

Получение мелкодисперсных материалов на основе магния. Результаты численного моделирования и эксперимент



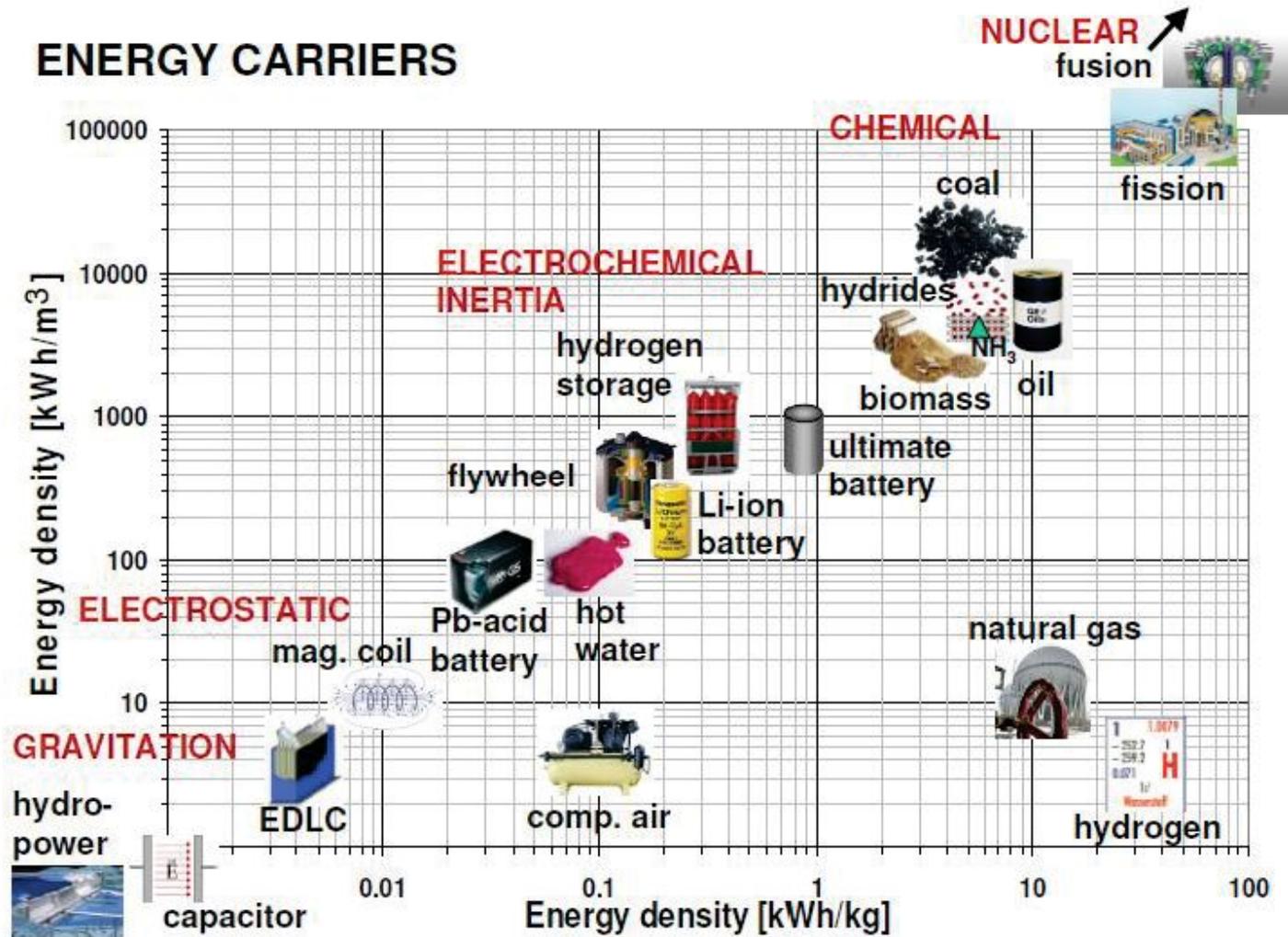
**Аптуков В.Н.*¹, Романов П.В.¹,
Скрябина Н.Е.¹, Fruchart D.²**



*¹ Пермский Государственный Национальный
Исследовательский Университет, Пермь, 614990,
Россия*

*² Institut Néel, Le Centre National de la Recherche
Scientifique, Grenoble, 38042, France*

Вектор развития энергетических ресурсов



[A. Zuttel, International Hydrogen Showcase, April 2011]

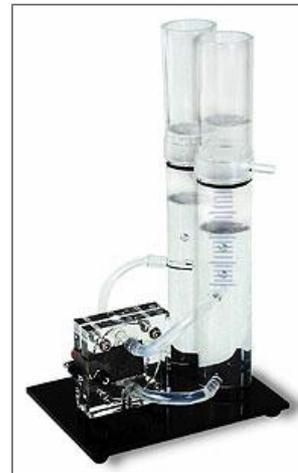
Вектор развития энергетических ресурсов

	Бензин	Электричество	Водород /гидриды
Возобновляемый ресурс	нет	да	да
Ущерб окружающей среде (CO ₂)	да	Зависит от способа получения	Зависит от способа получения
Хранение/запас	да	Батареи (ограниченный запас)	да
Перевод в иной тип энергоносителя	да	С использованием водорода	да
Использование в электронике	нет	да	Нет (но! Микро топливные элементы могут заменить аккумуляторы)
Использование «не по назначению» (хим. пр-во...)	да	нет	да

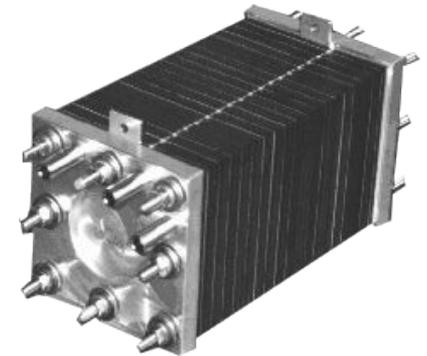
Возобновляемые источники



Электролизер



Резервуар
 H_2 (MgH_2)



Топливный
элемент



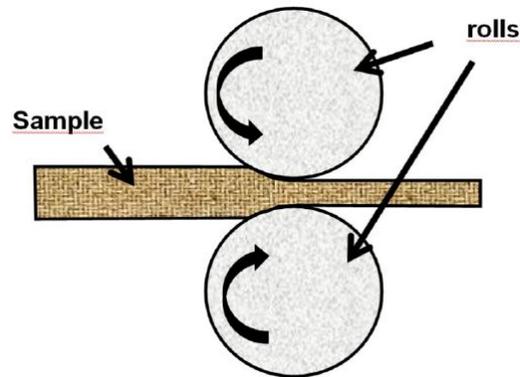
Использование энергии:
Электросети или
автономный пользователь

Methods of severe plastic deformations: Forging (F), Cold Rolling (CR), Equal Chanel Angular Pressing (ECAP)

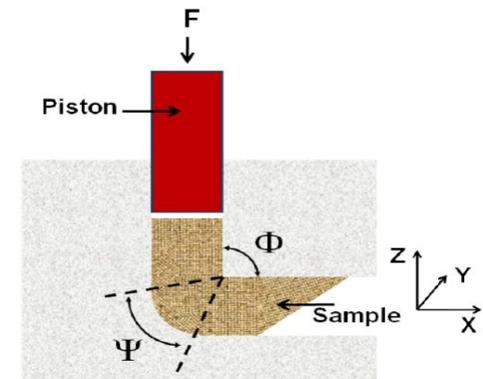
Fast Forging



Cold Rolling



Equal Chanel Angular Pressing



Samples after severe plastic deformation:

Fast Forging



Cold Rolling



ECAP

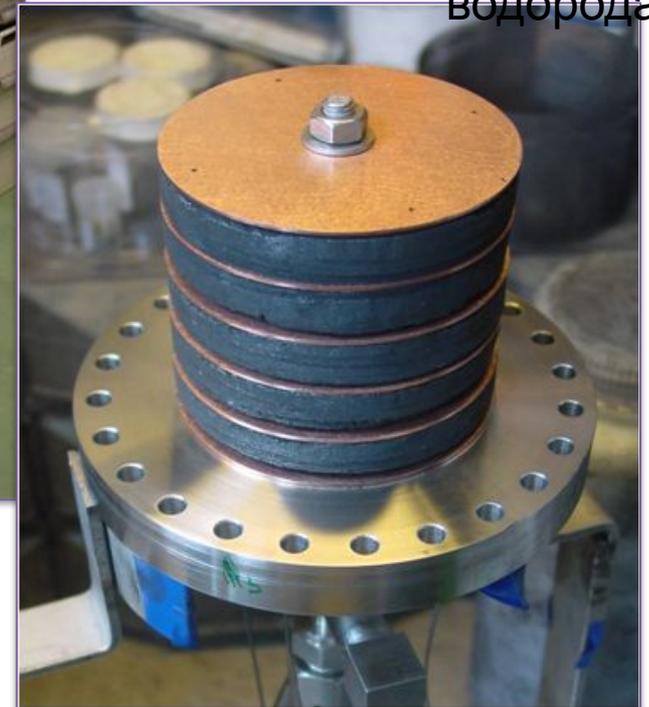


Равноканальное угловое прессование – РКУП*

Лабораторная установка РКУП



«Рабочее
тело»
аккумулятора
водорода



* Фотографии предоставлены D. Fruchart:
*Institut Néel, Le Centre National de la Recherche
Scientifique, Grenoble, France*

Вариационная постановка задачи РКУП

Расчетная область представляет собой круговой сектор OAB с радиусом R , углом ψ

. Используется модель жесткопластического тела.

Основное энергетическое соотношение для случая плоского деформирования, сформулированное в скоростях

$$p_0 R v_0 = \tau_s \int_{V_{OAB}} H dV + m \tau_s \int_{S_{AB}} |v_\varphi|_{r=R} dS + \tau_s \int_{S_{OB}} |v_r|_{\varphi=\pi/2} dS$$

τ_s – предел текучести; m – фактор трения;

H интенсивность скоростей деформаций сдвига.

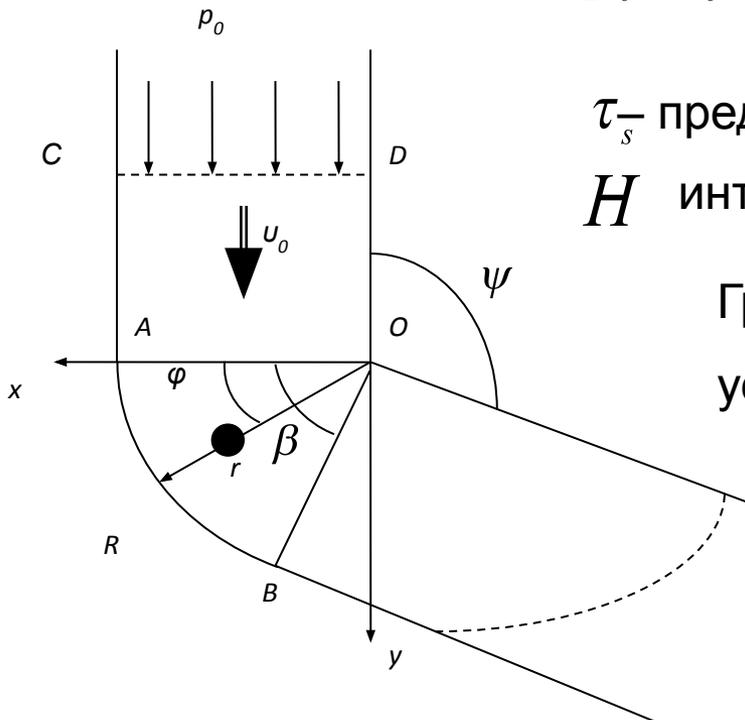
Граничные условия:

$$v_r(r = R) = 0$$

$$v_r(r = 0) = 0$$

$$v_r(\varphi = 0) = 0$$

$$v_\varphi(\varphi = 0) = v_0$$



Вариационная постановка задачи РКУП

Представим функцию $f(\varphi)$ в виде степенного ряда

$$f(\varphi) = \sum_{k=1}^n C_k \varphi^k$$

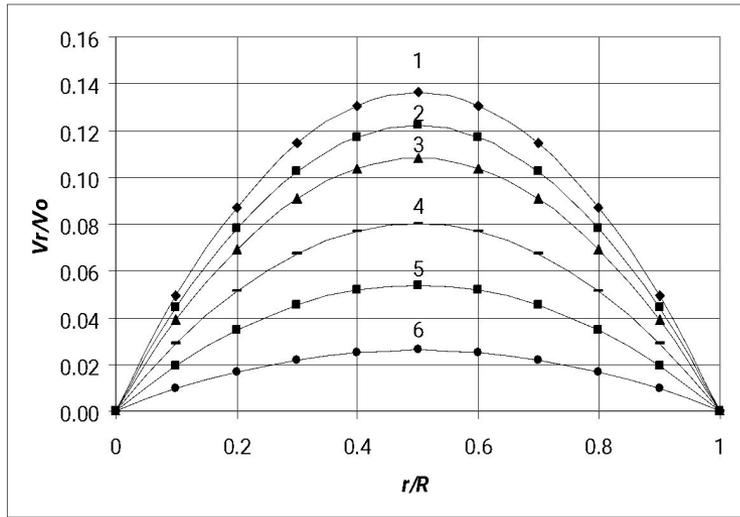
$$v_r = r(R-r) \sum_{k=1}^n C_k \varphi^k \quad v_\varphi = v_0 - r(2R-3r) \sum_{k=1}^n \frac{C_k}{k+1} \varphi^{k+1}$$

Выражения для скоростей деформаций

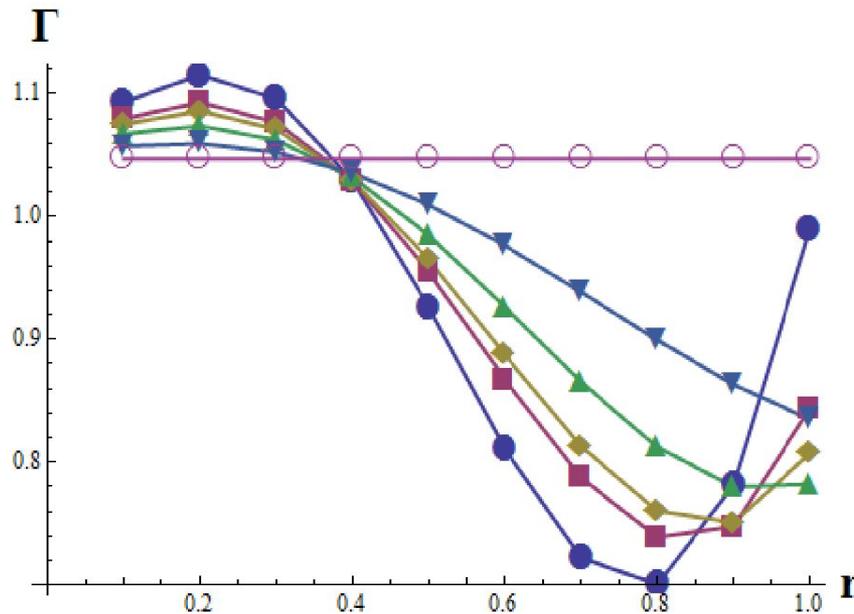
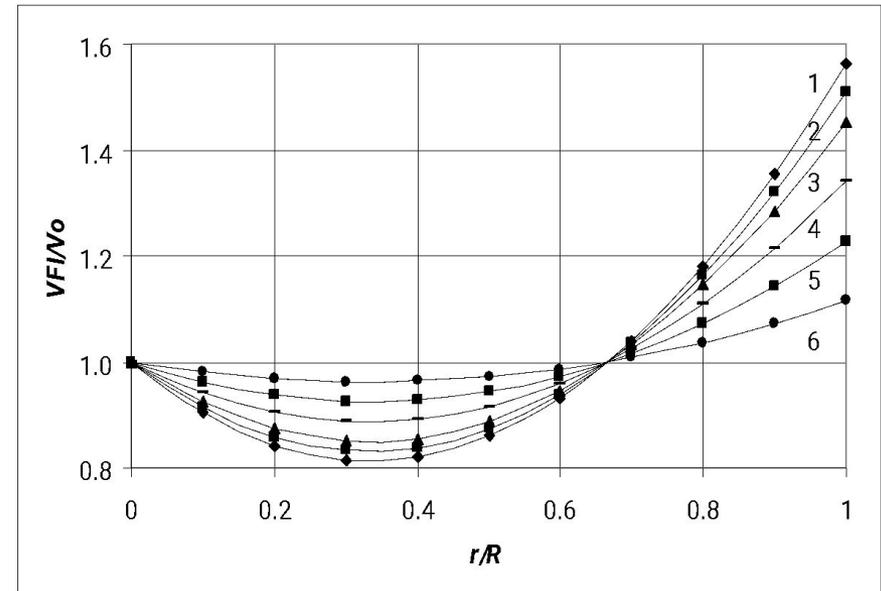
$$\xi_r = -\xi_\varphi = (R-2r) \sum_{k=1}^n C_k \varphi^k$$

$$\eta_{r\varphi} = \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r} = (R-r) \sum_{k=1}^n C_k k \varphi^{k-1} + 3r \sum_{k=1}^n \frac{C_k}{k+1} \varphi^{k+1} - \frac{v_0}{r}$$

Вариационная постановка задачи РКУП



кривая 1- $m = 0$; 2- $m = 0,2$; 3- $m = 0,4$;
4- $m = 0,6$; 5- $m = 0,8$; 6- $m = 0,95$;



$$\Gamma = \int d\Gamma = \int H dt$$

$$v_r = 0, v_\varphi = v_0, H = \left| \xi_{r\varphi} \right| = \frac{v_0}{r}$$

$$r = r_0 = const, \quad \Gamma = \pi / 2 \approx 1,57$$

Механические свойства магниевых сплавов до и после операции РКУП

Испытание: Zwick/Roell Z-250
Температура испытания: 20 °С
Метод: одноосное сжатие
Размер образцов: 12х12х12 мм.

Направление
оси заготовки
для РКУП

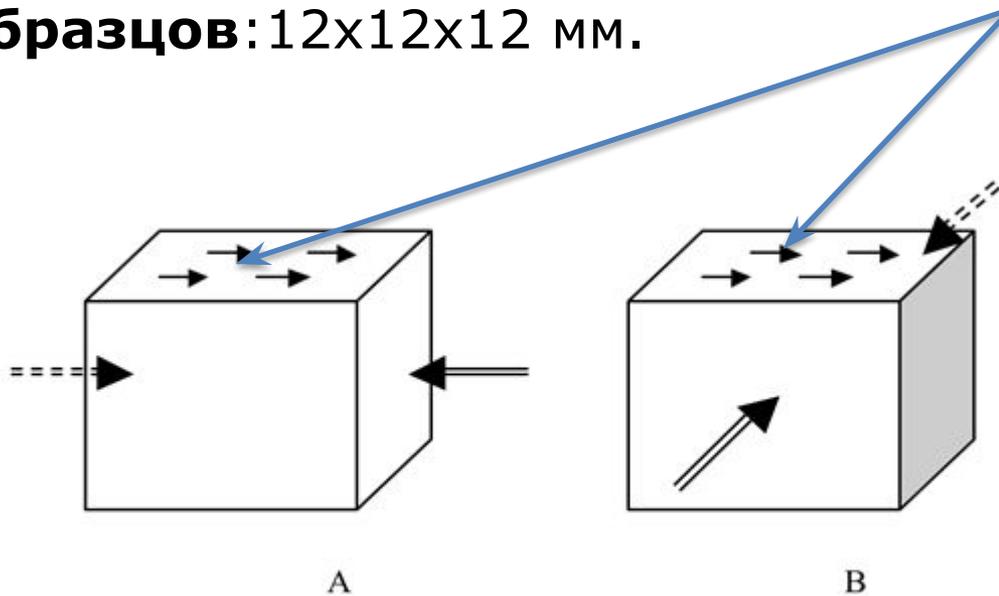
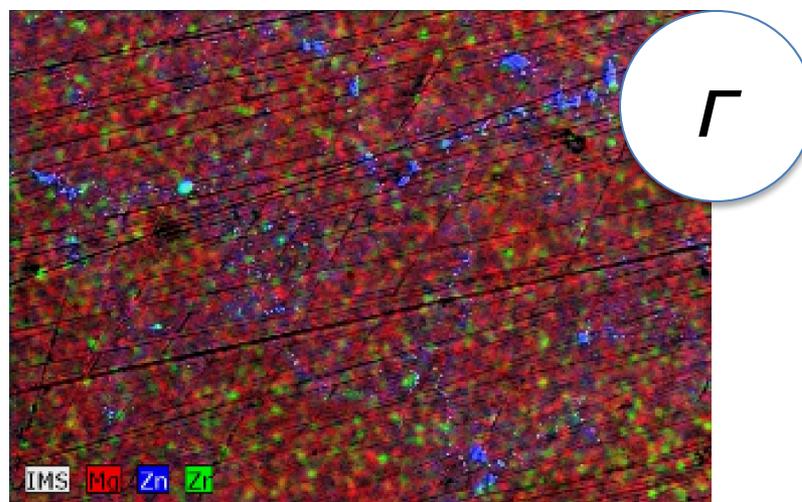
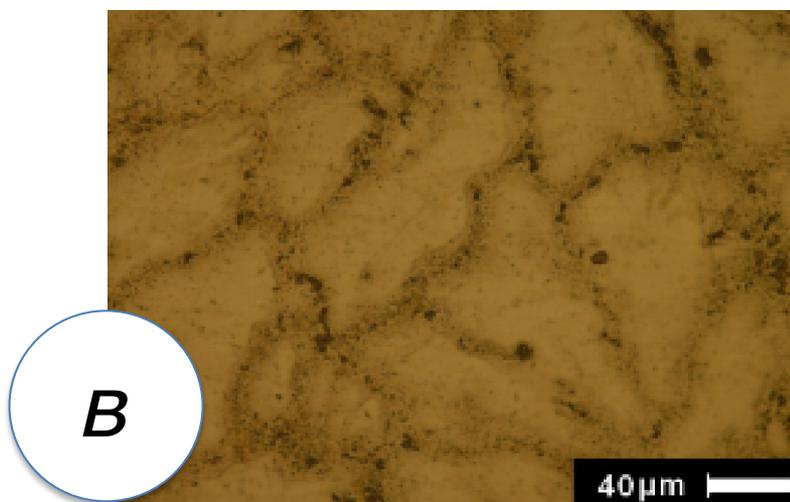
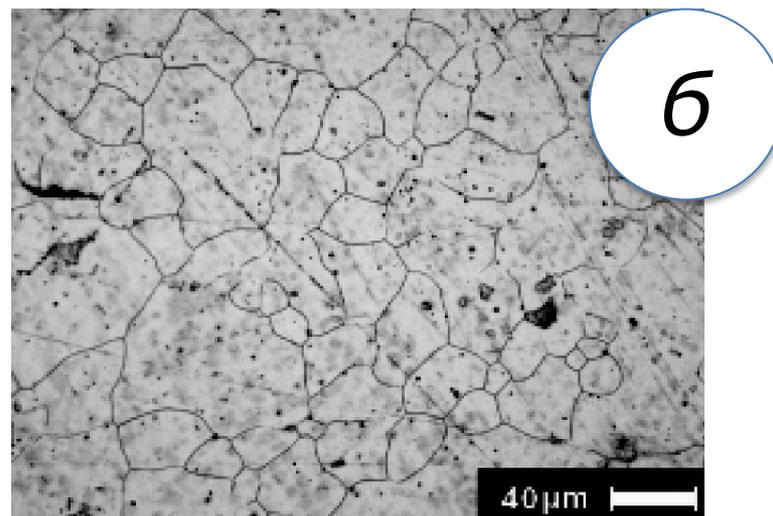


Схема **А** – Сжатие вдоль длинной оси заготовки РКУП
Схема **В** – Сжатие перпендикулярно длинной оси заготовки РКУП

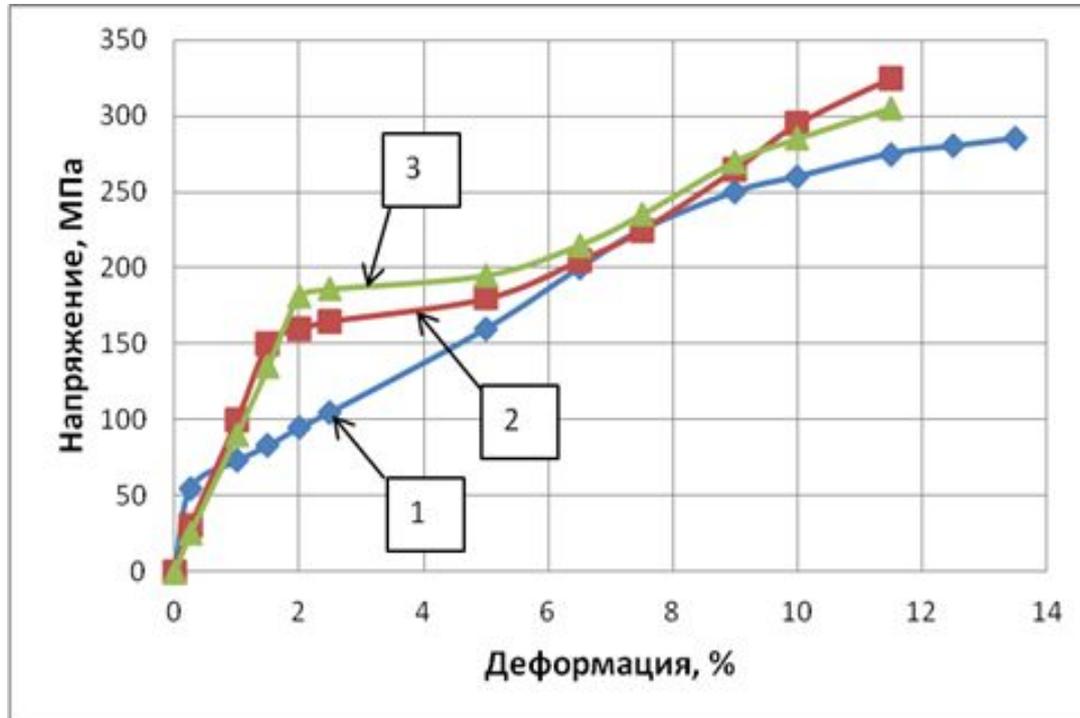
Микроструктура образцов

Mg (а), сплавов AZ31 (б) и ZK60 (в).

Распределение элементов в сплаве ZK60 (г)



Механические свойства магниевого сплава AZ31 до и после РКУП (испытания по схеме А)



- 1** - **AZ31**, исходный
- 2** - **AZ31** после 1-го прохода, $T = 200^{\circ}\text{C}$
- 3** - **AZ31** после 2-го прохода, B_c , $T = 200^{\circ}\text{C}$

Магнийевый сплав AZ31 (96% Mg, 3% Al, 1% Zn, вес. %)

**Механические свойства магниевых сплавов до и после операции РКУП: 1 проход, $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$
(испытания по схеме А)**

- **Предел текучести** повышается:

Mg – в 5,7 раз

AZ31 – в 2,7 раза

ZK60 – в 1,7 раза

- **Предел прочности** повышается:

Mg – в 1,5 раза

AZ31 – на 15–40 %

ZK60 – на 20 %

- **Модуль упругости** уменьшается в 2,5–2,9 раза

Единичная операция РКУП приводит к появлению **анизотропии** механических свойств. **Предел прочности**, измеренный по схеме В (перпендикулярно длинной оси заготовки) выше предела прочности измеренного по схеме А (вдоль длинной оси заготовки):

AZ31 – на 21 %

ZK60 – на 39 %

Применение метода сеток при исследовании НДС образца при операции РКУП. Исходный образец

На рисунке – фрагмент поверхности образца.

Размер сетки 1,95x1,95 мм, глубина бороздки не более 0,1 мм



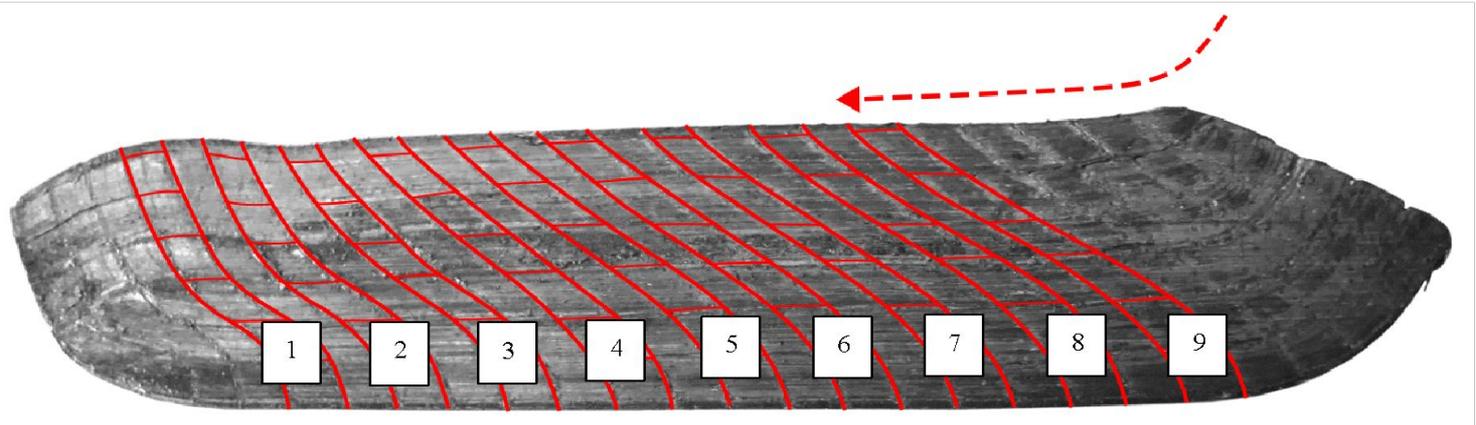
Материал: сплав AZ31(96% Mg, 3% Al, 1% Zn, вес. %)

Размер заготовки: 12x12x50 мм,

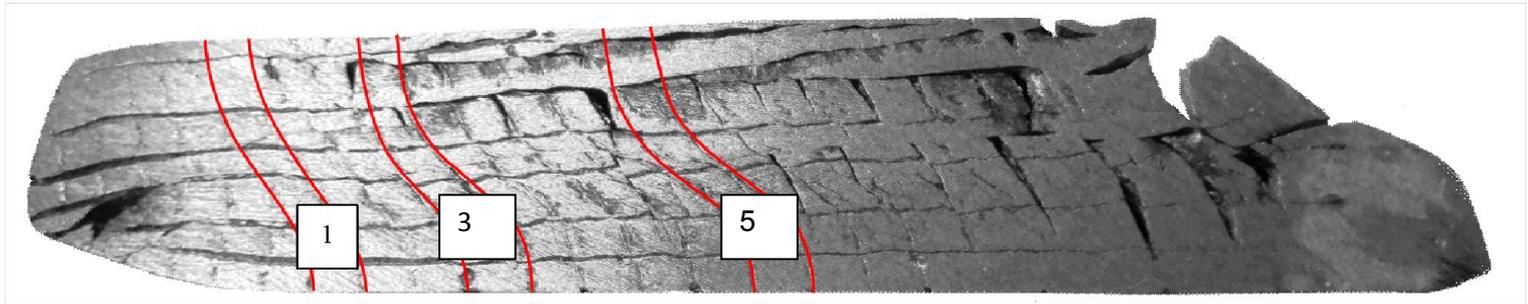
Условия РКУП: угол сопряжения каналов матрицы 105°,
скорость похода образца – 3см/с

Применение метода сеток при исследовании НДС образца при операции РКУП.

Деформированная сетка после прохода матрицы



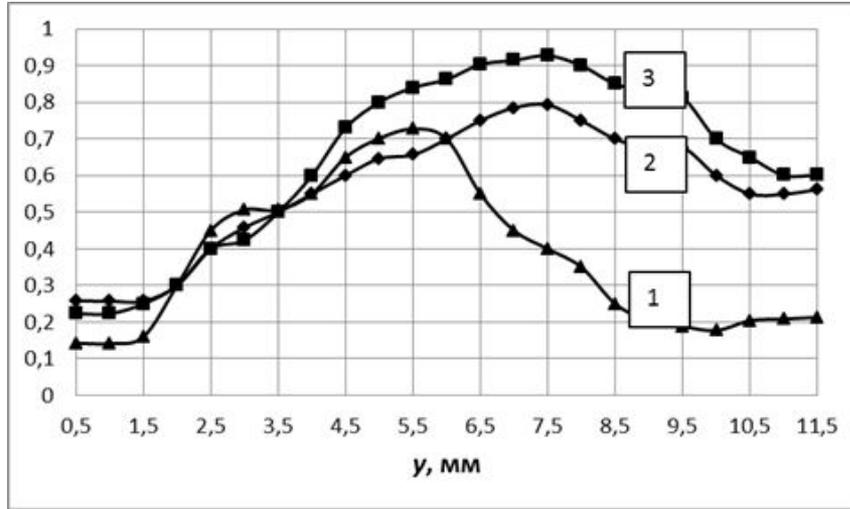
$T = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$



$T = 170 \text{ } ^\circ\text{C}$

Распределение интенсивности деформаций по ширине образца для выделенных рядов

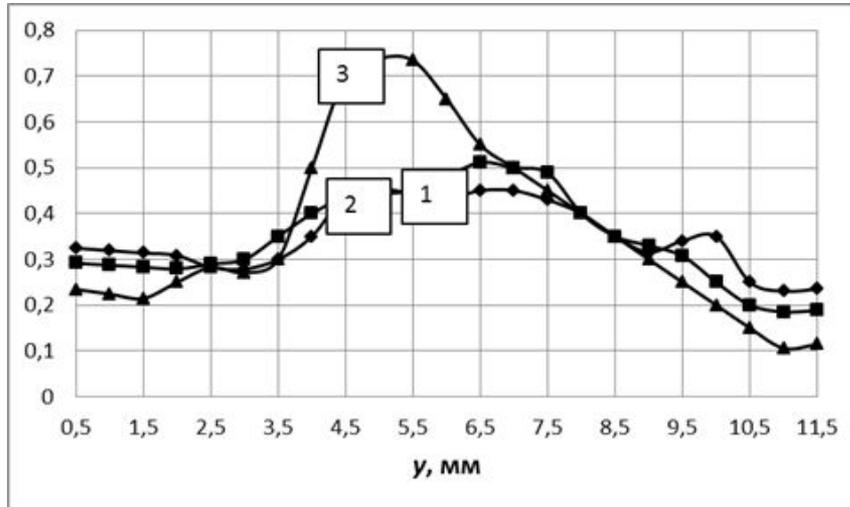
T = 200 °C



- 1 – ряд 1
- 2 – ряд 5
- 3 – ряд 8

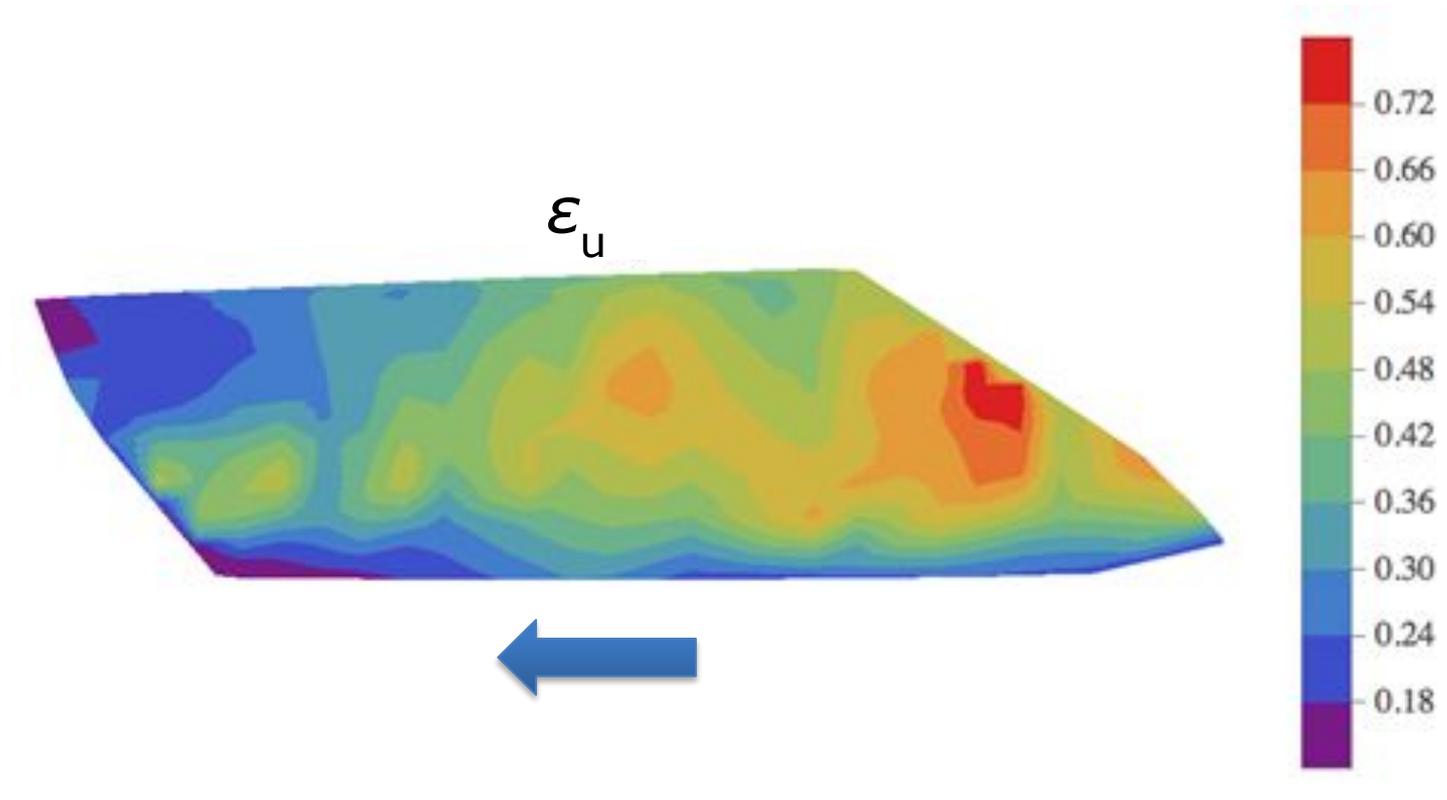
$$\Gamma \approx 1,31 \quad \varepsilon_{II} \approx 0,76$$

T = 170 °C



- 1 – ряд 1
- 2 – ряд 3
- 3 – ряд 5

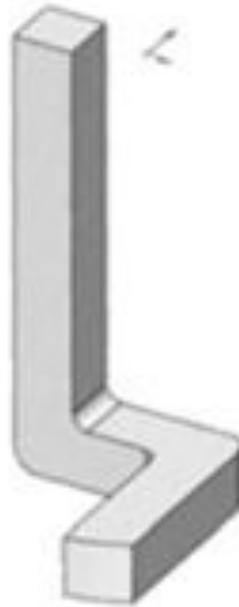
Поле интенсивности деформаций на части боковой поверхности заготовки, $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$



 - направление движения по каналу матрицы

*3D моделирование операции РКУП.
Пространственная конфигурация каналов*

3D/2-bend

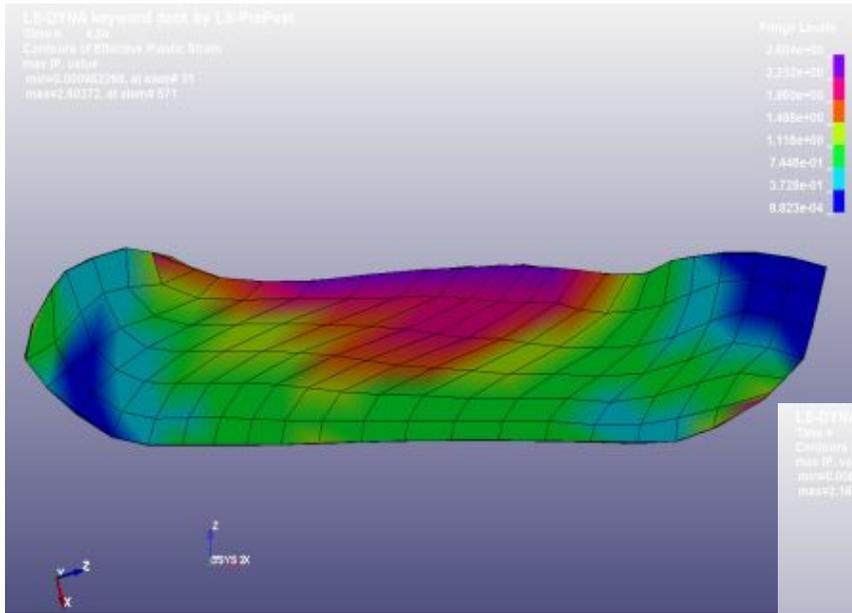


3D/3-bend



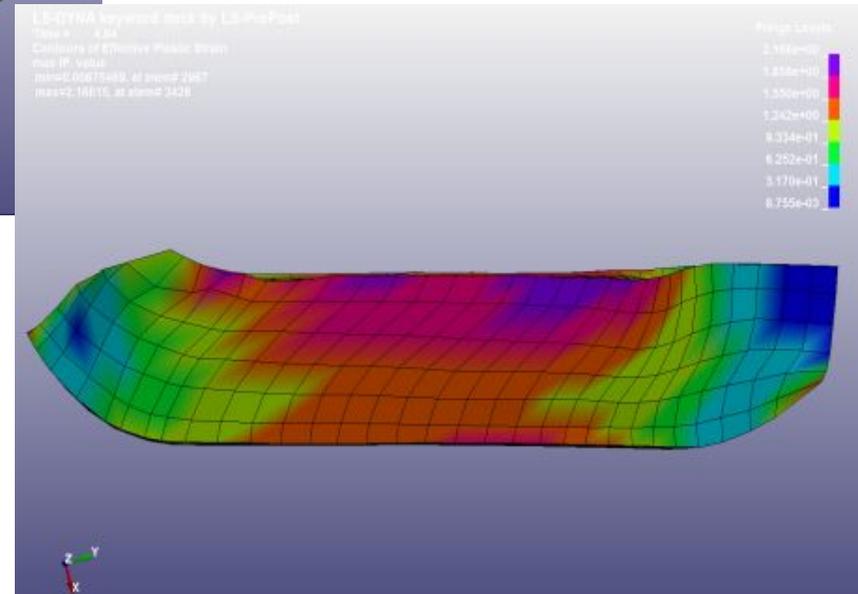
[U. Engel et al, Advanced in Material Forming, 2007]

Распределения интенсивности деформаций. Второй цикл операции РКУП

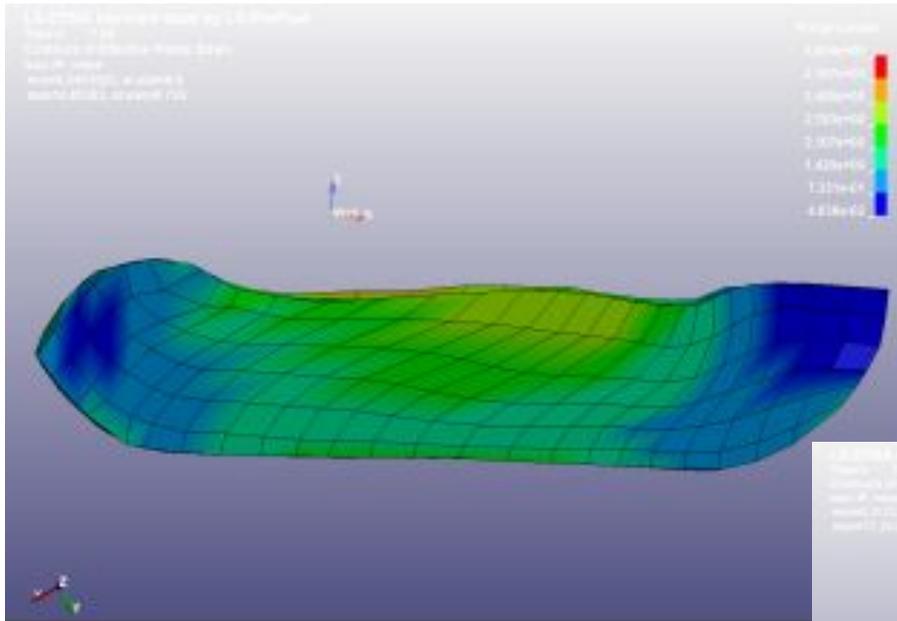


Режим **A** – без
вращения образца
вокруг длинной оси

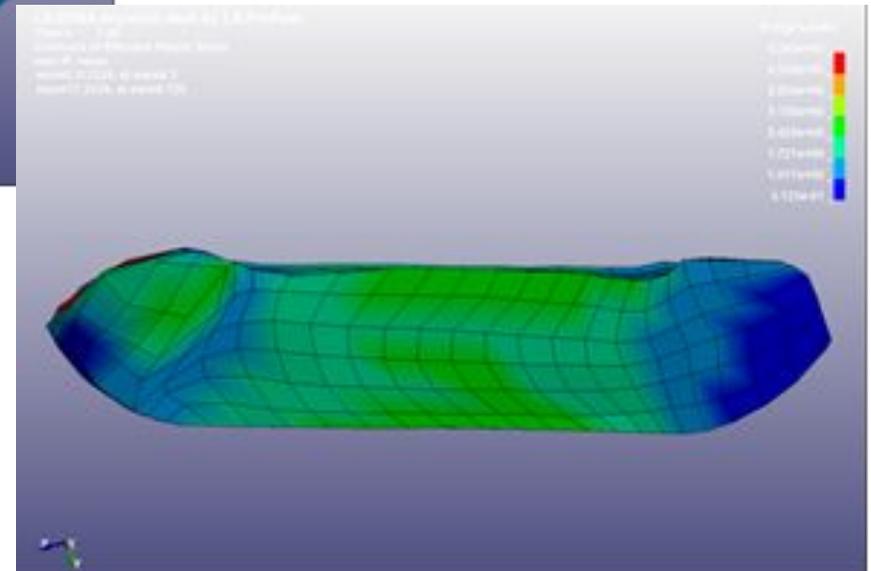
Режим **Bc** – поворот
образца вокруг
длинной оси на 90°
при каждом проходе



Распределения интенсивности деформаций. Третий цикл операции РКУП

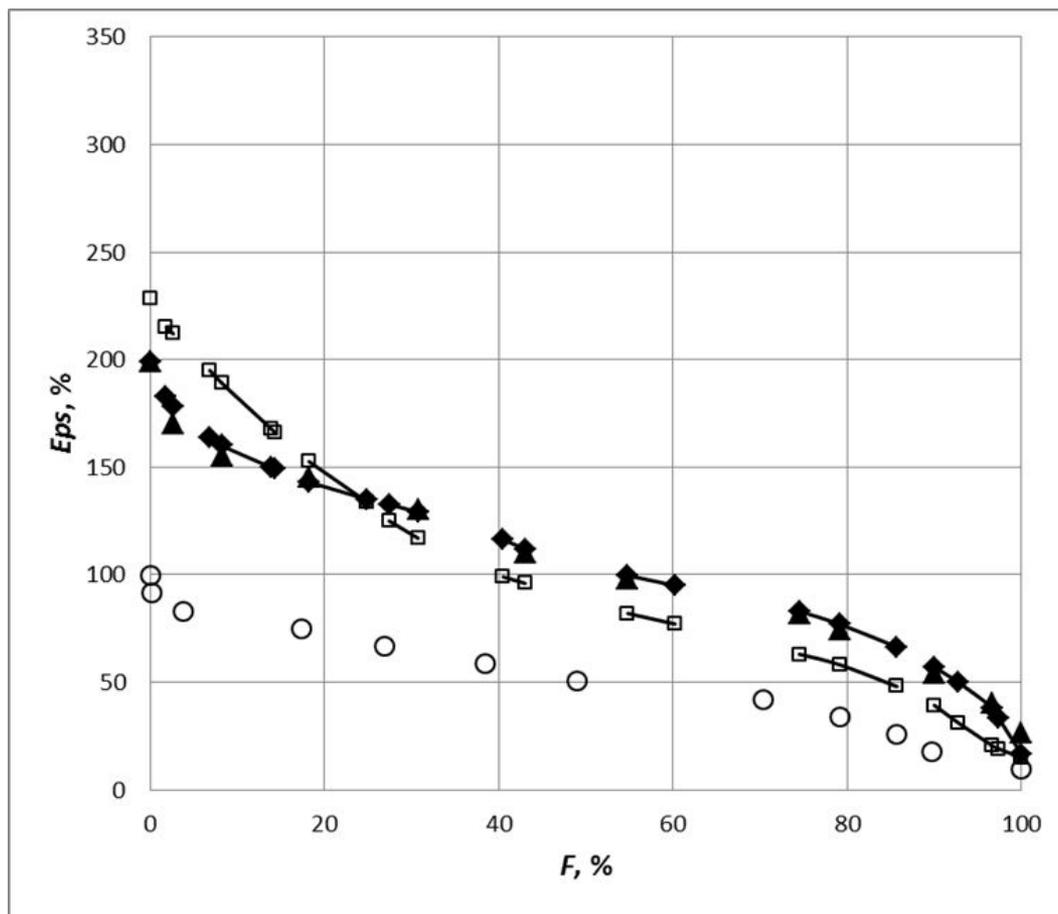


Режим **A**



Режим **B_c**

Функция распределения интенсивности деформаций по объему образца



1-й проход – «круг».

2-й проход:

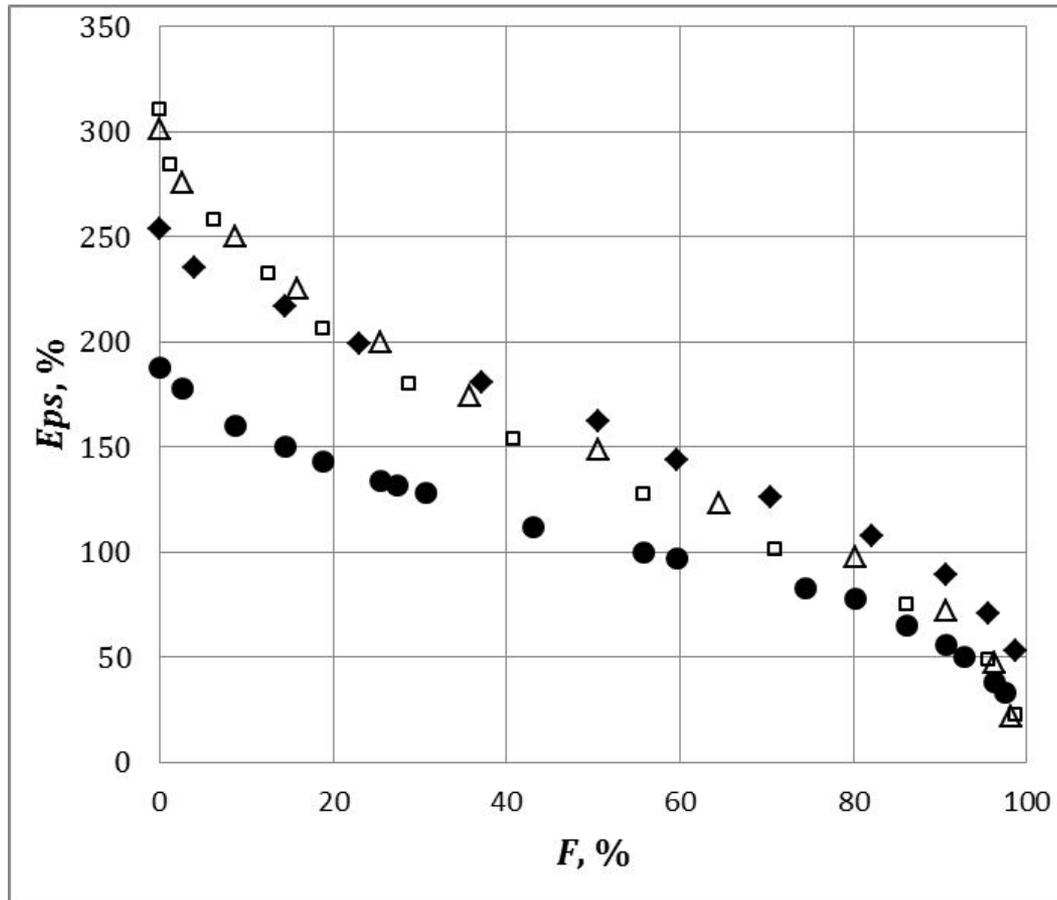
«**квадрат**» - угол поворота = 0° ;

«**ромб**» - угол поворота = 90° ;

«**треугольник**» - угол поворота = 180° .

Повороты осуществляли относительно длинной оси заготовки

Функция распределения интенсивности деформаций по объему образца



2-й проход (B_c) -
«круг»

3-й проход:

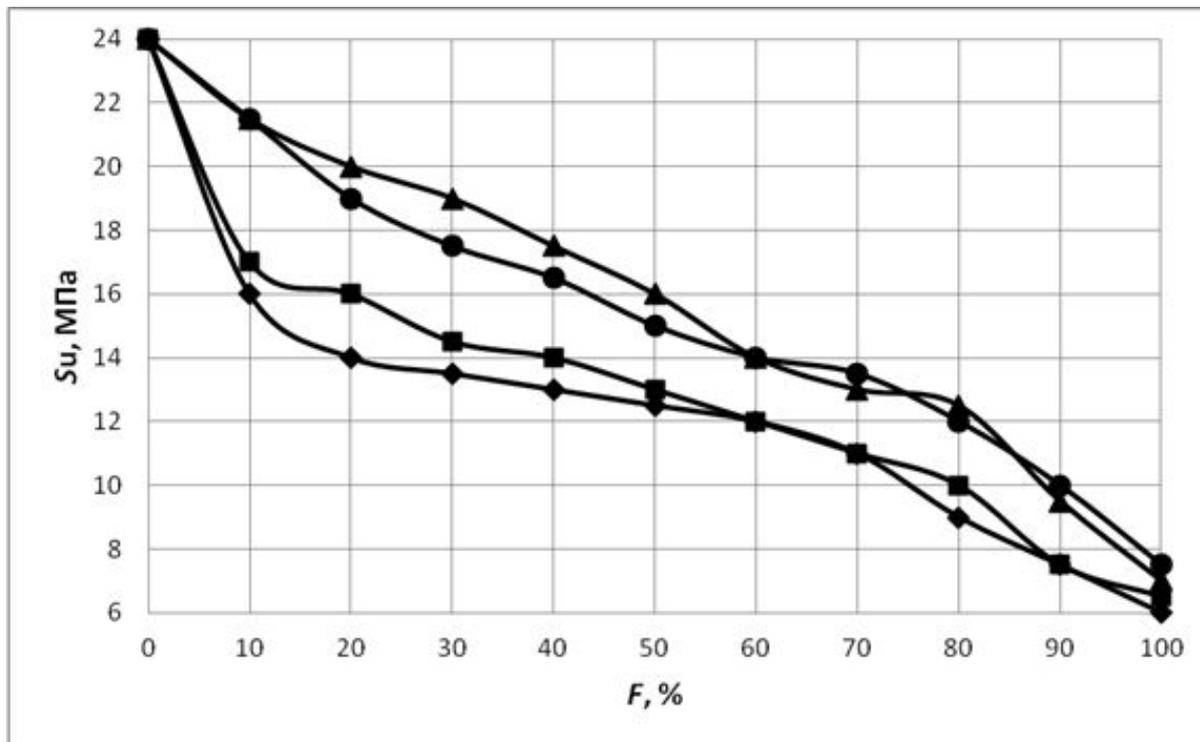
«квадрат» - угол поворота 0° ;

«ромб» - угол поворота 90° ;

«треугольник» - угол поворота = 180° .

Повороты осуществляли относительно длинной оси заготовки

Функция распределения интенсивности остаточных напряжений по объему образца

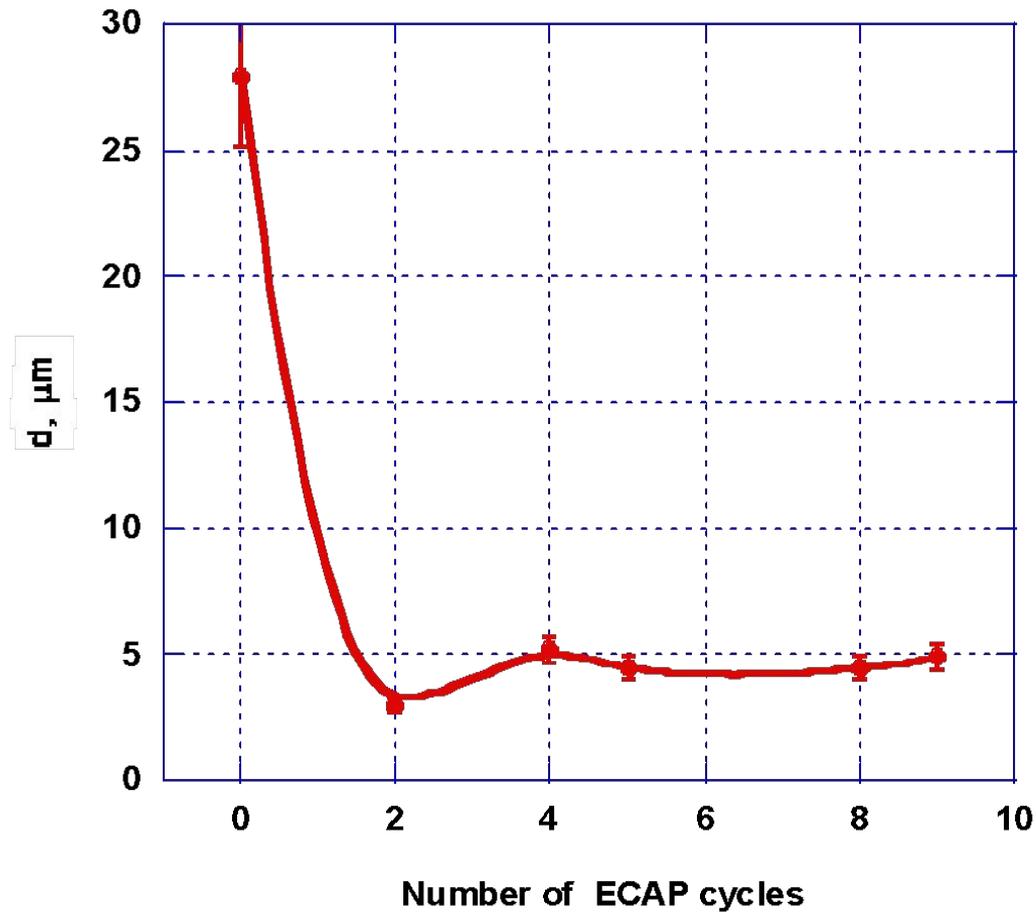


1-й проход: «ромб»

2-й проход: «квадрат» - угол поворота = 180° ;
«треугольник» - угол поворота = 90° ;

3-й проход: «круг» - угол поворота = 90°

Влияние числа циклов деформации РКУП на размер зерна (d) сплава AZ31



Температура РКУП 200 °C

Оценка роста температуры заготовки в ходе операции РКУП

В адиабатическом приближении $\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_T W$

В терминах приращений при условии постоянства плотности и удельной теплоемкости

$$\rho c \Delta T = k_T \Delta W = k_T \int \sigma_u d\varepsilon_u$$

Температура рекристаллизации магниевых сплавов $T_r = 183\text{--}257\text{ }^\circ\text{C}$. $\Delta T = 43\text{--}48\text{ }^\circ\text{C}$

Для осуществления режима холодной деформации необходимо учитывать выделяемое тепло

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен способ оценки уровня накопленной в процессе РКУП деформации.
2. Показано, что с увеличением количества циклов РКУП происходит накопление остаточной деформации в образце (с постепенным затуханием), распределенной в нем весьма неравномерно.
3. Обоснована рациональная, с точки зрения эффективного поглощения водорода, схема реализации РКУП.

Часть исследований выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Пермского края (грант № С-26/211)

***Благодарю
за внимание!***