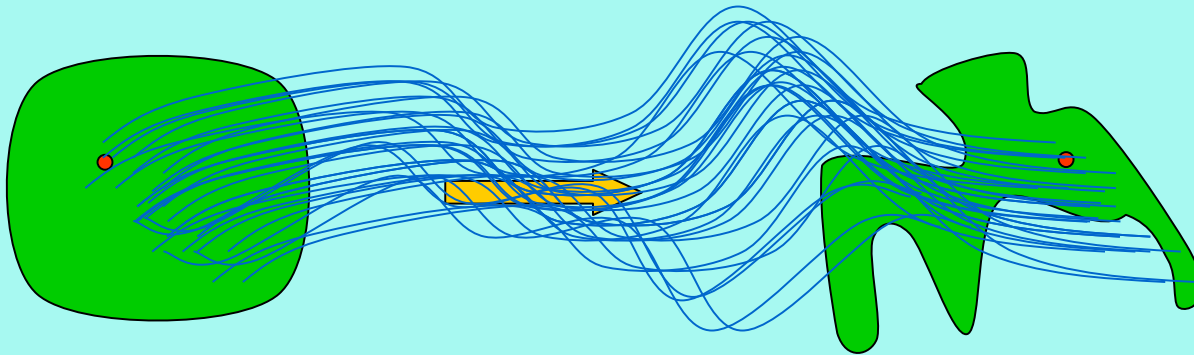
План

- Деформация – не единственная характеристика движения, определяющая структуру и свойства материалов. Вихри и перемешивание
- Поперечные движения в процессе ВЭ
- Почему и как металл деформируется на оси?
- Вихри и деформация в процессе ВЭ
- Распределение эквивалентной деформации по сечению образца
- Перемешивание в процессе ВЭ
- Заключительные замечания

Деформация – не единственная характеристика движения, определяющая структуру и свойства материалов

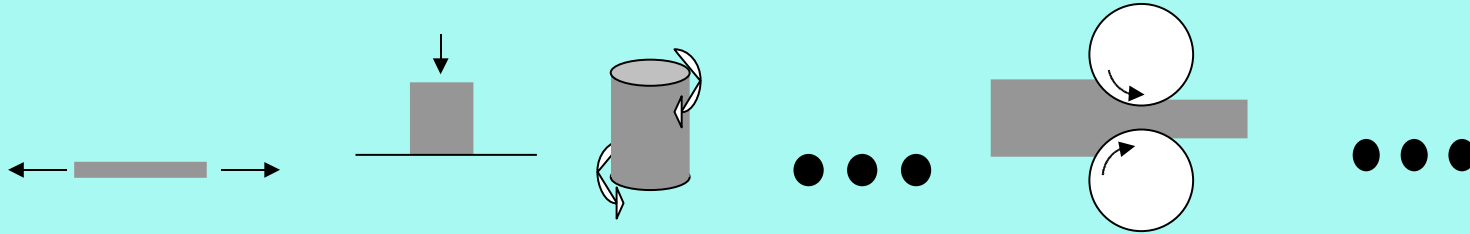
Вихри и перемешивание

Движение сплошной среды



$$R = R(t, R_0)$$

Усеченное описание движения. «Единая кривая»

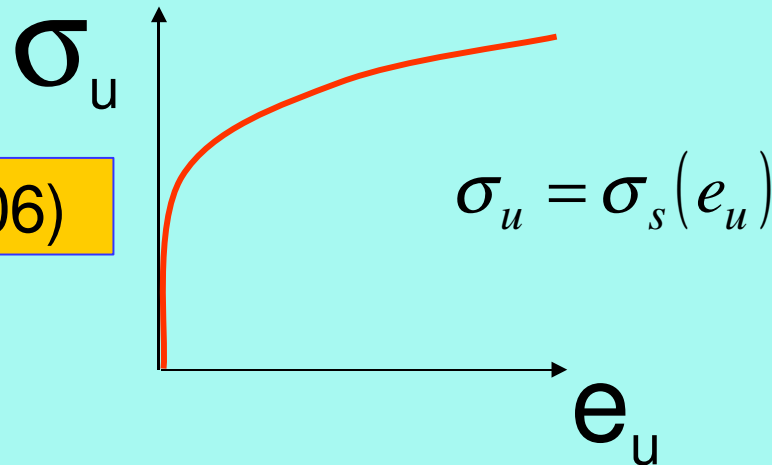


$$\sigma_u = \sqrt{\left(\left(\sigma_{ik} - \frac{1}{3} \sigma \delta_{ik} \right) \left(\sigma_{ik} - \frac{1}{3} \sigma \delta_{ik} \right) \right)}$$

$$e_u = \int_0^t \dot{e}_u dt$$

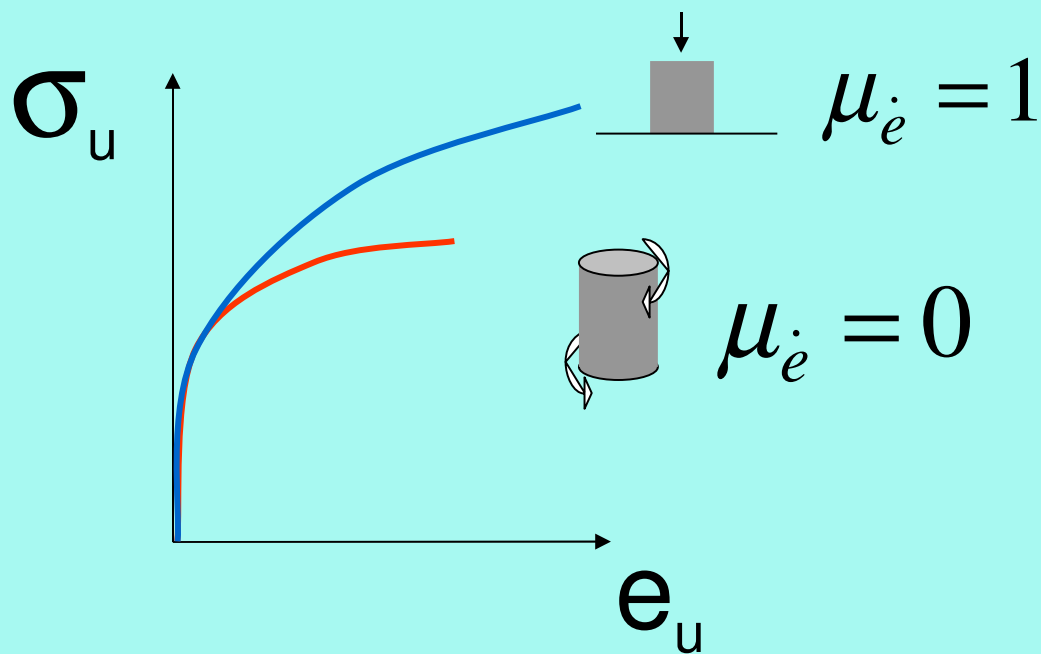
$$\dot{e}_u = \sqrt{\dot{e}_{ik} \dot{e}_{ik}}$$

P.Ludvik (1906)

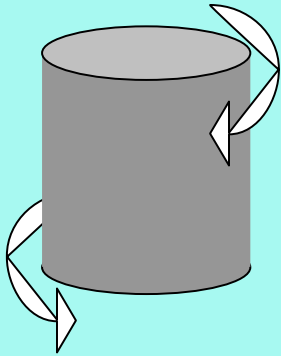


Эксперимент показывает, что структура и свойства металлов зависят от вида деформации

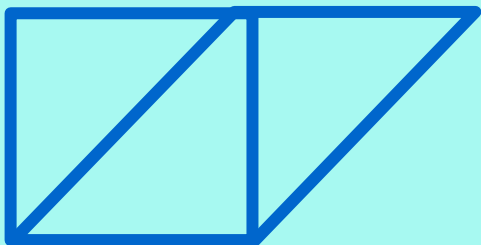
$$\mu_{\dot{e}} = 2 \frac{\dot{e}_2 - \dot{e}_3}{\dot{e}_1 - \dot{e}_3} - 1$$



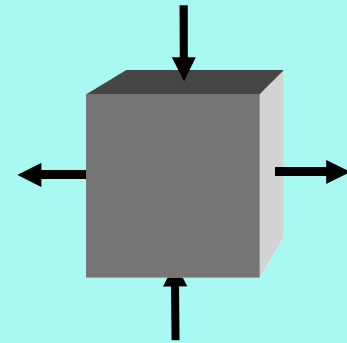
Гипотеза: структура и свойства зависят не от μ_e , а от движения плоскости сдвига относительно плоскости максимальных касательных напряжений.



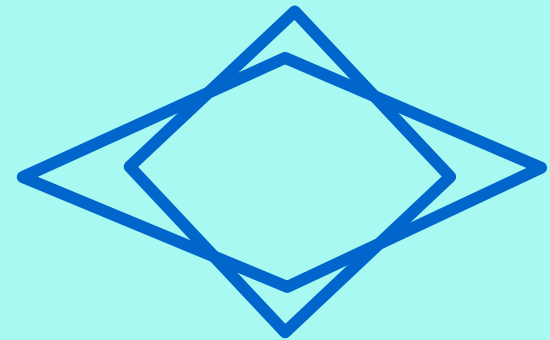
Простой сдвиг



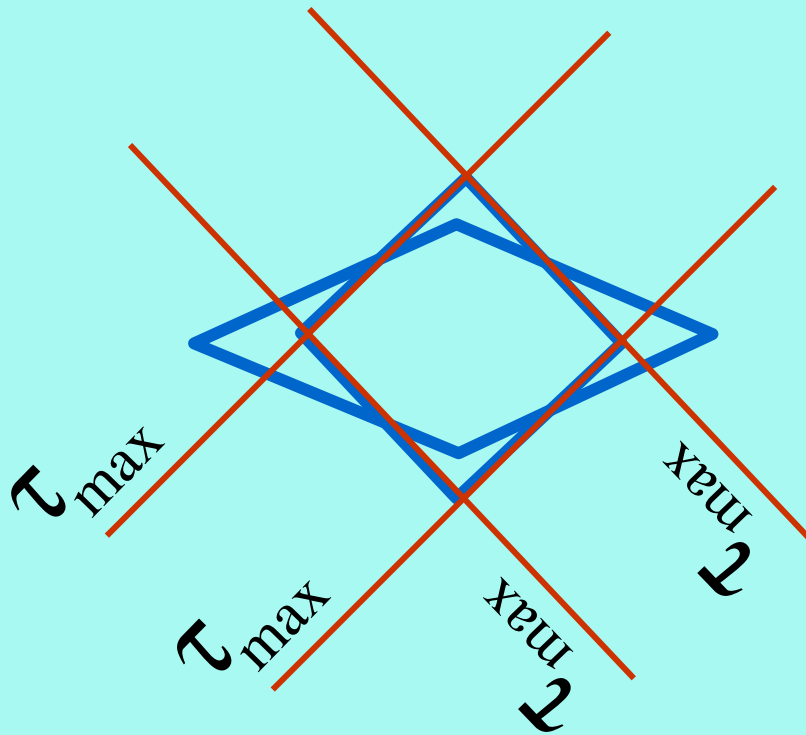
$$\mu_e = 0$$



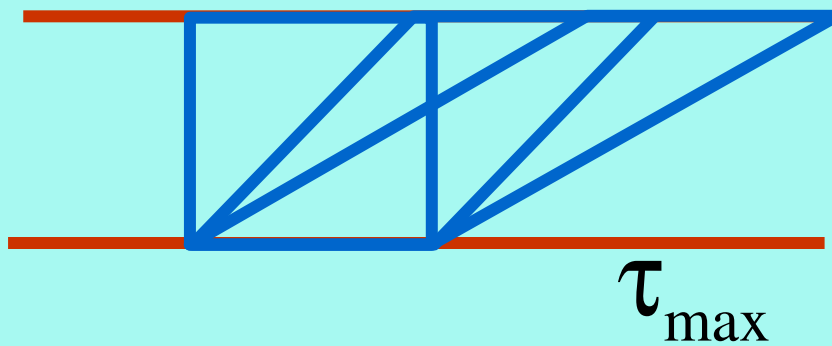
Чистый сдвиг



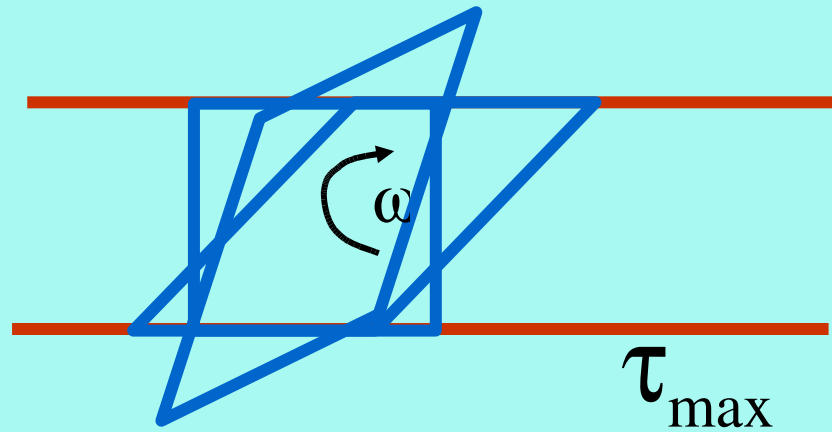
В результате чистого сдвига плоскость сдвига поворачивается относительно плоскости максимальных касательных напряжений. Поэтому чистый сдвиг каждый раз происходит по новой плоскости.



Простой сдвиг все время происходит по одной и той же плоскости



Это происходит из-за того, что при простом сдвиге есть повороты, возвращающие плоскость сдвига на место.



Повороты описываются несимметричной частью градиента скорости, которая не учитывается в теории пластического течения

Градиент скорости

$$\frac{\partial V_i}{\partial x_k} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_k} + \frac{\partial V_k}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_k} - \frac{\partial V_k}{\partial x_i} \right) = \dot{e}_{ik} + \omega_{ik}$$

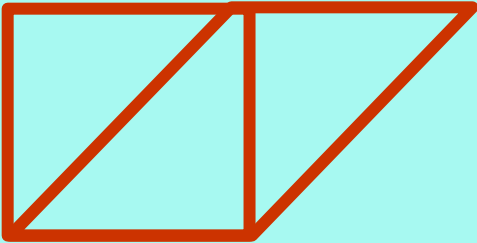
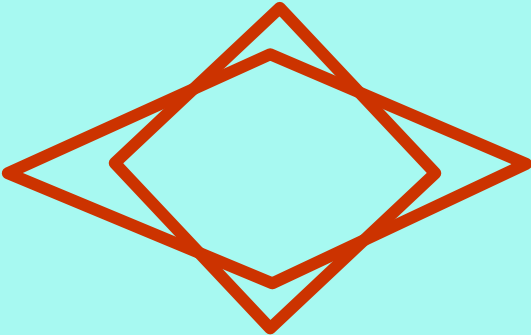
\dot{e}_{ik} - Тензор скорости деформации

ω_{ik} - Тензор скорости поворота

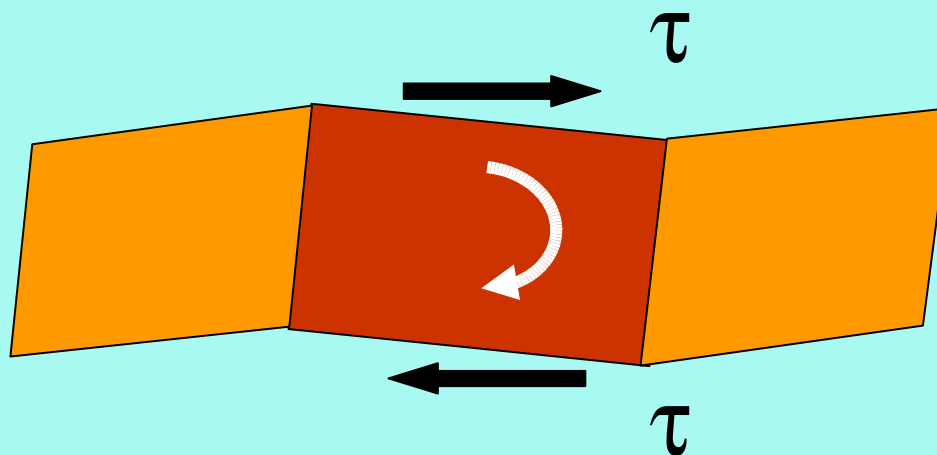
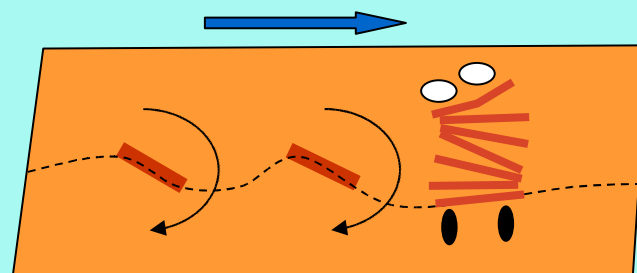
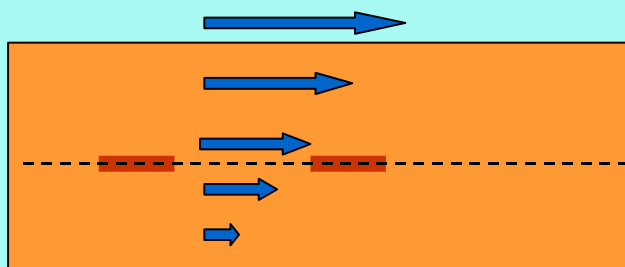
$(rot V)_j = \varepsilon_{jki} \omega_{ik}$ - Вихрь (ротатор) скорости

$\vec{\Omega} = \frac{1}{2} rot \vec{V}$ - Скорость поворота

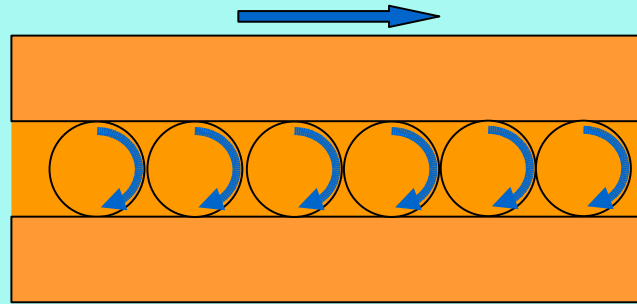
Простой и чистый сдвиги отличаются вихрем

	Простой сдвиг	Чистый сдвиг
Схема деформации и		
Скорость деформации и сдвига	$\dot{\gamma}$	$\dot{\gamma}$
μ_e	0	0
Вихрь	$-\dot{\gamma}$	0

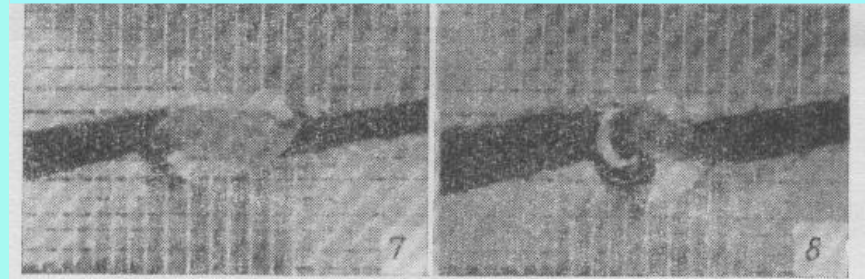
Неоднородности приводят к складкам плоскости простого сдвига...



и ее распаду на микровихри

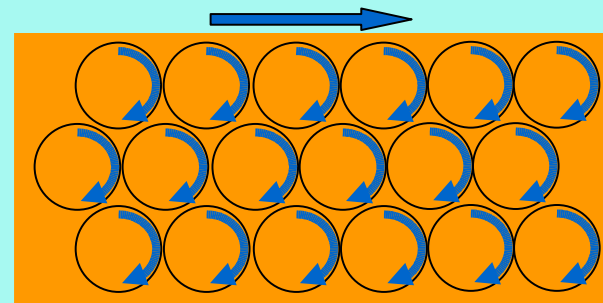
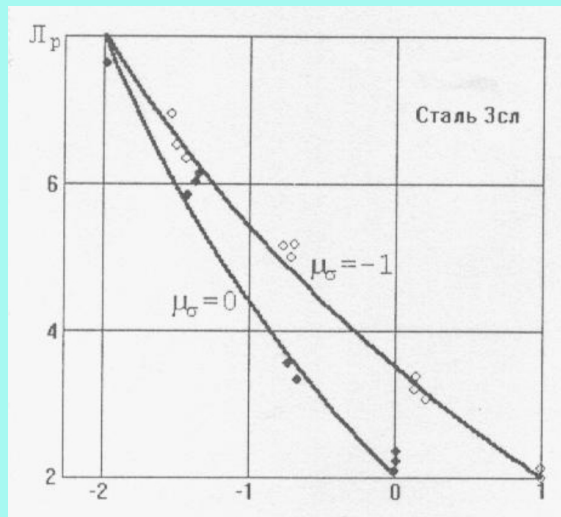


Этот механизм вызывает износ поверхностей при пластическом трении



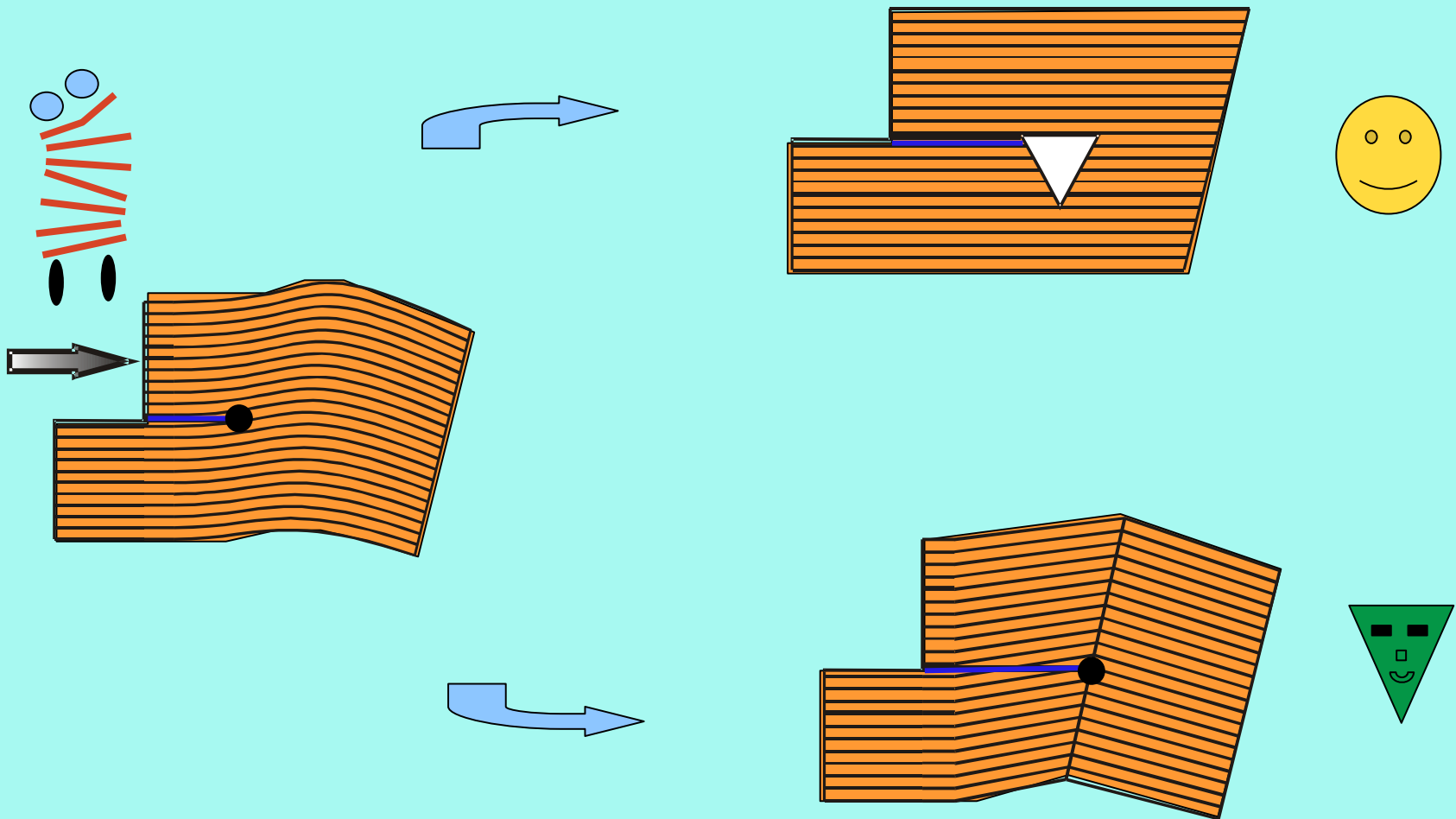
Фотография из книги Ф.П.Боуден, Д. Тейбор Трение и смазка твердых тел. М: Машиностроение, 1968.- 543 с.

Возможно именно этот механизм обуславливает малую пластичность металлов при простом сдвиге и высокую интенсивность фрагментации при простом сдвиге под высоким давлением

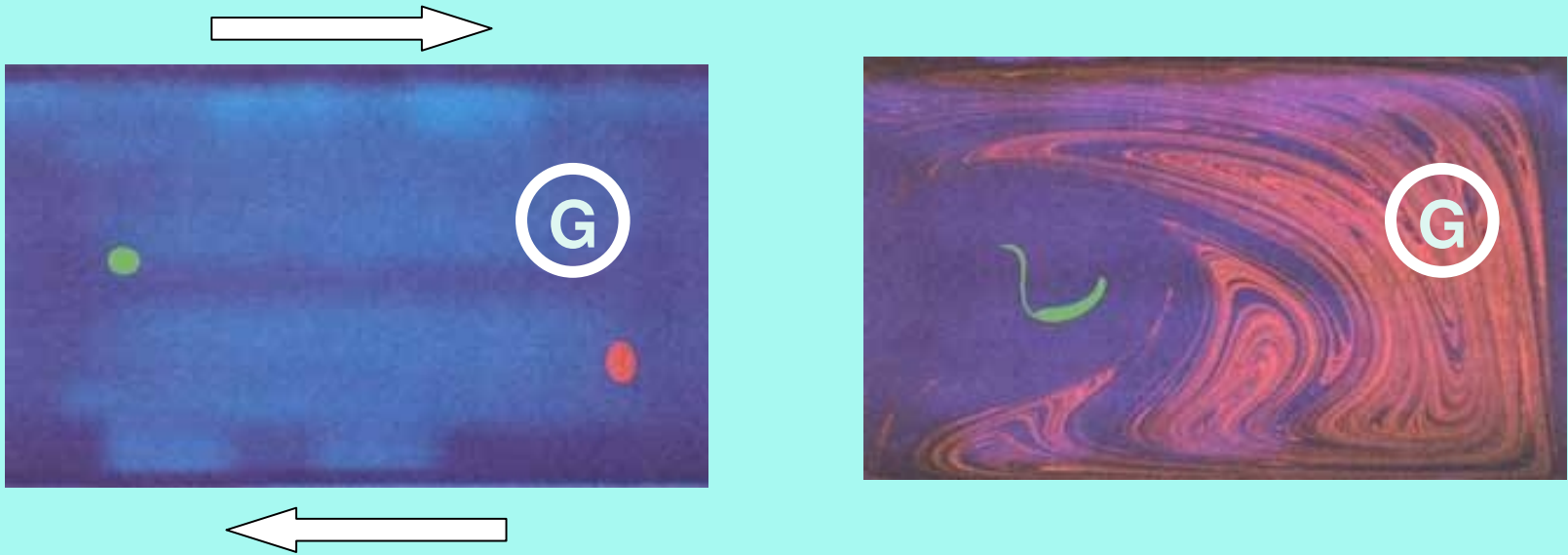


Экспериментальные данные
В.А.Огородникова и И.О.Сивака

Последнее связано с дополнительностью процессов фрагментации и разрушения

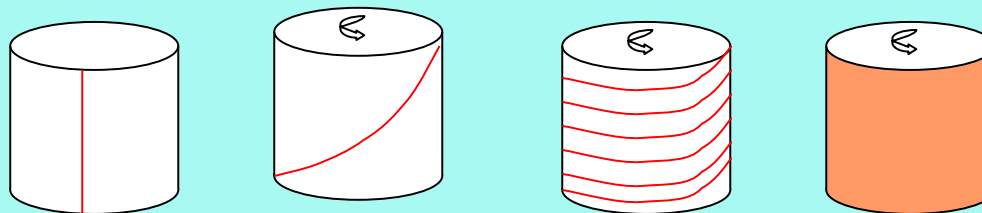
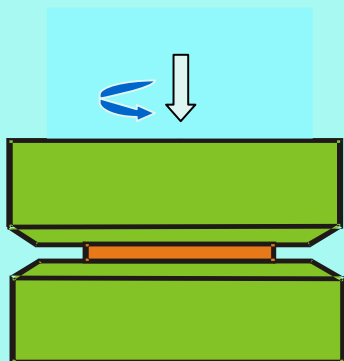


Перемешивание

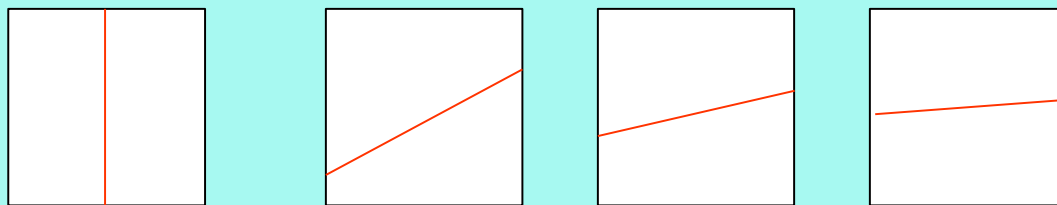
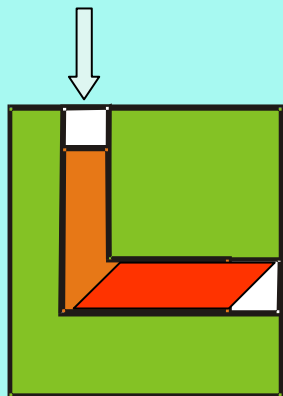


Если $\lim_{t \rightarrow \infty} \left. \frac{V_R}{V_B} \right|_G = \frac{V_R}{V_B}$, то происходит перемешивание

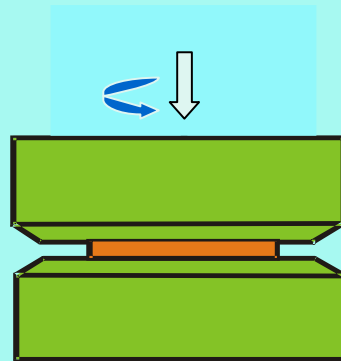
Перемешивание



Нет перемешивания



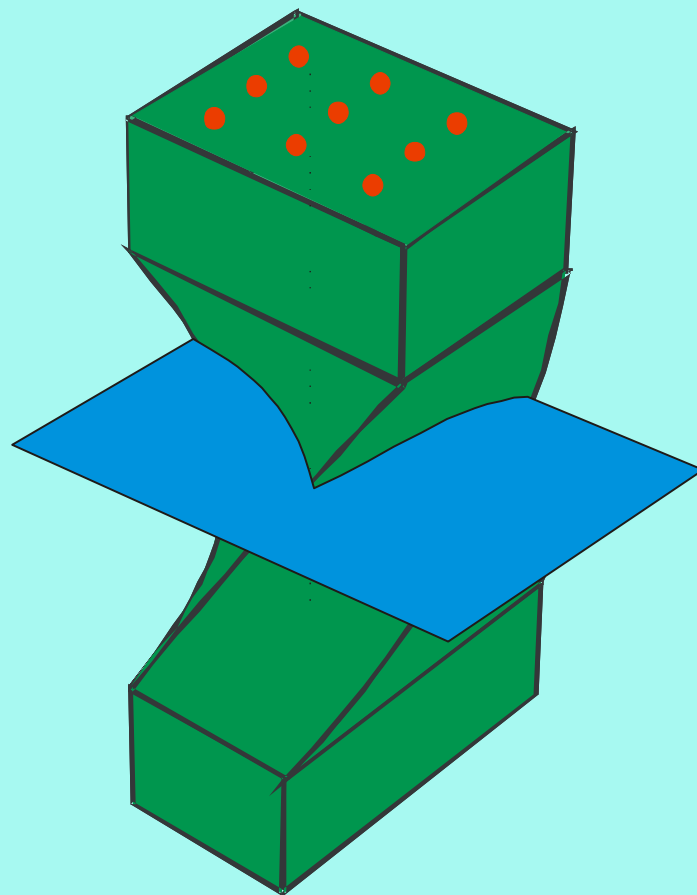
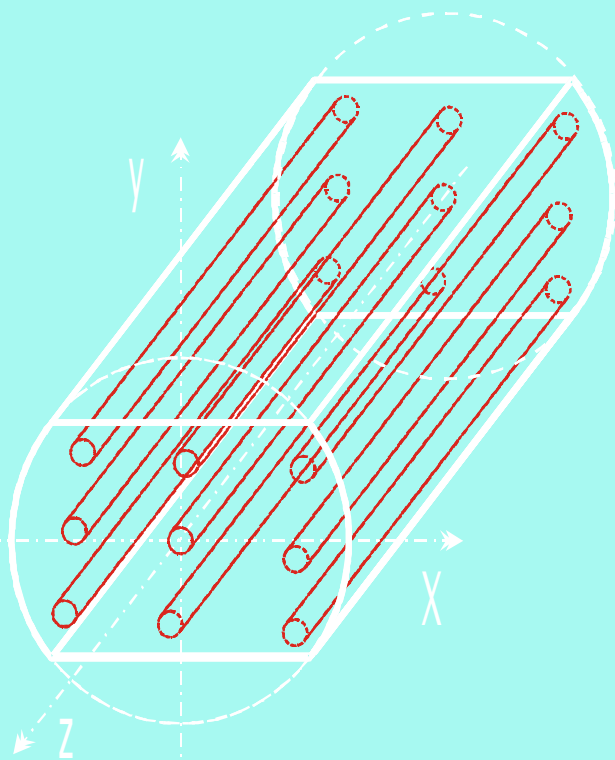
Перемешивание интенсифицирует механо-химические процессы



Поперечные движения при ВЭ

Почему и как металл деформируется на оси?

Методика экспериментального исследования поперечных движений при ВЭ



Последовательные сечения заготовки, остановленной в матрице



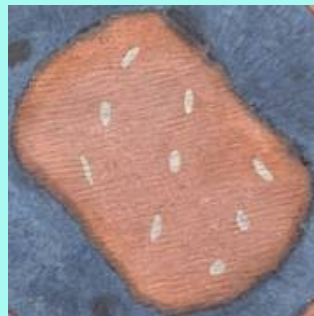
1



4



2



5



3



6

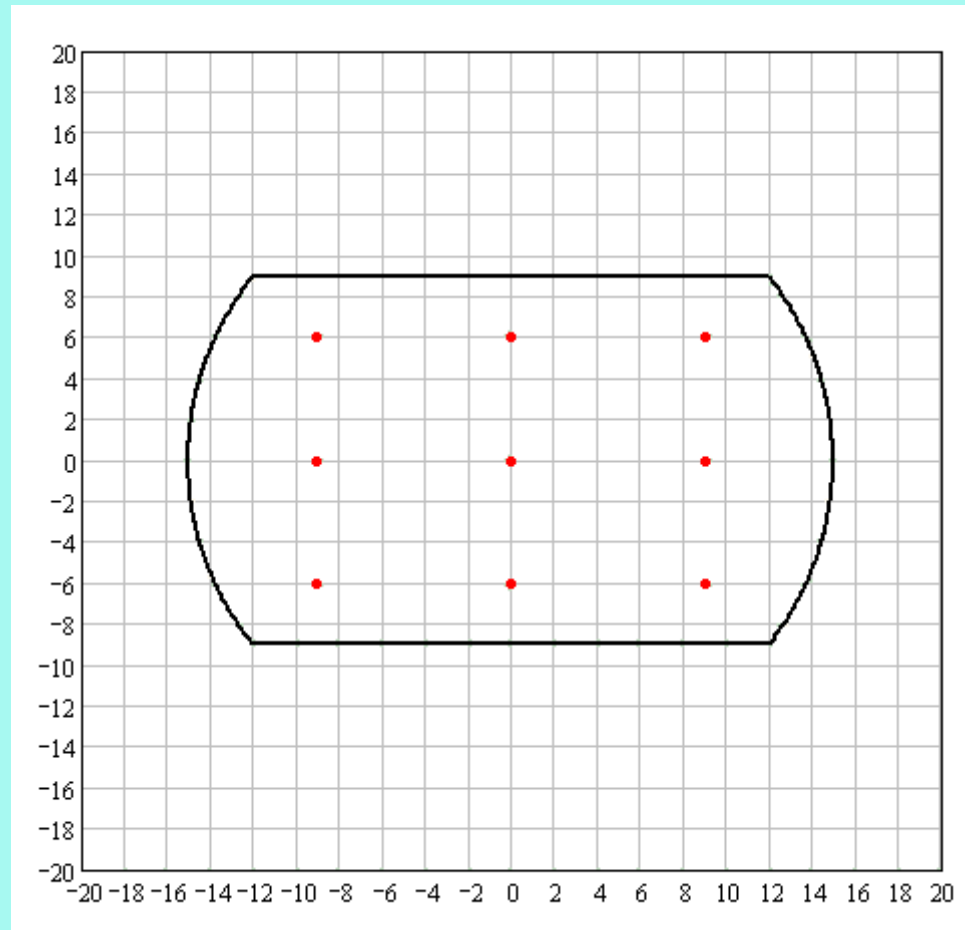


7

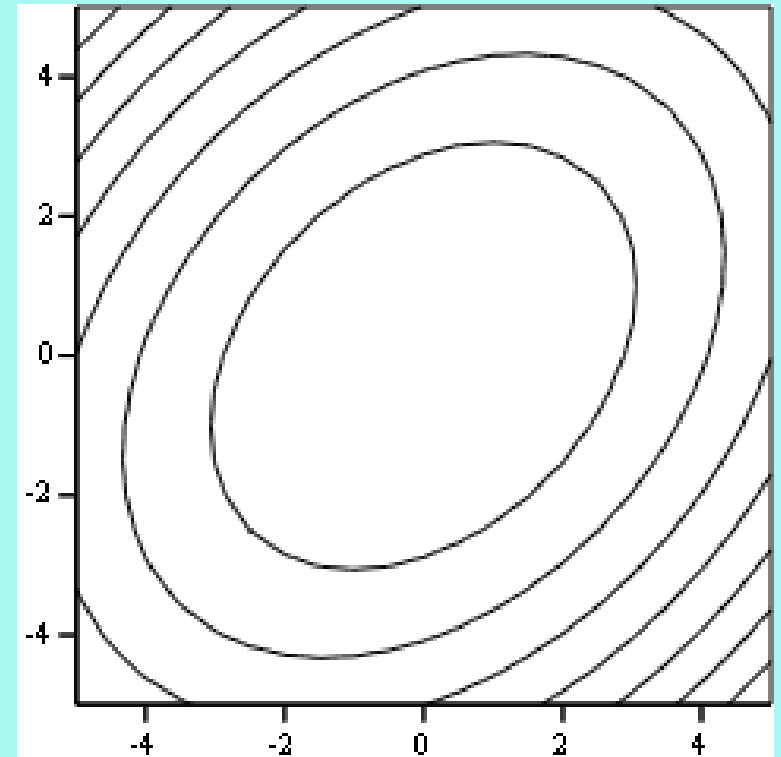
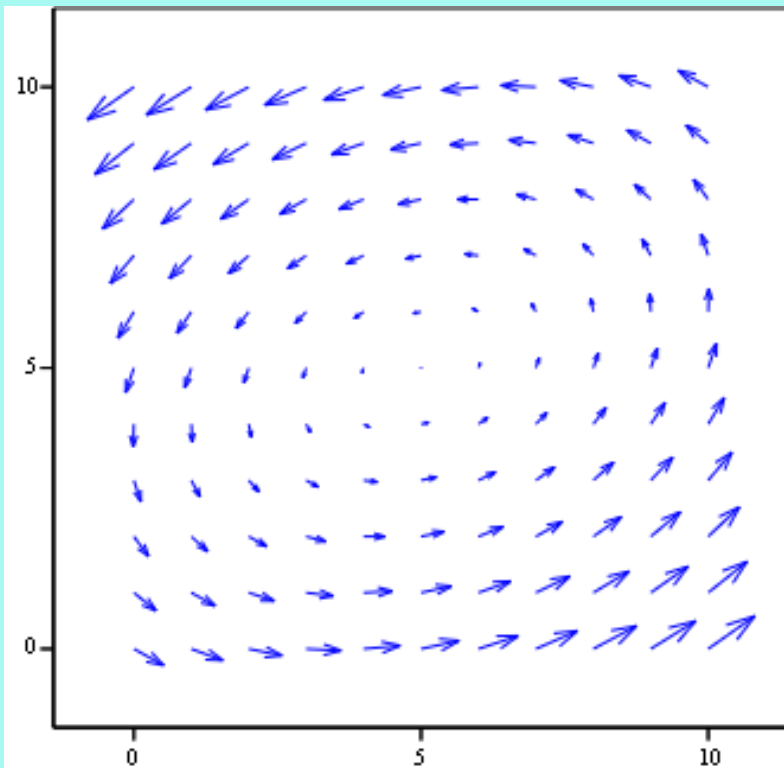


8

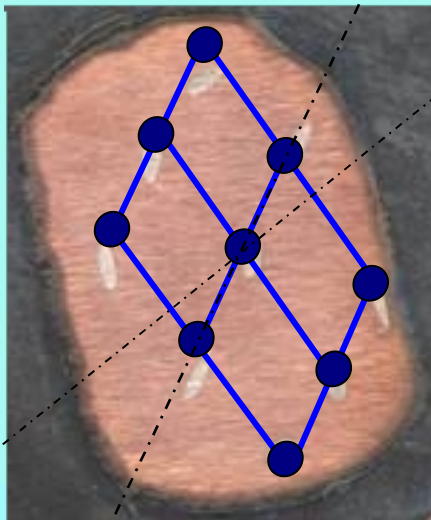
Поперечное движение при ВЭ



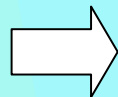
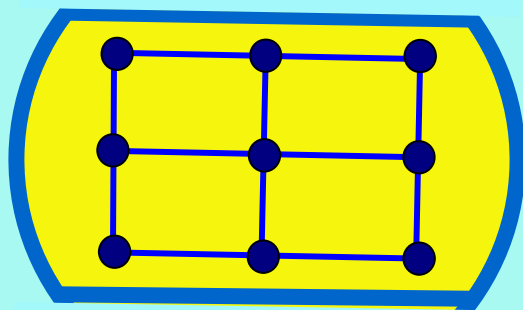
Поле скоростей и линии тока поперечного движения в условиях эксперимента



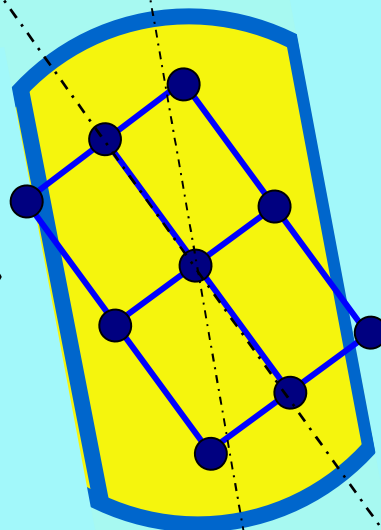
Поворот и сдвиг в плоскости, параллельной оси экструзии



Эквивалентная деформация
 $\epsilon = 0.4 \div 0.5$

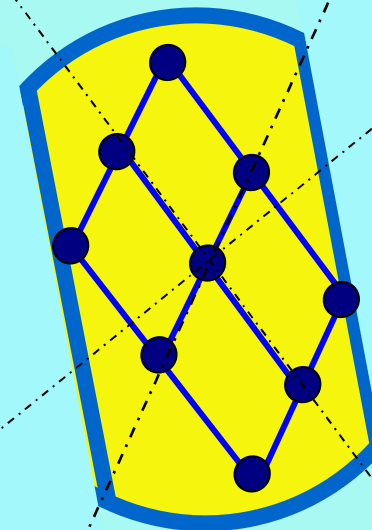


$\varphi = 25^\circ \div 30^\circ$

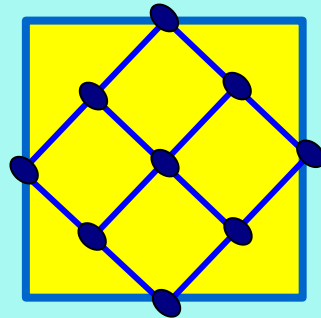
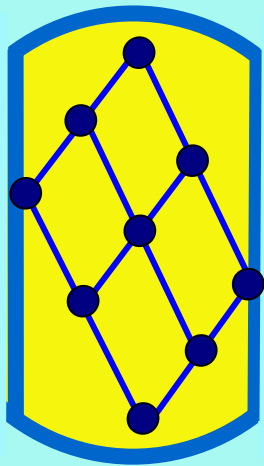


+

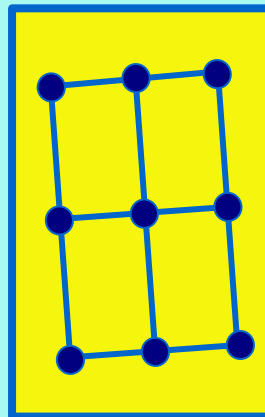
$\gamma = 25^\circ \div 30^\circ$



Величины поворота и сдвига в плоскости, параллельной оси винтовой экструзии зависят от профиля сечения канала



Для квадратного сечения поворот практически не вызывает сдвиг в продольной плоскости. Поэтому деформация в центре близка к 0



Для прямоугольного сечения поворот и сдвиг в продольной плоскости гораздо меньше, чем для скругленного сечения. Зато более интенсивный сдвиг в поперечной плоскости. Деформация в центре мала.

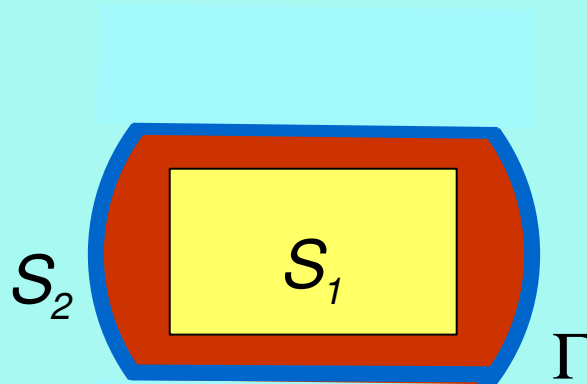
Вихри и деформация в процессе ВЭ

Распределение вихря по сечению

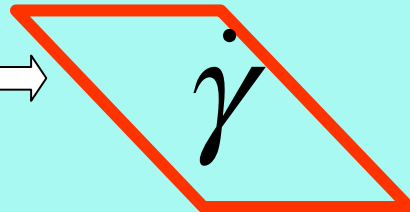
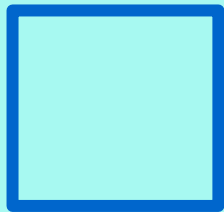
Теорема Стокса

$$\int_{S_1} (\text{rot}V)_z dS + \int_{S_2} (\text{rot}V)_z dS = \oint_{\Gamma} V_\tau dl = -2(S_1 + S_2)\Omega$$

Ω - угловая скорость поворота контура сечения

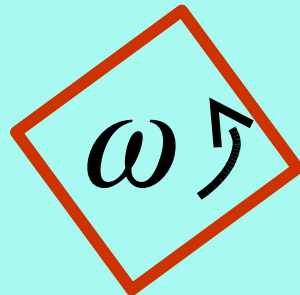
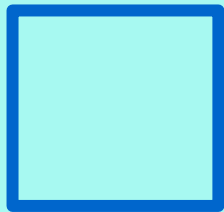


Вихрь простого сдвига



$$\left(\text{rot}V\right)_z = \dot{\gamma}$$

Вихрь поворота



$$\left(\text{rot}V\right)_z = 2\omega$$

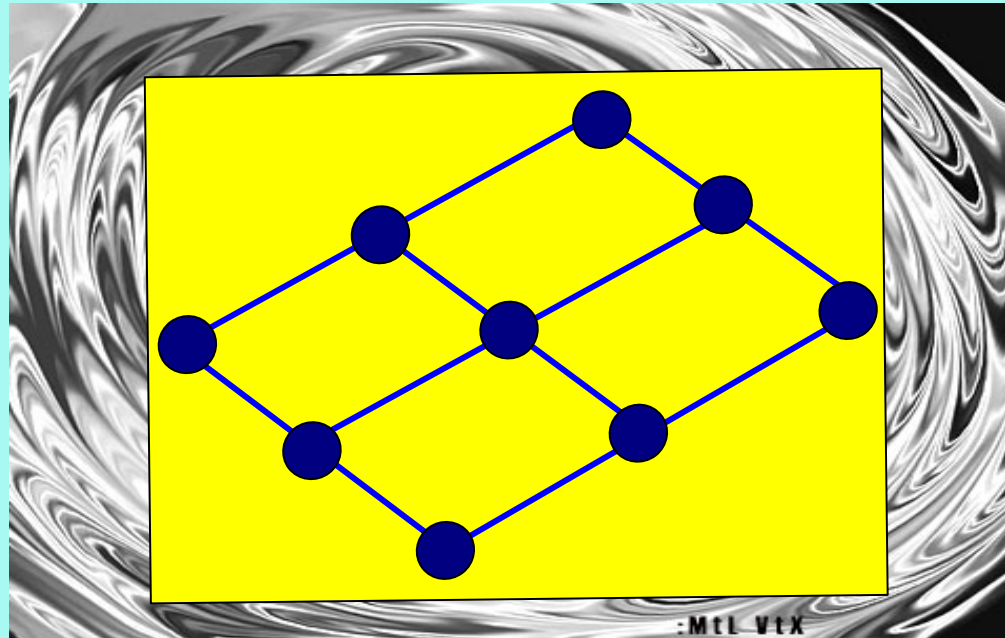
$$\Rightarrow \int_{S_1} \left(\text{rot}V\right)_z dS = (\dot{\gamma} + 2\omega) S_1$$

В приграничной области очень сильный вихрь!

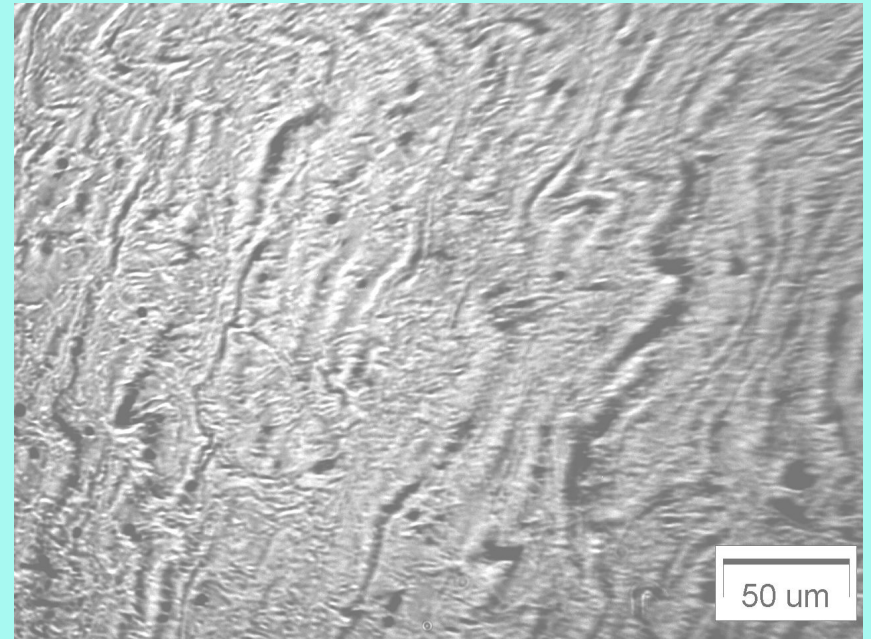
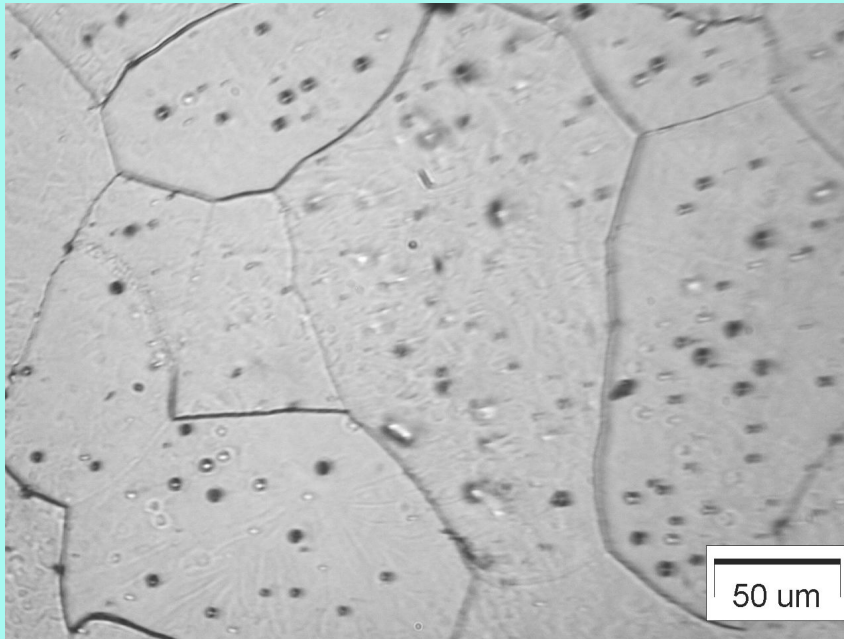
Среднее значение вихря в приграничной области

$$\left(\overrightarrow{rotV}\right)_z = -2\left(1 + \frac{S_1}{S_2}\right)\Omega - (\dot{\gamma} + 2\omega)\frac{S_1}{S_2}$$

$$\left|\left(\overrightarrow{rotV}\right)_z\right| \approx 5 \div 7 \dot{\gamma}$$

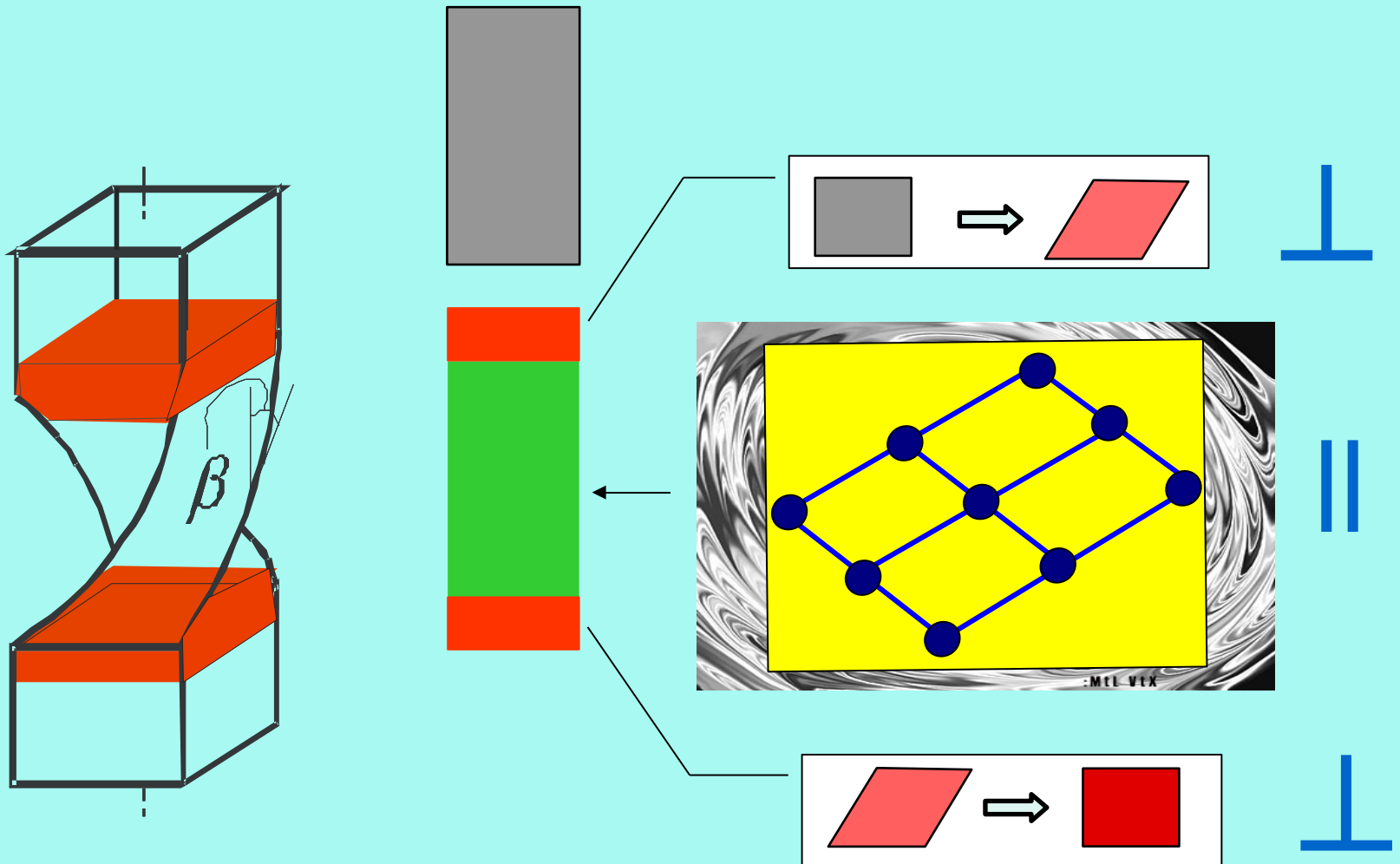


Из-за вихря образуются складки
поверхности простого сдвига
(винтовая экструзия алюминия)



Авторы благодарят проф. Ю.Мильмана за
предоставленные микроструктуры

Схема деформации при ВЭ

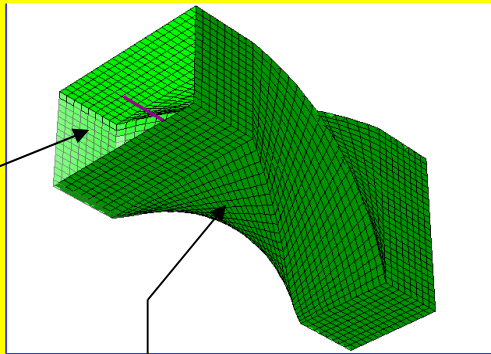


Метод экспериментально-расчетного определения деформаций

1. Построение кинематически-возможного поля скорости

$$V = V(x, y, z; f)$$

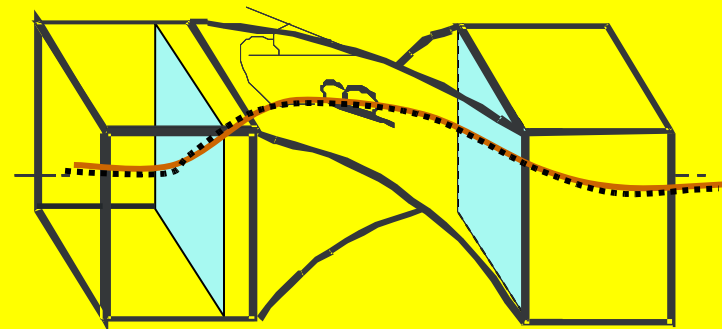
$$\operatorname{div} V = 0$$



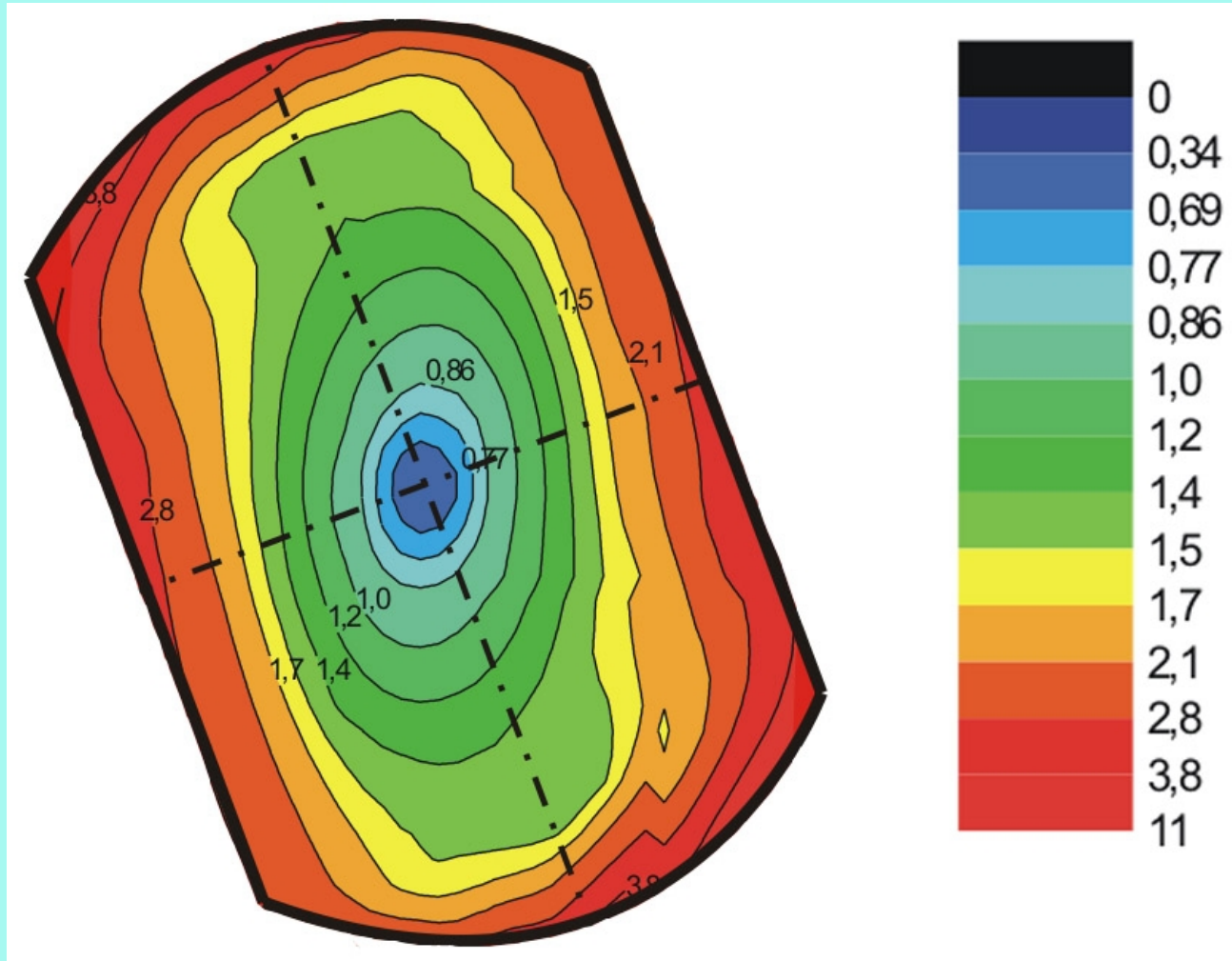
$$V = V_0$$

$$V \cdot n = 0$$

2. Определение функции f путем подгонки 9 теоретических линий тока к экспериментальным

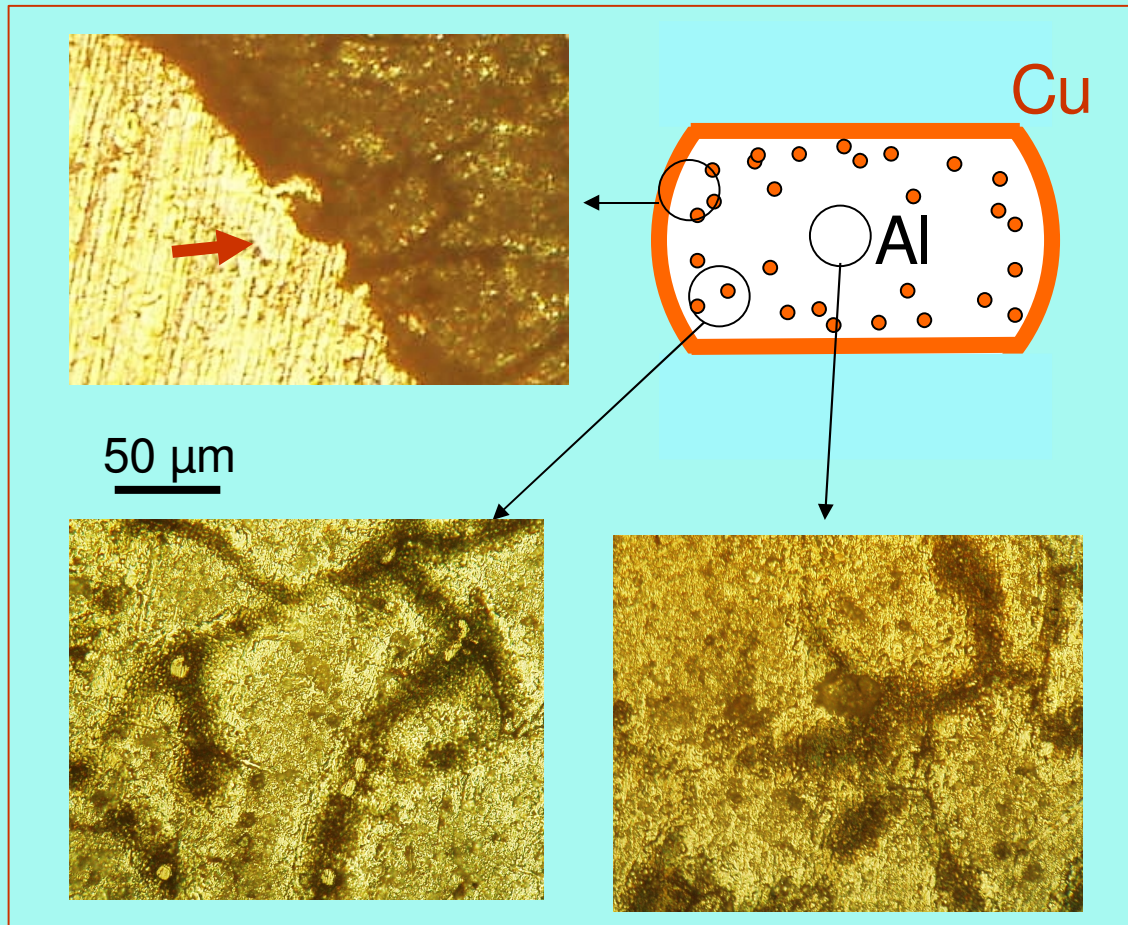


Распределение эквивалентной деформации по сечению заготовки

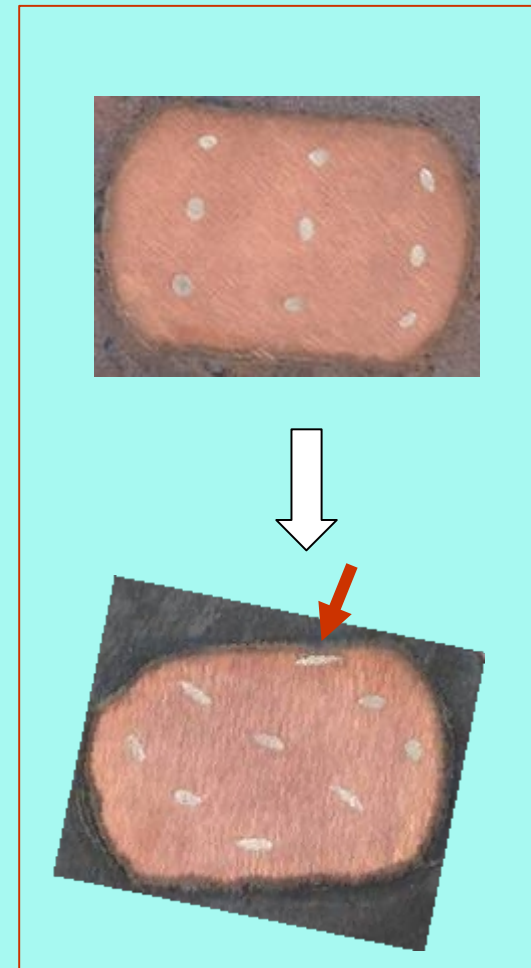


Перемешивание в процессе ВЭ

Материал с поверхности
заготовки втягивается в
объем...



и наоборот

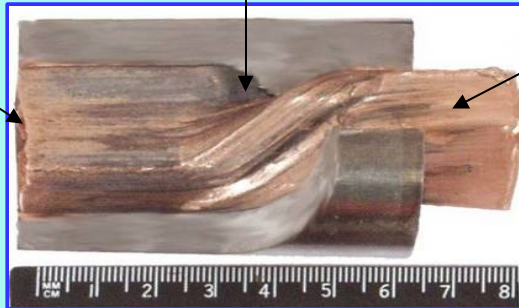
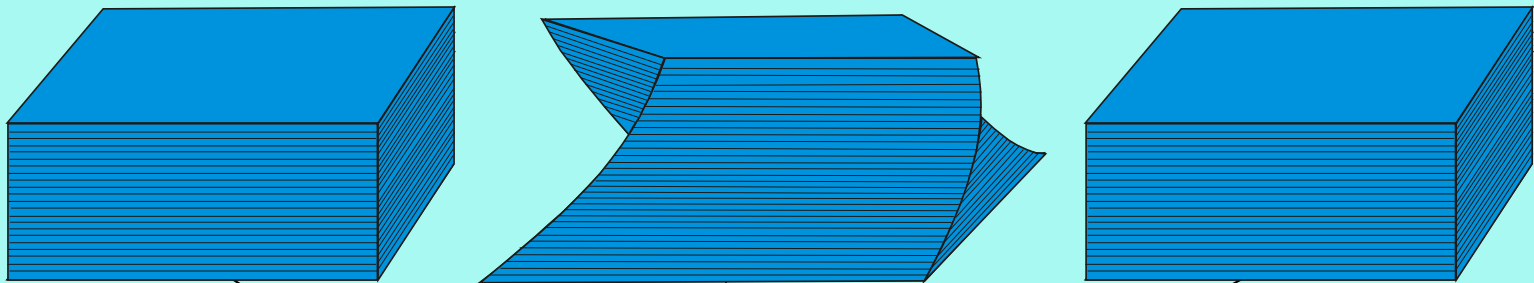


Авторы благодарят Т.П.Заику за помощь в
структурных исследованиях

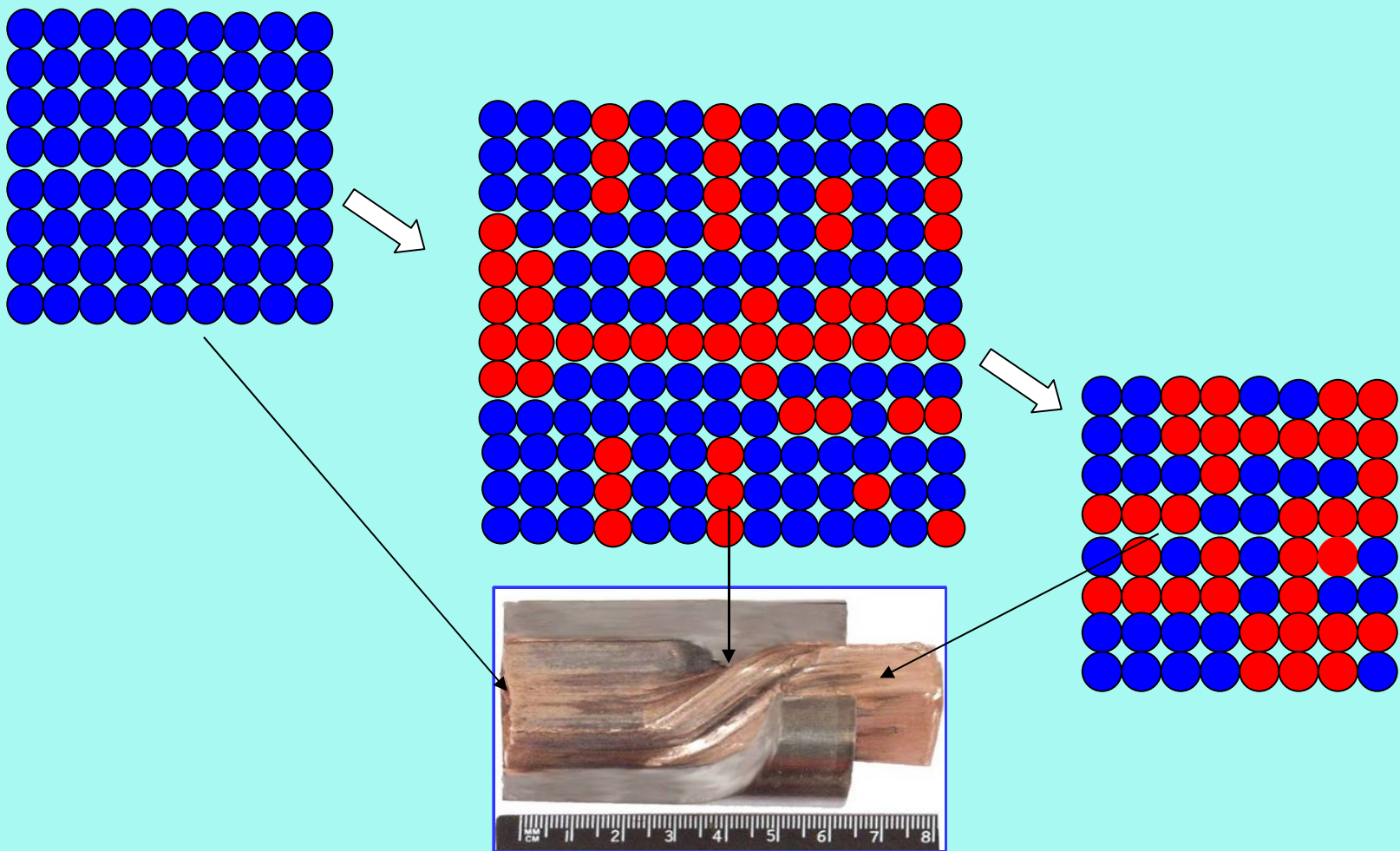
Изменение поверхности при ВЭ

Площадь
поверхности

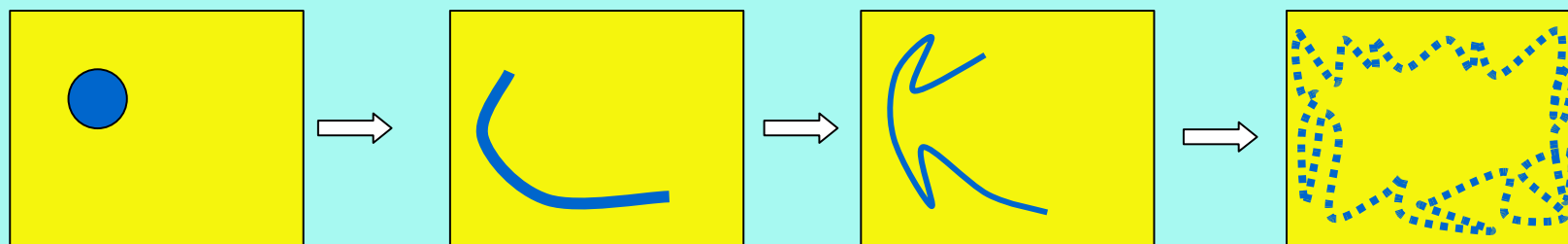
2
1



Перемешивание на поверхности



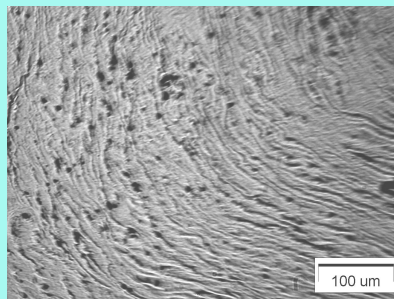
Перемешивание в масштабе сечения заготовки основано на вытягивании и образовании складок при реверсировании потока



Примеры вытягивания при ВЭ

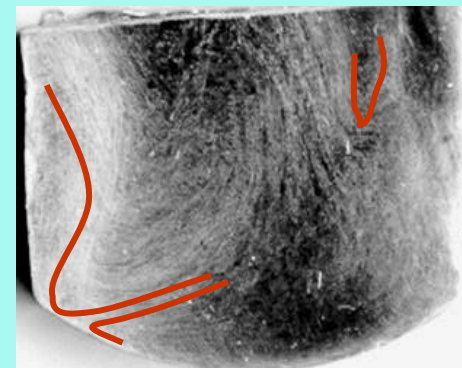


пластилин

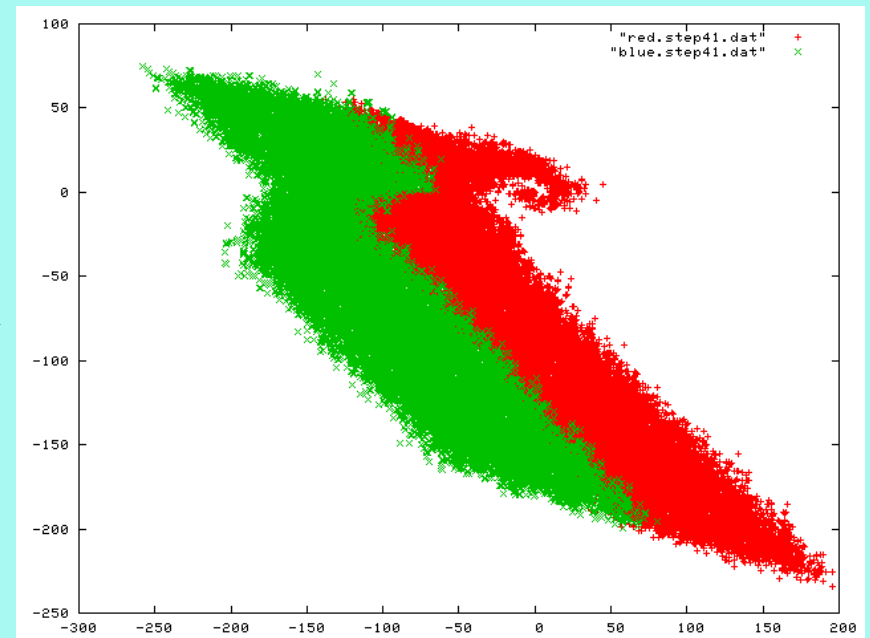
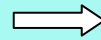
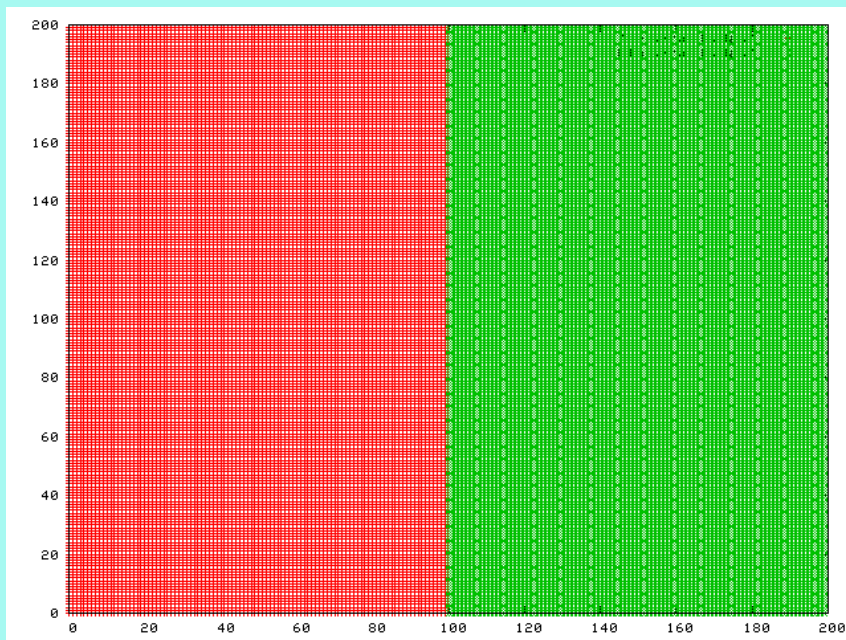


алюминий

складки



Перемешивание в масштабе зерен основано на многократном применении преобразования «дискретный сдвиг + поворот»



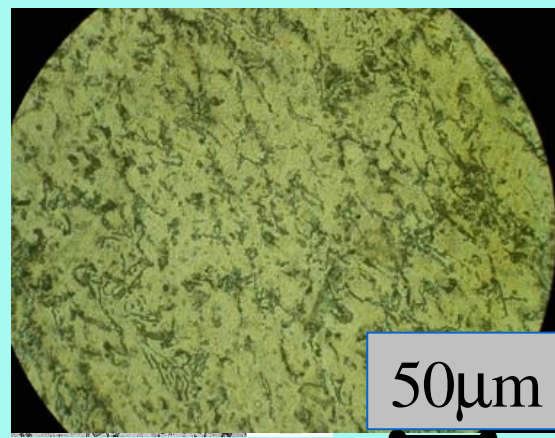
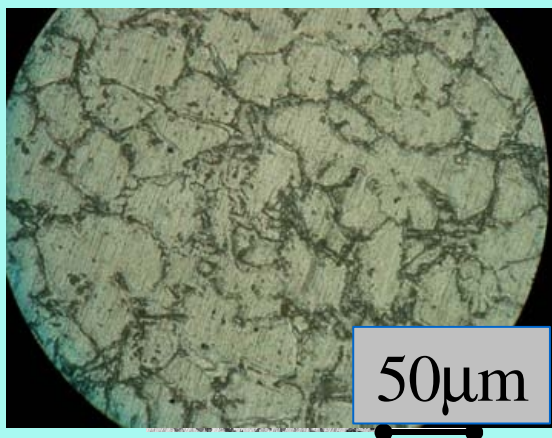
Компьютерное моделирование

Результат перемешивания в масштабе зерен

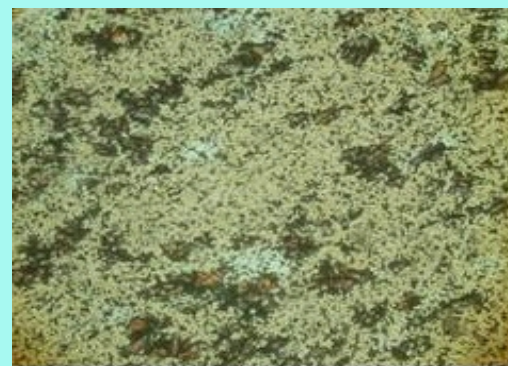
Исходное состояние

После 1 прохода ВЭ

Вторичный алюминий

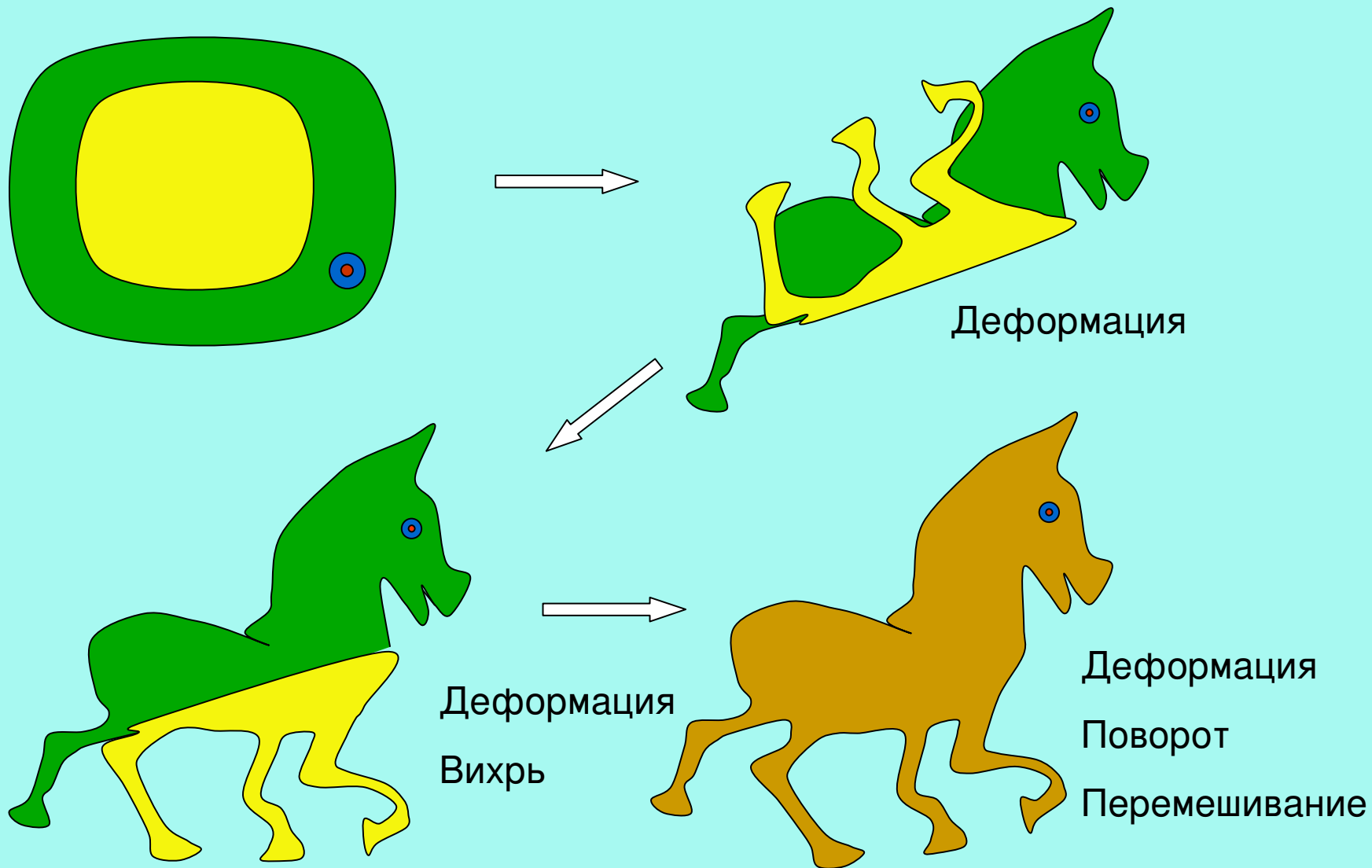


Фосфористая медь



Заключение

Важны деформация, вихрь и перемешивание



Процесс с деформацией, вихрем и перемешиванием

