

Национальный исследовательский ядерный университет  
МИФИ

Физико-технический факультет

Кафедра №9 «Физические проблемы материаловедения»

# Обоснование выбора материала для отражателя нейтронов на основе бериллия

Выполнила студентка: Голышко Е.А.

Преподаватель: Тенишев А.В.

Москва 2012 г.

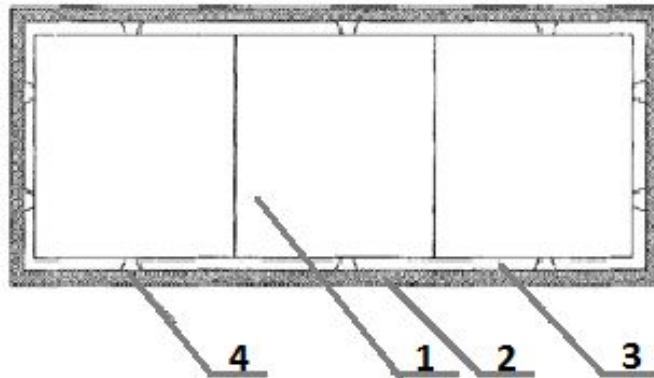
# Исходные данные

№ варианта	Основа материала	Характеристика материала	Назначение материала	Условия работы материала					
				Время работы	Т, °С	$\sigma_p$ , МПа	Среда	Нейтроны, $10^{19}$ н/(м <sup>2</sup> ·с)	
								быстрые	тепловые
2.2.9	Ве	Сплав	Отражатель нейтронов	40 лет	250	300	Эвтектика Pb-Bi	$\Phi_{62}=2,6$	$\Phi_{T2}=0,5$

Целевое задание: регулирование и особенности рекристаллизации сплавов

# Описание конструкционного элемента

- Отражатель нейтронов:



- 1 - бериллиевый блок
- 2 - герметичный чехол
- 3 - зазор
- 4 - дистанционаторы

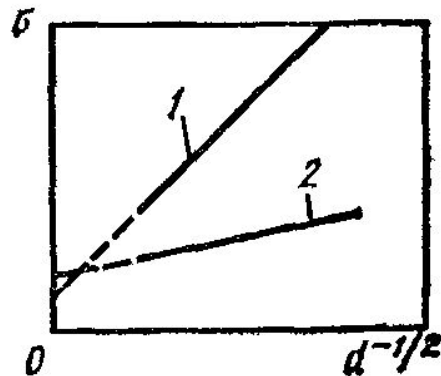
Отражатель нейтронов – это слой вещества, окружающий активную зону ядерного реактора и служащий для уменьшения утечки нейтронов из активной зоны. Отражатель нейтронов позволяет уменьшить критическую массу делящегося вещества и увеличить съём мощности с единицы объема активной зоны.

# Характеристика бериллия

$\rho, 10^3 \text{ кг/м}^3$	$\sigma_{\text{в}}, \text{ МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{ МПа}$	$\delta, \%$	$E, \text{ ГПа}$	$\text{НВ}, \text{ МПа}$
1,85	588-637	245-588	4-12	275-363	490-900

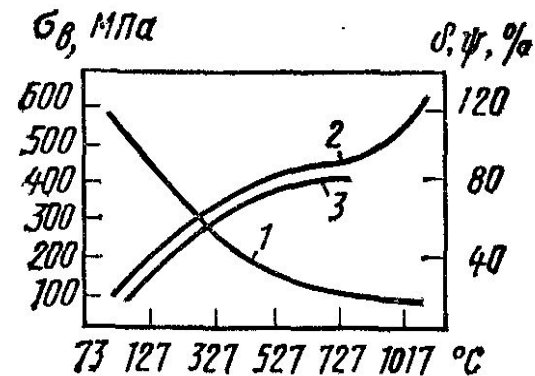
$T_{\text{пл}} = 1284^\circ\text{C}$

Бериллий имеет полиморфное превращение при  $T_{\text{пл}} = 1245^\circ\text{C}$



Зависимость прочностных свойств от размера зерна.

- 1 – разрушающие напряжения
- 2 – предел текучести



Зависимость механических свойств мелкозернистого бериллия от температуры.

- 1 – предел прочности при разрушении
- 2 – удлинение
- 3 – поперечное сужение

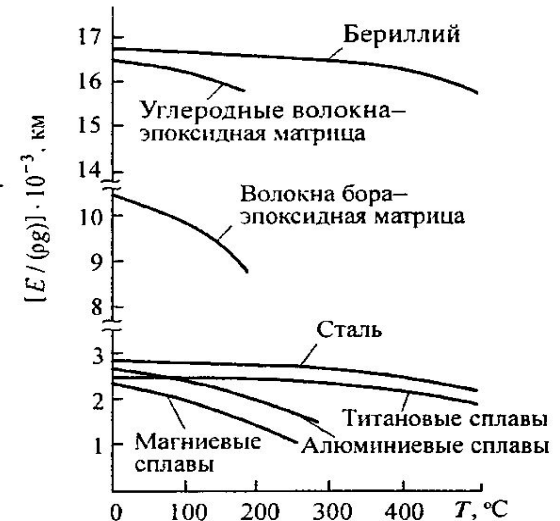
# Характеристика бериллия (продолжение)

Достоинства бериллия:

- Высокая удельная прочность и жесткость
- Высокая теплопроводность и теплоемкость
- Большая теплопоглощающая способность
- Высокие ядерные характеристики

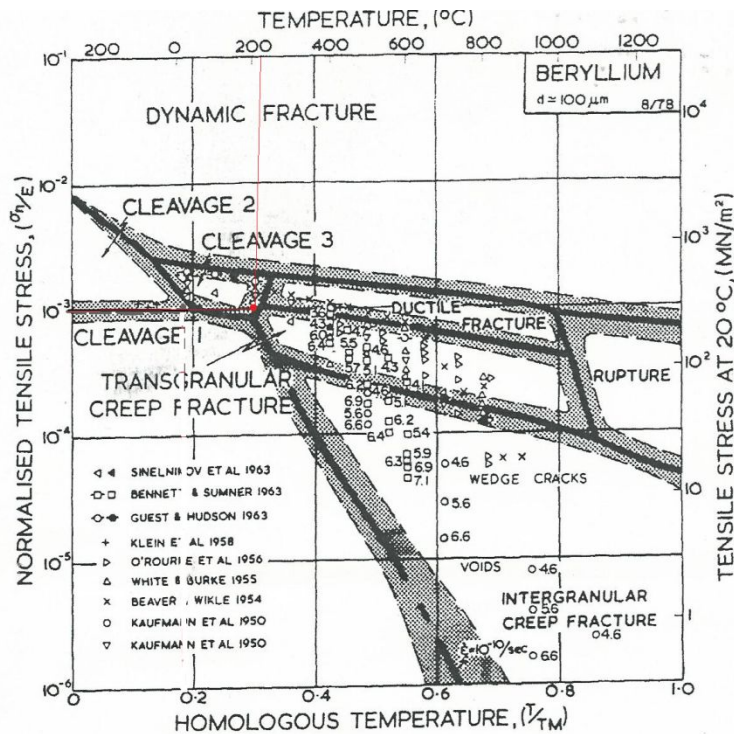
Недостатки бериллия:

- Хрупкость
- Токсичность
- Дефицитность



По удельной жесткости  $Be$  превосходит все металлы и сохраняет это свойство до  $500-600^\circ\text{C}$

# Анализ исходных данных



Рабочая температура:  $T_p = 523 \text{ K}$   
 Температура плавления:  $T_{пл} = 1553 \text{ K}$   
 $T_p/T_{пл} = a = 0,34$

$$\sigma_p = 300 \text{ МПа}$$

$$E = 302 \text{ ГПа}$$

$$\sigma_p/E = 0.99 \cdot 10^{-3}$$

Основной механизм деформации –  
 дислокационная ползучесть

# Требования к свойствам материала

$$\begin{aligned} \sigma_{\rho}^{\text{Tp}} &= 300 \text{ МПа} \\ \sigma_{\text{B}}^{\text{Tp}} &= 700 \text{ МПа} & n_{\text{B}} \cdot \sigma_{\rho}^{\text{Tp}} &= 750 \text{ МПа} \\ \sigma_{0,2}^{\text{Tp}} &= 680 \text{ МПа} & n_{0,2} \cdot \sigma_{\rho}^{\text{Tp}} &= 450 \text{ МПа} \end{aligned}$$

заданная основа обеспечит необходимую прочность, но она не обладает необходимой пластичностью.

Повышения пластичности основы:

легирование;

термомеханическая обработка (спекание, обработка давлением).

**Флюенс быстрых и тепловых нейтронов:**

$$\varphi_{\text{ТН}} = 0.5 \cdot 10^{19} \text{ н}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$$

$$\varphi_{\text{бН}} = 2.6 \cdot 10^{19} \text{ н}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$$

$$t = 40 \text{ лет}$$

$$\Phi_{\text{ТН}} = 0.5 \cdot 10^{19} \cdot 40 \cdot 364 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ н}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) = 6.3 \cdot 10^{27} \text{ н}/\text{м}^2$$

$$\Phi_{\text{бН}} = 2.6 \cdot 10^{19} \cdot 40 \cdot 364 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ н}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) = 3.2 \cdot 10^{28} \text{ н}/\text{м}^2$$

# Влияние облучения

Рабочая температура составляет  $0,34 * T_{пл}$

Будет наблюдаться:

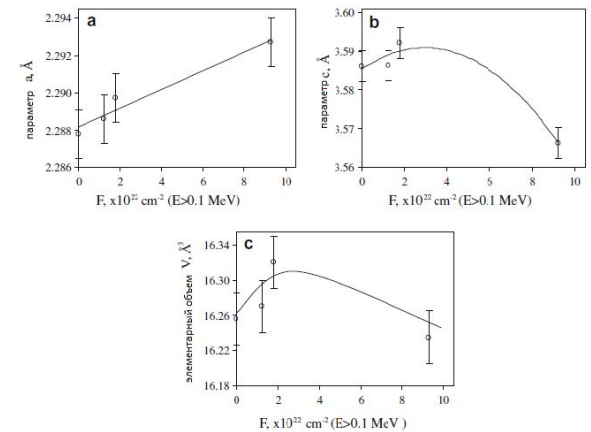
- НТРО (при  $T < (0,3-0,4) T_{пл}$ )
- Радиационное распухание (от 0,2 до 0,55)
- Радиационный рост и ползучесть ( $T < 0,5$

$T_{пл}$ ) условия облучения и содержание гелия в облученном бериллии

Исходный Ве	Интегральный поток, н/м <sup>2</sup>	t, °C	Содержание гелия, ат.%
Горяче-прессованный	$2,75 * 10^{26}$	280-480	0,32-0,4
Экструдированный	$1,86 * 10^{25}$	100	0,027
Прессованный, экструдированный, прокатанный	$(1,3 - 6) * 10^{25}$	60-780	0,019-0,09
Спеченный и экструдированный	$(5,5 - 9) * 10^{25}$	450-650	0,079 - 0,11

Характеристика требуемого материала:

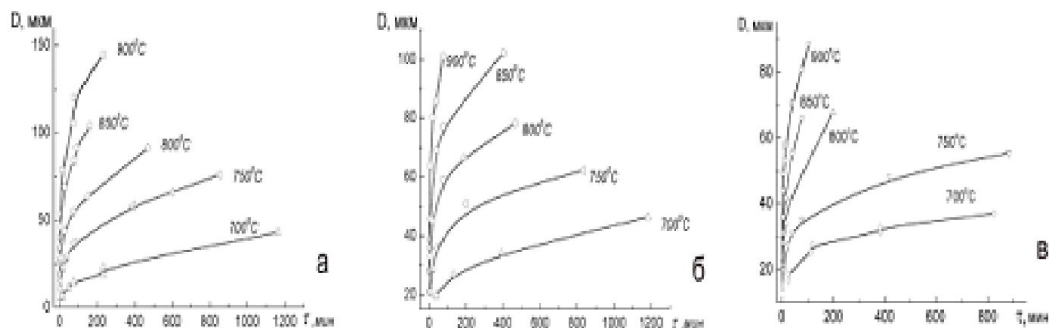
- жаропрочностью;
- радиационной стойкостью;
- технологичностью (обработка давлением);
- термостойкостью.



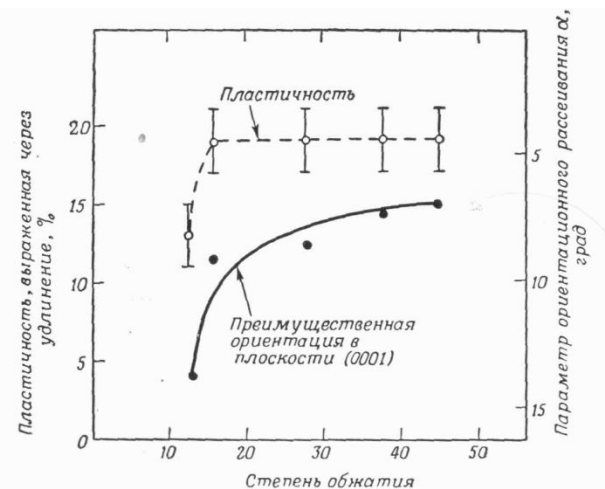
Зависимость роста кристаллической решетки бериллия от флюенса нейтронов при 200С



# Исследование особенности рекристаллизации сплава и регулирования рекристаллизации в бериллиевых сплавах



Зависимость размера зерна от продолжительности отжига при разных температурах для гидроэкструдированного бериллия со степенью деформации (а) 40%, (б) 82%, (в) 92%



Влияние степени обжатия на относительное удлинение бериллиевых прутков, выдавленных при температуре 1070°C

Выбран наиболее простой технологический прием повышения пластичности Be - применение выдавливания и выдавливания в сочетании с прокаткой. Однако, при заданной температуре будет наблюдаться радиационная ползучесть. Повысить сопротивление ползучести сплава можно упрочнением дисперсными частицами нерастворимых соединений BeO.

# Выбор легирующего комплекса

## Кислород:

Прочность горячепрессованного бериллия с различным содержанием BeO

C <sub>BeO</sub> , %	σ <sub>в</sub> , МПа	
	20°С	800°С
0,1-0,3	192	250
0,8-1,3	324	400
5,5	422	500

Легирующие BeO повышает:

- Сопротивление ползучести
- Жаропрочность
- Длительную прочность

## Хром:

Легирующие хромом ~0,1% улучшает:

- радиационную стойкость бериллия
- повышает жаропрочность.

Покрытие бериллиевых порошков хромом:

существенно улучшает механические свойства прессованных из таких порошков изделий.

Cr присутствует в виде соединения CrBe<sub>12</sub>.

Свойства прессованного бериллия, полученного из порошков с хромовым покрытием

Материал	σ <sub>дл</sub> , МПа	σ <sub>0,2</sub> , МПа	δ, %	E, 10 <sup>7</sup> МПа
Be+0,3%Cr	720	618	4	3,7-3,8
Be	478	341	2-4	2,9-3,1

# Выбор легирующего комплекса (продолжение)

## Кальций:

Наличие включений  $Be_{13}Ca$  влияет на:

- свойства границ зерен
- уменьшает скорость взаимодействия по границам.
- Добавление кальция  $\sim 0,5\%$  уменьшает диаметр пузырей гелия, образующихся при облучении.
- Ca не ухудшает механических характеристик бериллия.

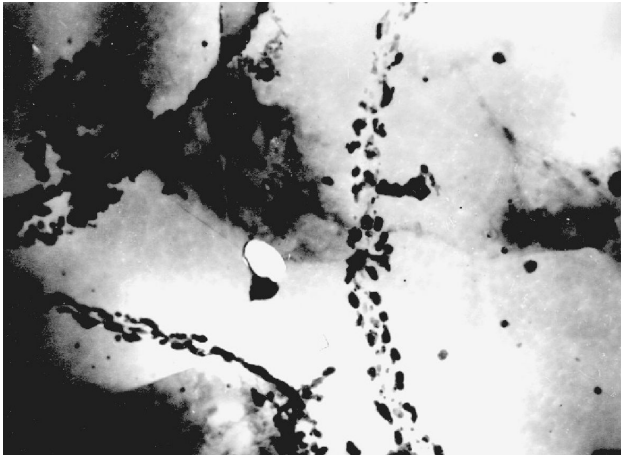


Свойства листов сплавов Ве-Са, полученных ковкой при температуре 1050°C и последующей прокаткой слитков при температуре 950-800°C

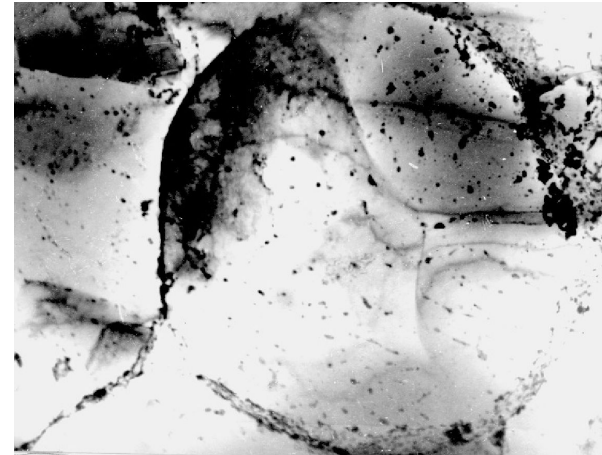
$C_{Ca}, \%$	$T_{исп}, ^\circ C$	$\sigma_B, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\delta, \%$	$\psi, \%$
0,016	20	308	238	2	12
	400	170	146	44	56
	600	120	112	20	36
	700	52	39	28	37
0,11	20	205	179	2	8
	400	137	102	34	44
	600	99	83	16	25
	700	46	41	21	25
0,29	20	249	225	2	15
	400	165	151	28	50
	600	134	118	21	36
	700	69	61	31	27

Предлагаемый состав сплава **Ве+3%ВеО+0,4%Са+0,1%Cr**

# Стабилизация структурно-фазового состояния



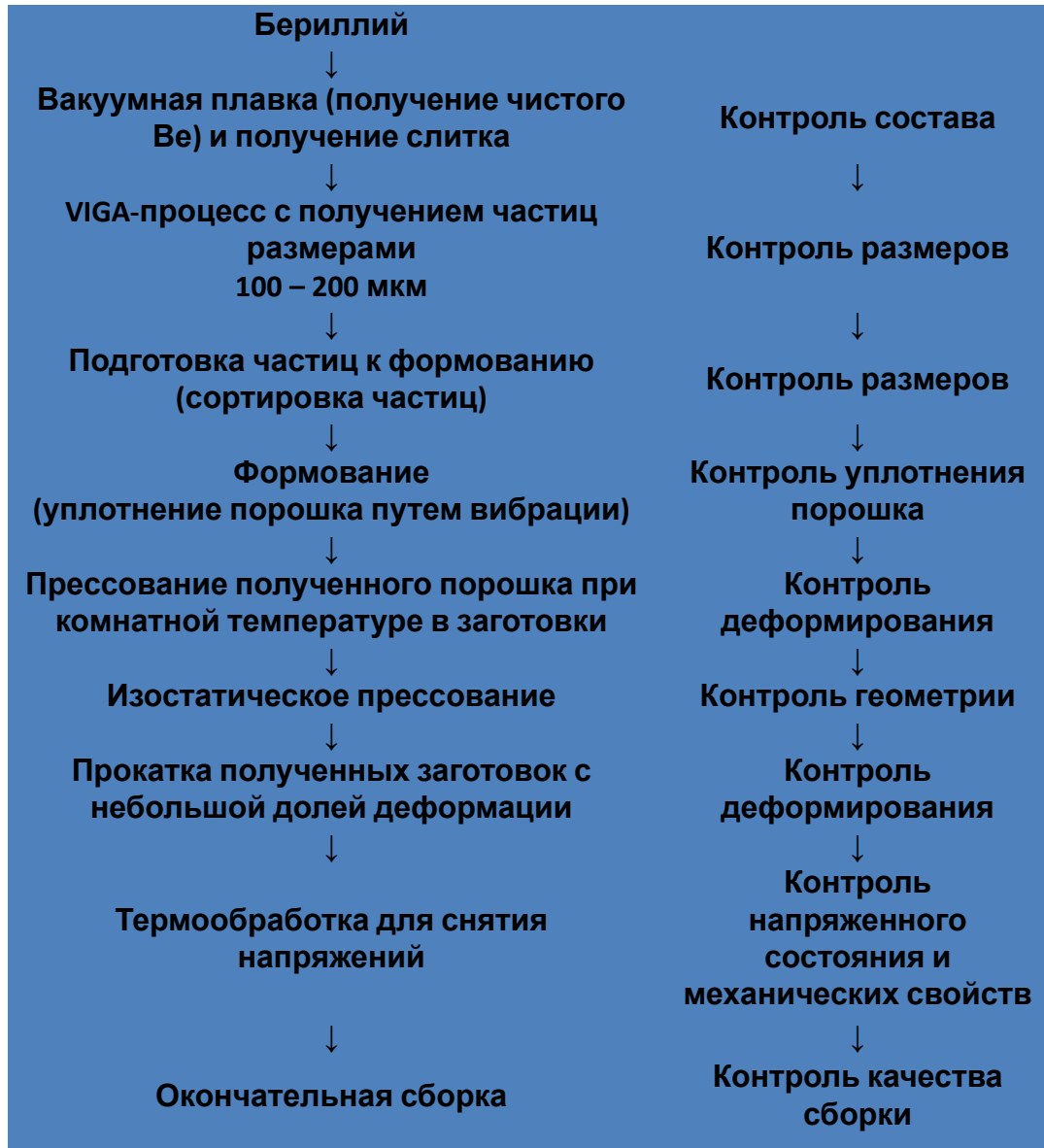
Распределение частиц  
BeO по границам зерен,  
x12000



Частицы интерметаллида  
 $\text{CrBe}_{12}$  в структуре  
изостатически обработанного  
бериллия, x5000

Для стабилизации структурно-фазового состояния предлагается провести отжиг при температуре 900°C.

# Схема технологического цикла



# Выводы

- На основе анализа конструкции отражателя нейтронов и заданных условий эксплуатации сформулирована характеристика материала. Материал должен обладать: жаропрочностью, термостойкостью, радиационной стойкостью, технологичностью.
- Разработан материал, подвергнутый деформированию и отжигу, удовлетворяющий требованиям, заявленным в задании. Состав сплава материала:  $\text{Be}+3\%\text{BeO}+0,4\%\text{Ca}+0,1\%\text{Cr}$ . Характеристики сплава при рабочих температурах:  $\sigma_{\text{в}} \sim 700$  Мпа,  $\sigma_{0.2} \sim 650$ .
- Для обеспечения стабильности структурно фазового состояния применяется отжиг на протяжении 100 минут при температуре  $900^{\circ}\text{C}$ .
- Предложена технология изготовления блока для бериллиевого отражателя нейтронов. Оптимальной технологией является порошковая металлургия. С использованием VIGA-процесса для получения сферических частиц, и последующее изостатическое прессование.

**Спасибо за внимание!**