

Расчет многоволоконных сборок сверхпроводников

Выбор исходных параметров

Диаметр проводника (d_p)

- определяется заказчиком под конкретную магнитную систему
- влияет на механическую прочность сверхпроводника
- его увеличение способствует увеличению критического тока, но, как правило, уменьшению критической плотности тока

Коэффициент заполнения по медной стабилизации (K_{cu})

- определяется заказчиком в зависимости от особенностей конкретной магнитной системы (к примеру, наличие общей стабилизации всей обмотки)
- влияет на стабильность протекания тока в проводнике, предохраняет проводник от скачков магнитного потока
- влияет на механическую прочность сверхпроводника (особенно при включении в стабилизацию упрочняющих элементов)

Выбор исходных параметров

Диаметр волокна ($d_{\text{вол}}$)

- одна из основных характеристик многоволоконного сверхпроводника
- влияет на количество сверхпроводящей фазы в готовом проводнике (за счет особенностей кинетики роста Nb_3Sn слоя волокна больше 3 -3,5 мкм в диаметре не могут быть полностью проработаны), а, следовательно, на его токонесущую способность
- влияет на морфологию зеренной структуры сверхпроводящей фазы в готовом сверхпроводнике
- неполная проработка волокна может способствовать релаксации напряжений в сверхпроводящей фазе

Коэффициент заполнения проводника материалом барьера (K_g)

- чрезмерное утончение барьера чревато его разрывом в ходе деформации
- влияет на механическую прочность сверхпроводника, может служить упрочняющим элементом

Выбор исходных параметров

Концентрация олова в бронзе матрицы (K_{Sn})

- влияет на степень проработки волокна при диффузионном отжиге проводника, а, следовательно, на его токонесущую способность
- влияет на кинетику роста сверхпроводящей фазы
- влияет на пластичность и деформируемость бронзы (при высоких концентрациях деформацию просто не возможна, бронза растрескивается, проводник рвется)

Диаметр чехлов для первой и второй многоволоконных сборок ($d_{вол}$)

- определяется доступным диаметром контейнера под выдавливание (50, 75, 100, 130 мм)
- определяет количество получаемого в результате сверхпроводника (в совокупности с высотой планируемой сборки)
- определяет размеры входящих в сборки элементов, а, следовательно, удобство сборки (крупные элементы удобнее собирать, чем мелкие)

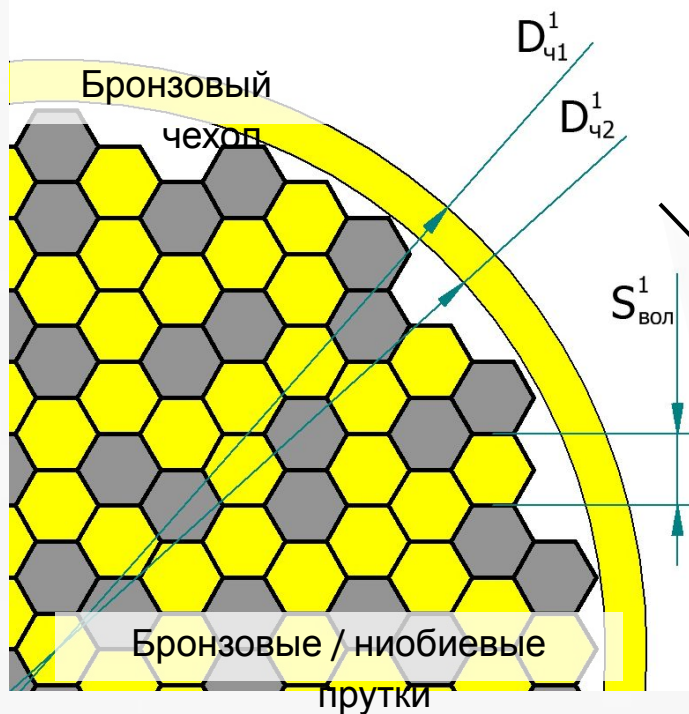
Припуски на кривизну прутков при сборке (δ^1, δ^2)

Параметры элементов сборки

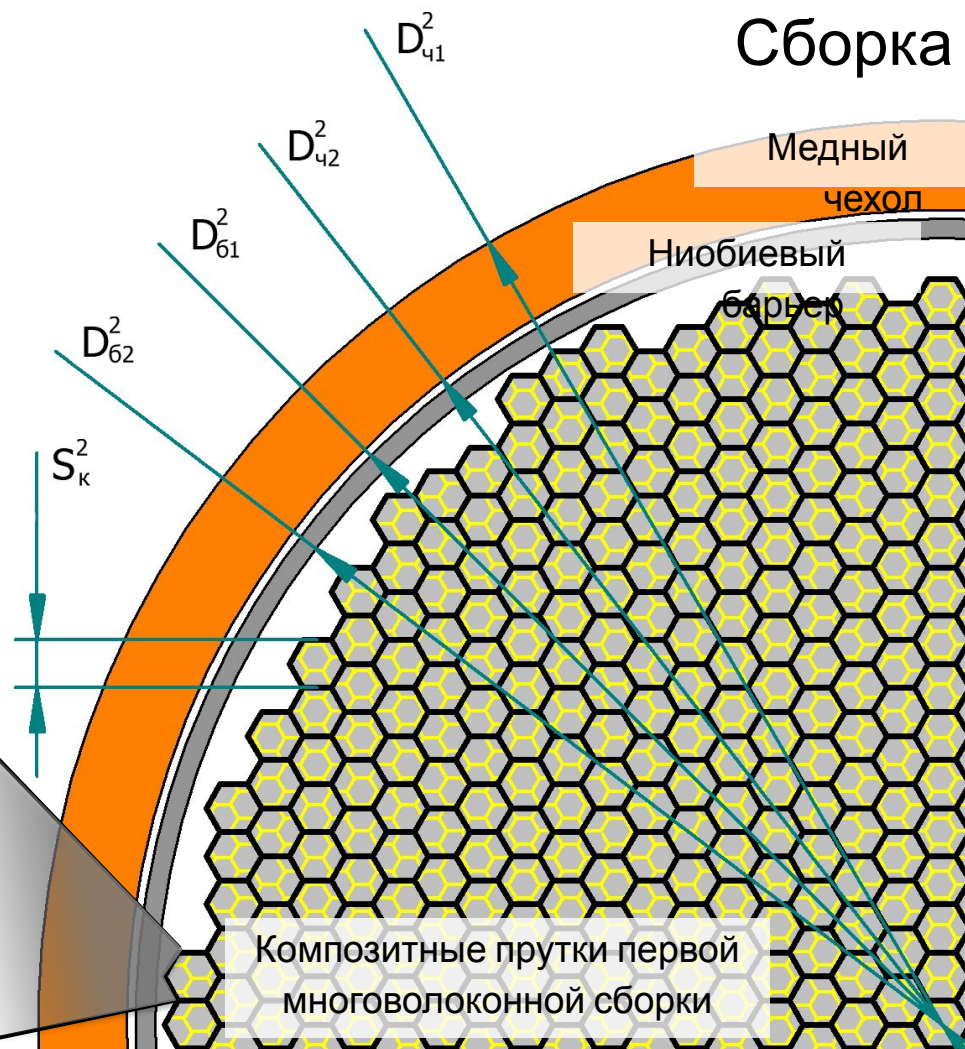
D – диаметр на этапе сборки

d – диаметр композите / готовом проводнике

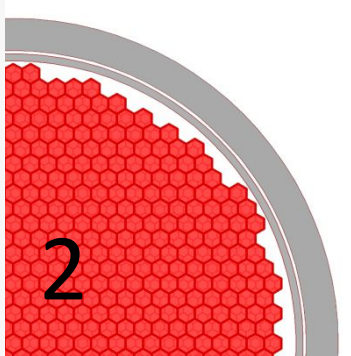
Сборка 1



Сборка 2



Расчет количества волокон



Площадь ядра (волокна + матрица) в готовом проводнике

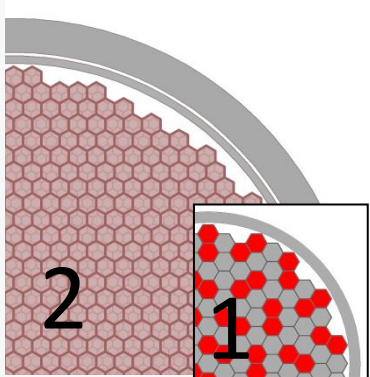
$$F_{\text{ядр}} = F_{\text{п}} K_{\text{ядр}} = \frac{\pi(d_{\text{п}})^2}{4} (1 - K_{\text{Сш}} - K_{\text{б}})$$

Площадь волокон в готовом проводнике

$$\frac{F_{\text{вол}}}{F_{\text{Sn}}} = \frac{3}{1} = \frac{F_{\text{вол}}}{F_{\text{Бр}} K_{\text{Sn}}}$$

$$F_{\text{вол}} = 3F_{\text{Бр}} K_{\text{Sn}} = 3K_{\text{Sn}} (F_{\text{ядр}} - F_{\text{вол}})$$

$$F_{\text{вол}} = \frac{3K_{\text{Sn}}}{1 + 3K_{\text{Sn}}} F_{\text{ядр}}$$



Коэффициент заполнения по ниобию (волокнам)

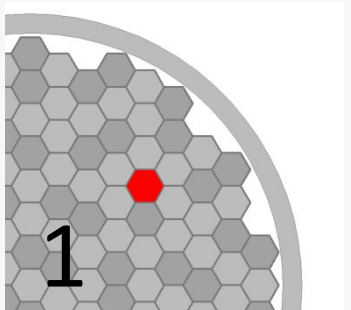
$$K_{\text{Nb (расч)}} = \frac{3K_{\text{Sn}}}{1 + 3K_{\text{Sn}}}$$

Площадь одного волокна в готовом проводнике

$$F_{1\text{вол}} = \frac{\pi(d_{\text{вол}})^2}{4}$$

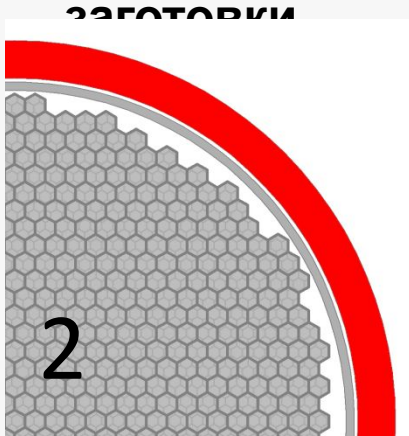
Расчетное количество волокон в проводнике

$$n_{\text{вол(расч)}} = \frac{F_{\text{вол}}}{F_{1\text{вол}}}$$



Расчет чехлов и барьеров многоволоконных заготовок

Расчет внутреннего диаметра медного чехла второй многоволоконной заготовки



Площадь медной стабилизации в готовом проводнике

$$F_{Cu} = \frac{\pi(d_n)^2}{4} - \frac{\pi(d_{ч2}^2)^2}{4} = \frac{\pi(d_n)^2}{4} K_{Cu}$$

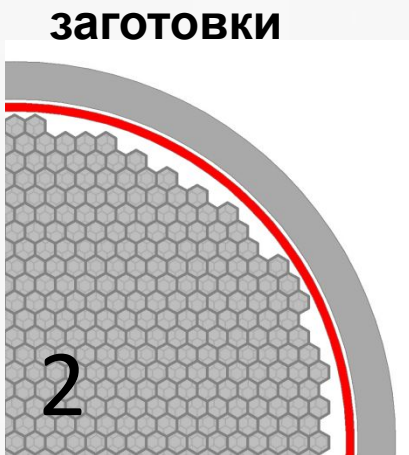
Внутренний диаметр медной стабилизации в готовом проводнике

$$d_{ч2}^2 = d_n \sqrt{1 - K_{Cu}}$$

Внутренний диаметр медного чехла второй многоволоконной сборки

$$D_{ч2}^2 = \frac{D_{ч1}^2 \cdot d_{ч2}^2}{d_n}$$

Расчет внутреннего диаметра ниобиевого барьера второй многоволоконной заготовки



Площадь ниобиевого барьера в готовом проводнике

$$F_{Cu} = \frac{\pi(d_{б1}^2)^2}{4} - \frac{\pi(d_{б2}^2)^2}{4} = \frac{\pi(d_n)^2}{4} K_b \quad d_{б1}^2 = d_{ч2}^2$$

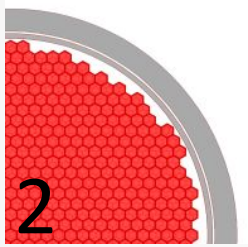
Внутренний диаметр ниобиевого барьера в готовом проводнике

$$d_{б2}^2 = \sqrt{(d_{б1}^2)^2 - (d_n)^2 K_b}$$

Внутренний диаметр ниобиевого барьера второй многоволоконной сборки

$$D_{б2}^2 = \frac{D_{ч1}^2 \cdot d_{б2}^2}{d_n}$$

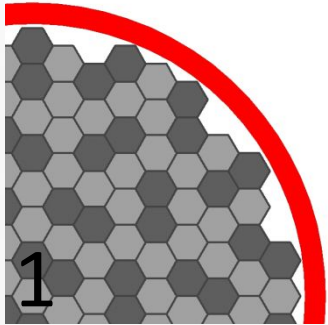
Расчет чехлов и барьеров многоволоконных заготовок



Диаметр ядра (волокна + матрица) второй многоволоконной заготовки

$$D_{\text{ядр}}^2 = D_{\text{б2}}^2 - \delta^2$$

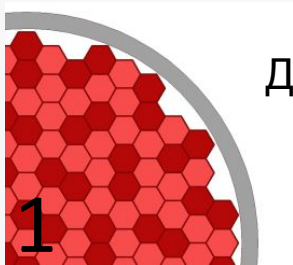
Выбор внутреннего диаметра бронзового чехла первой многоволоконной заготовки



Толщина бронзового чехла $t_{\text{ч}}^1$ влияет на равномерность расположения волокон в проводнике и:

- выбирается большей для разделения групп волокон
- выбирается меньшей для равномерного распределения волокон в матрице, однако ограничивается технологическими возможностями – тонкостенную трубную заготовку сложнее изготовить

$$D_{\text{ч2}}^1 = D_{\text{ч1}}^1 - t_{\text{ч}}^1$$

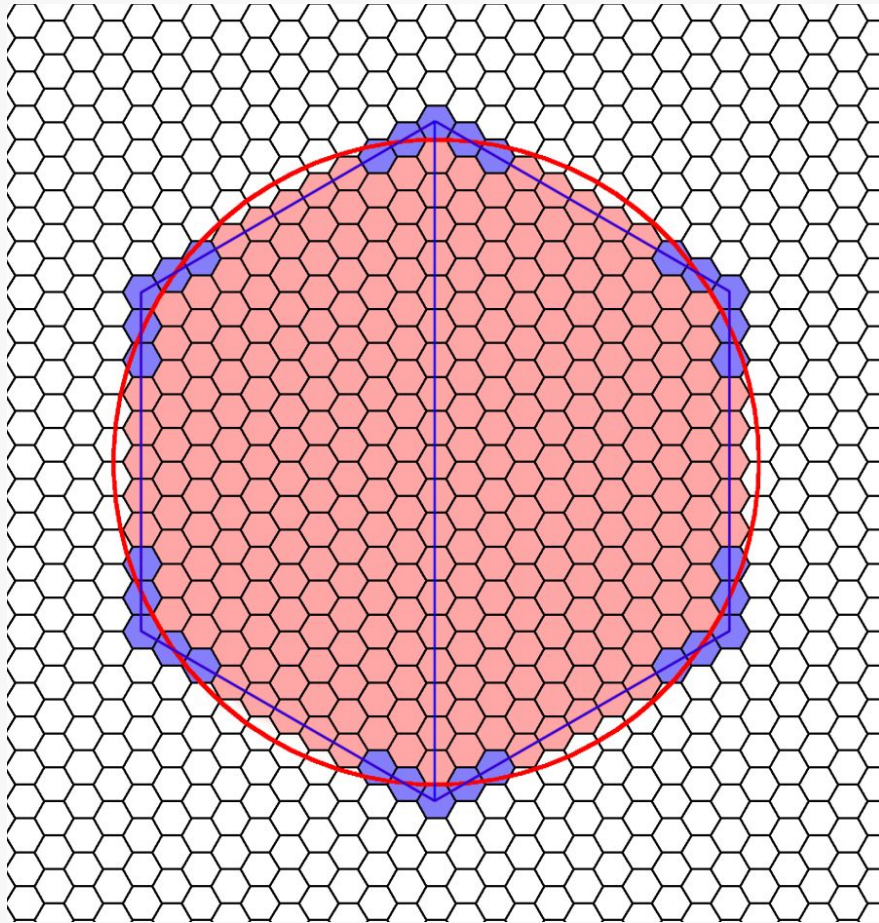


Диаметр ядра (волокна + матрица) первой многоволоконной заготовки

$$D_{\text{ядр}}^1 = D_{\text{ч2}}^1 - \delta^1$$

Расчет конструкций первой и второй многоволоконных заготовок

Выбор конструкции второй многоволоконной сборки



- Расчет количества композитных шестигранных прутков в составе второй много(n_k^2)волоконной сборки

$$n_{\text{прут}}^1 \approx \frac{n_{\text{вол(расч)}}}{K_{Nb(\text{расч})} \cdot n_k^2} \approx 100 - 200$$

Количество шестигранников в полном «цветке»

$$n = 1 + \frac{3}{4}(l^2 - 1) \quad , \text{где } l - \text{ количество шестигранников на главной вертикали}$$

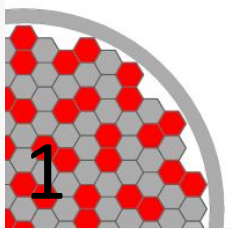
$$n_k^2 = n - 6 * n_{\text{угл}}$$

- Расчет размера «под ключ» композитных шестигранных прутко S_k^2

$$S_k^2 = f(D_{\text{кern}}^2, n_k^2)$$

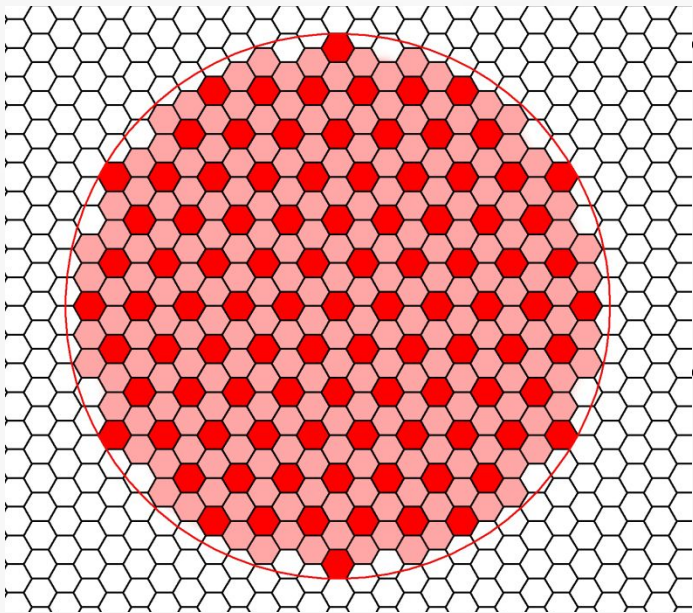
Расчет конструкций первой и второй многоволоконных заготовок

Расчет количества прутков в первой многоволоконной сборке



$$n_{\text{прут}}^1(\text{расч}) \approx \frac{n_{\text{вол}}(\text{расч})}{K_{Nb}(\text{расч}) \cdot n_{\text{к}}^2}$$

Выбор конструкции первой многоволоконной сборки



- Расчет количества шестигранных прутков волокон в составе первой многоволоконной сборки $n_{\text{прут}}^1$

$$n_{\text{прут}}^1 \approx n_{\text{прут}}^1(\text{расч})$$

$$n_{\text{вол}}^1 \approx \frac{n_{\text{вол}}(\text{расч})}{n_{\text{к}}^2}$$

- Расчет размера «под ключ» шестигранных прутков $S_{\text{вол}}^1$

$$S_{\text{вол}}^1 = f(D_{\text{кern}}^1, n_{\text{прут}}^1)$$

Расчет точных значений параметров сверхпроводника

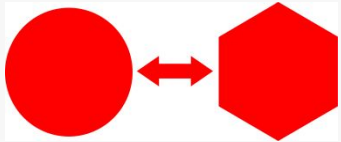
Количество волокон в проводнике

$$n_{\text{вол(точн)}} = n_{\text{вол}}^1 \cdot n_{\text{к}}^2$$

Расчет диаметра волокна в готовом сверхпроводнике

Соотношение первой сборки $\frac{d_{\text{вол(точн)}}}{d_{\text{к}}} = \frac{D_{\text{вол}}^1}{D_{\text{ч1}}^1}$

Соотношение второй сборки: $\frac{d_{\text{к}}}{d_{\text{п}}} = \frac{D_{\text{к}}^2}{D_{\text{ч1}}^2}$



$$F_{\text{круг}} = \frac{\pi(D)^2}{4} = F_{\text{шестигр.}} = \cos(30^\circ) \cdot S^2$$

$$D = 1,05 \cdot S$$

Точный диаметр волокна: $d_{\text{вол(точн)}} = \frac{d_{\text{к}} \cdot D_{\text{вол}}^1}{D_{\text{ч1}}^1} = \frac{d_{\text{п}} \cdot D_{\text{вол}}^1 \cdot D_{\text{к}}^2}{D_{\text{ч1}}^1 \cdot D_{\text{ч1}}^2} = 1,102 \frac{d_{\text{п}} \cdot S_{\text{вол}}^1 \cdot S_{\text{к}}^2}{D_{\text{ч1}}^1 \cdot D_{\text{ч1}}^2}$

Расчет коэффициента заполнения по ниобию (волокнам):

$$K_{\text{Nb(точн)}} = \frac{F_{\text{Nb}}}{F_{\text{Бр прут}} + F_{\text{Бр чех}}} = \frac{n_{\text{вол}}^1 \cdot F_{\text{вол}}^1}{(n_{\text{прут}}^1 - n_{\text{вол}}^1) \cdot F_{\text{вол}}^1 + \frac{\pi((D_{\text{ч1}}^1)^2 - (D_{\text{ч2}}^1)^2)}{4}} = \frac{0,866 \cdot n_{\text{вол}}^1 \cdot (S_{\text{вол}}^1)^2}{0,866 \cdot (S_{\text{вол}}^1)^2 \cdot (n_{\text{прут}}^1 - n_{\text{вол}}^1) + \frac{\pi((D_{\text{ч1}}^1)^2 - (D_{\text{ч2}}^1)^2)}{4}}$$

Опущенные нюансы расчета сборок

В описанном методе расчета не принимались во внимание следующие особенности реальныхборок:

- наличие танталовых вставок – разделителей
- необходимость использования композитных / бронзовых заполнителей
- не учитывалось, что «цветок» заполняет не весь керн и имеются пустоты
- не учитывались технологические припуски на обточку, промежуточное травление
- при оценке количества волокон не учитывалась толщина бронзового чехла первой сборки