

# Měkké / tvrdé pájení pro COMPASS-U

Petr Bartoň, Jaroslav Krbec a COMPASS-U tým

Tento dokument byl připraven a zveřejněn pro potřeby předběžných tržních konzultací předcházejících výrobě tokamaku COMPASS-U. Reflektuje aktuální stav návrhu systému. Tento dokument neobsahuje nic právně závazného.

<b>Version</b>	<b>Published</b>	<b>Changes</b>
1.0	21. 10. 2020	Initial revision

- Obecné informace o projektu COMPASS-U
- Popis jednotlivých pájených spojů

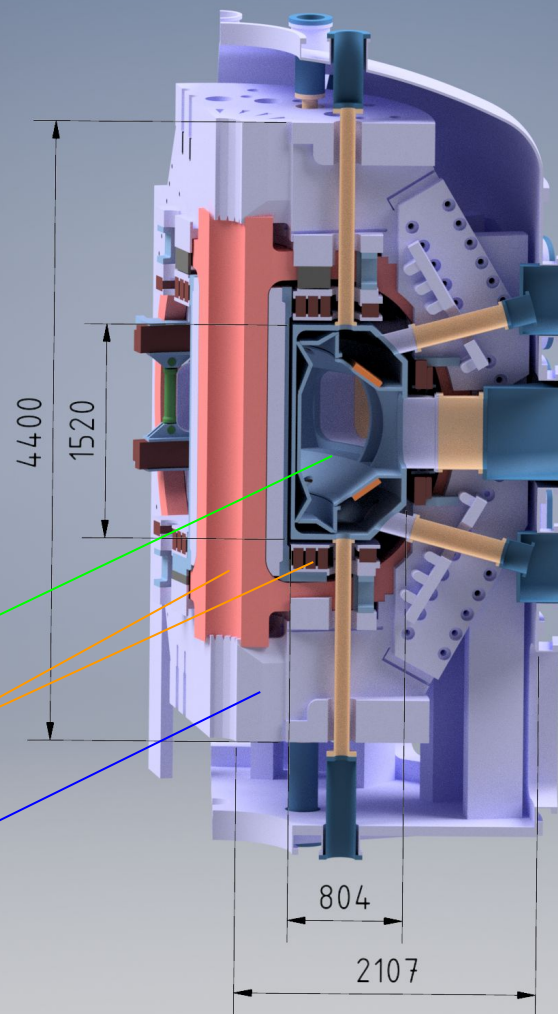
<b>Strana</b>	<b>Proces</b>	<b>Materiál</b>	<b>Popis součástí</b>
6	tvrdé pájení	nerezová ocel	Chladicí trubky podpůrné struktury
11	tvrdé pájení	měď	Redukční koncovky na přívodech cívek polidálního pole (PF cívkách)
14	měkké pájení	měď	Chladicí trubky cívek toroidálního pole (TF cívek)
17	měkké pájení	postříbřená měď	Kluzné elementy TF cívek
20	tvrdé pájení	měď	Redukční koncovky na chladících trubkách TF cívek
23	měkké/tvrde pájení	měď	Elektrický přívod na závit TF cívky

- COMPASS-U bude nový **tokamak** - vědecké zařízení pro výzkum termonukleární fúze.
- Tokamaky fungují na principu udržení horkého plynu (resp. plazmatu) v magnetickém poli. To je tvořeno **měděnými cívkami**, uloženými v **masivní podpůrné konstrukci**.
- Aby bylo možné dosáhnout vysoké magnetické pole (v našem případě až 5 tesla), budou **cívky zchlazeny** na nízké teploty okolo  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Projekt je aktuálně ve fázi návrhu, cílem je mít COMPASS-U sestavený a oživený na konci roku 2023.

Reakční komora

Měděné cívky

Podpůrná konstrukce



Obr. 1.: Čtvrtina (řez) tokamaku COMPASS-U s vyznačenými rozměry

Pájení (jak tvrdé, tak měkké) se nám zdá jako výhodná technologie pro spojení více součástí uvnitř tokamaku. Protože však jde o nestandardní materiály a postupy, chceme zpracovat **kompletní výrobní dokumentaci postupu pájení**.

**Hlavní překážkou** bude u všech pájených spojů požadavek na **vakuovou kompatibilitu** (spoje nesmí zhoršovat vysoké vakuum, ve kterém budou provozovány, plyněním nebo netěsnostmi).

**Cílem této prezentace** je popsat pájené spoje a všechny okrajové podmínky tak, aby mohl být vyhotoven přesný technologický postup pro zapájení konkrétního dílu.

# **Tvrdé pájení chladičích trubek podpůrné struktury**

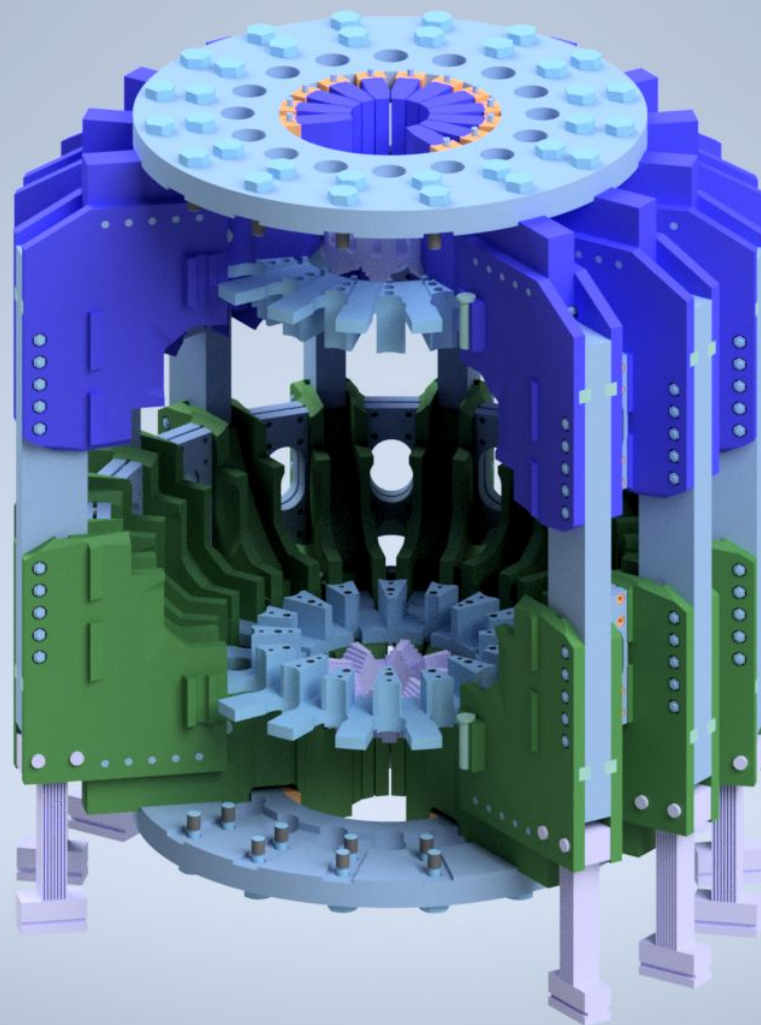
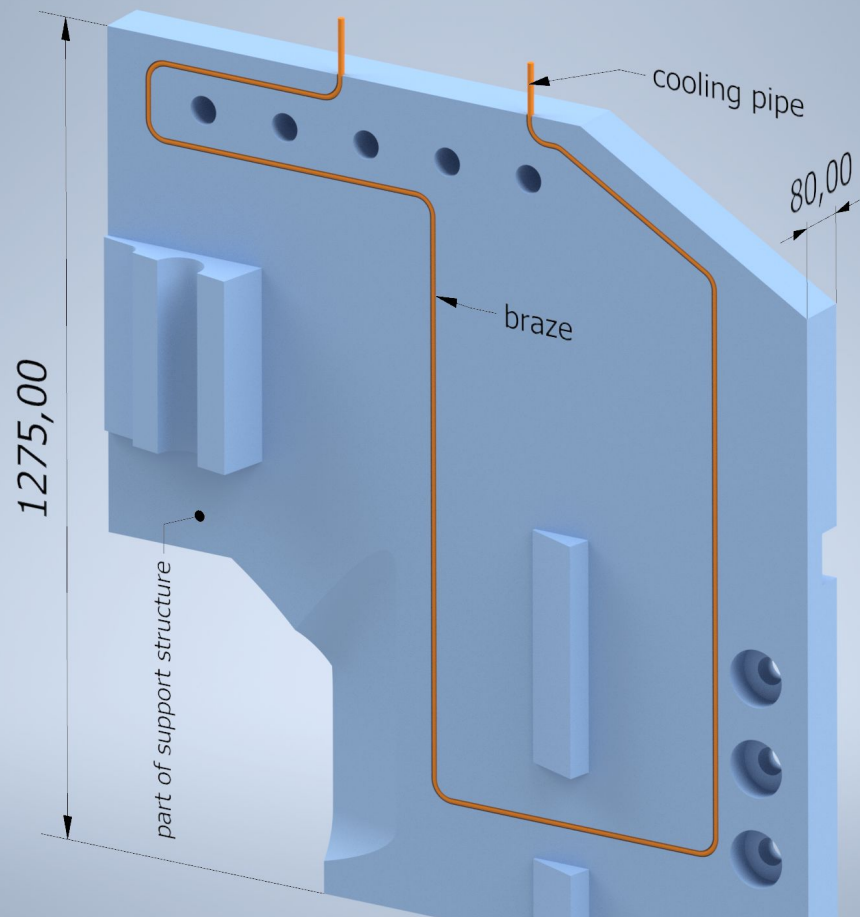
Podpůrná struktura je masivní montovaná sestava kovových dílů, jejichž úkolem je držet na místě měděné cívky tokamaku.

Do dílů podpůrné struktury je třeba **tvrdě zapájet nerezovou trubičku** rozvádějící chladivo. Požadavky na pájený spoj a technologické provedení vychází z vlastností podpůrné struktury:

Podpůrná struktura bude

- vyrobená z nerezové oceli (AISI 304LN / AISI 316LN)
  - Kvůli nárokům na pevnost bude ocel za studena válcovaná. Pájení tudíž **nesmí tepelně ovlivnit** příliš velkou oblast, aby nedošlo k přílišnému popuštění materiálu.
  - Použitá pájka **musí dobře smáčet nerez**.
- zchlazena na  $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$  spolu s měděnými cívkami
  - Použitá pájka **nesmí při této teplotě zkřehnout**.
- umístěna ve vakuu
  - Ultra-vysoké vakuum, požadované tlaky nižší než  $10^{-5}\text{ Pa}$
  - Tudíž při pájení **nesmí vzniknout žádné mrtvé prostory, kapiláry, póry** nebo oxidy zabudované v pájce.
  - Zároveň pájka **nesmí obsahovat kovy o vysokém tlaku nasycených par**, které se mohou ve vakuu odpařovat (zinek, kadmium...)
- mít jednotlivé díly o maximální velikosti  $\sim 2\text{ m}$  a váze  $\sim 5\text{ tun}$ 
  - Pájení musí být realizovatelné lokálně, například pomocí indukčního ohřevu, vodíkového plamene (ne v peci!).

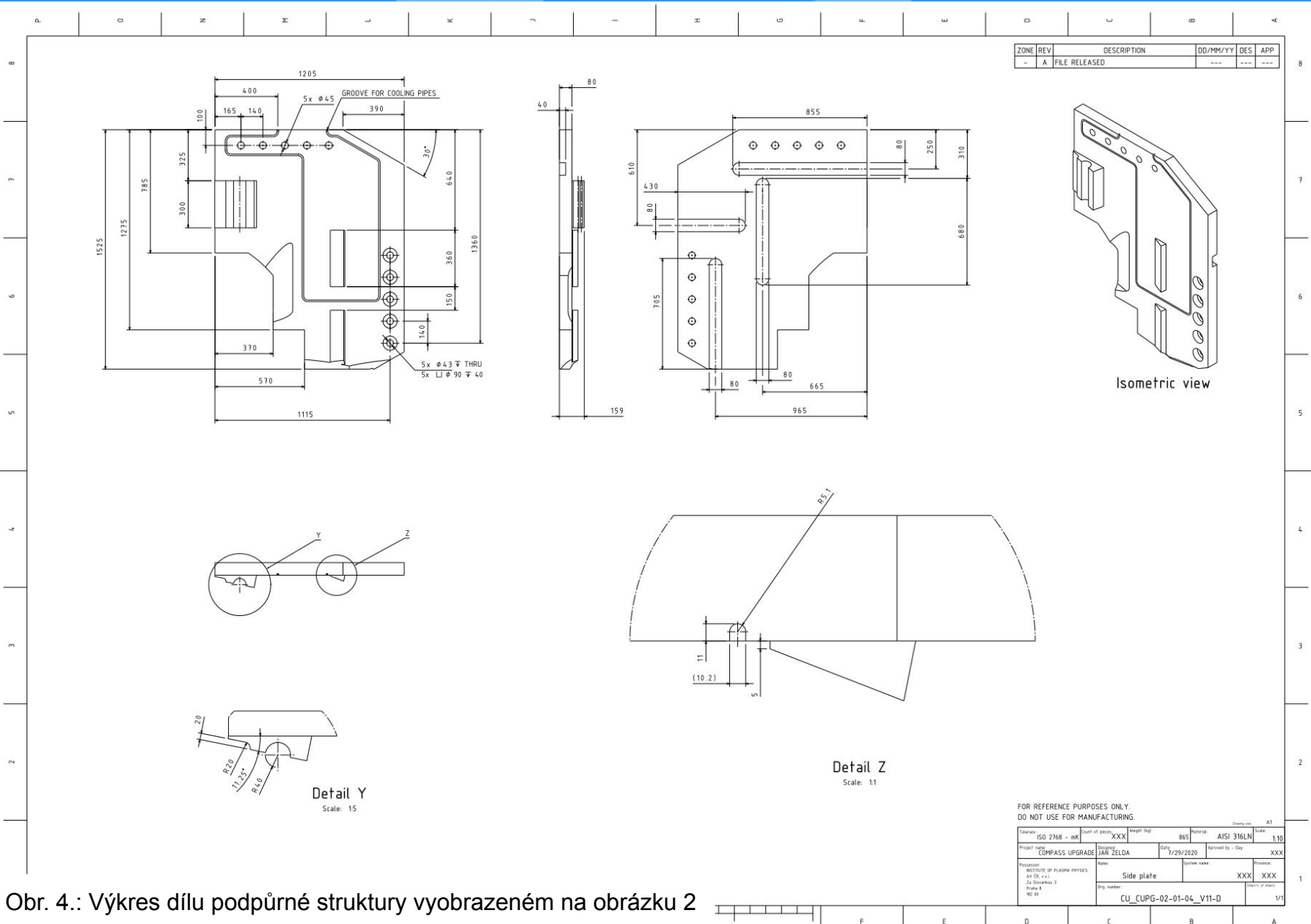
Pokud pro pájení bude použito tavidlo, musí být vypracován postup jeho očištění z výrobku a to do takového stavu, aby byla zachována vakuová čistota.



Obr. 2.: Jeden z dílů podpůrné struktury s vyznačenou chladicí trubkou určenou k zapájení

Obr. 3.: Náhled na sestavu podpůrné struktury





Obr. 4.: Výkres dílu podpůrné struktury vyobrazeném na obrázku 2

Vzhledem k okolnostem uvedeným na straně 7, námi preferovaný postup je **tvrdé pájení stříbrnou pájkou** (slitiny  $\text{Ag}_{72}\text{Cu}_{28}$  nebo  $\text{Ag}_{60}\text{Cu}_{30}\text{Sn}_{10}$ ) pomocí **vodíkového redukčního plamene** nebo pomocí indukčního ohřevu při ofuku vodíkovou atmosférou. Nejsme si však jisti vakuovou kompatibilitou, mechanickou pevností a obecně tím, jestli je pájený spoj touto technologií **proveditelný**.

# **Tvrdé pájení měděných přívodů PF cívek**

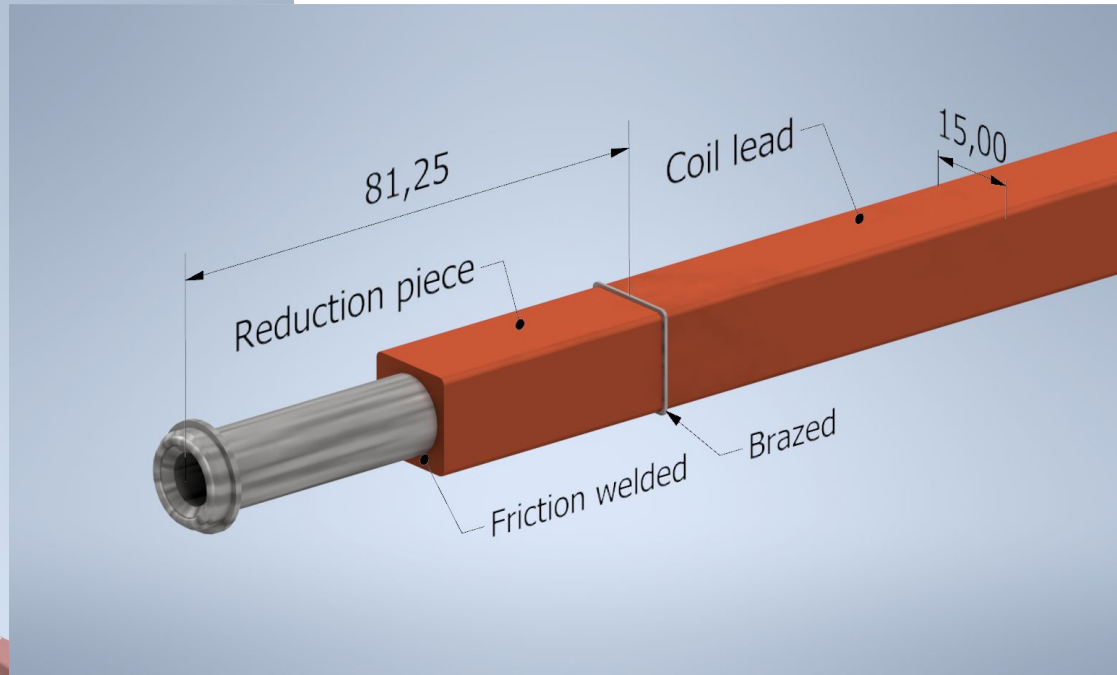
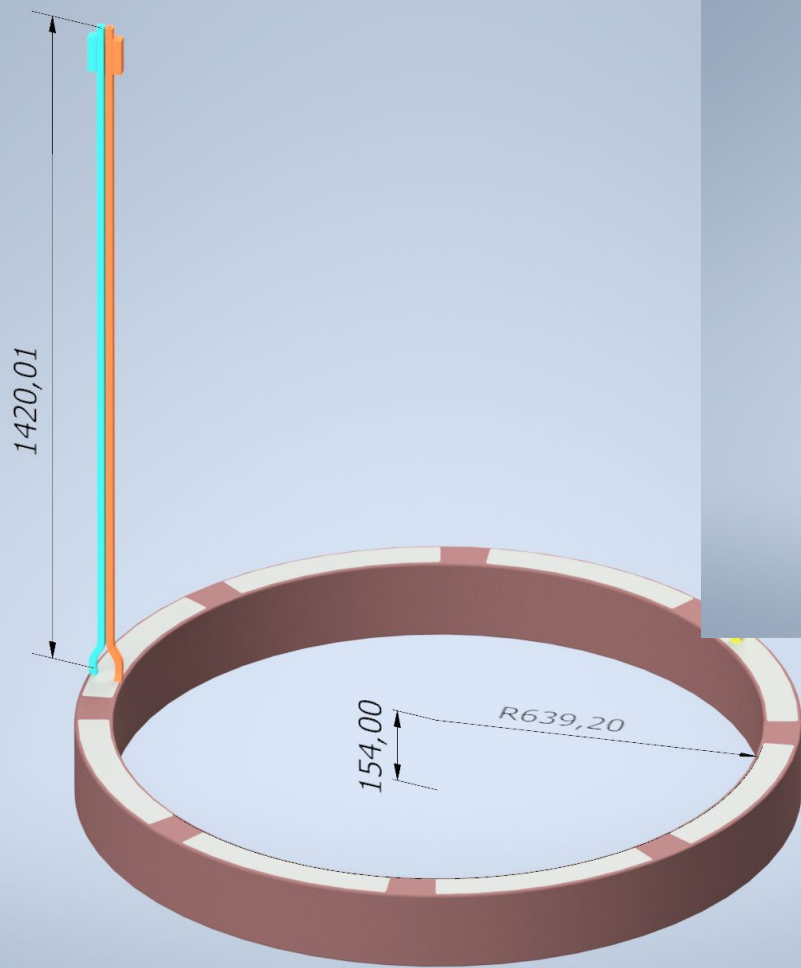
PF cívky jsou magnetické cívky, vyrobené z dutého měděného profilu (viz obr. 5.) omotaného kaptonovou a skelnou izolací.

Na vývody poloidálních cívek je třeba **tvrdě zapájet** přechodku na nerezové šroubení (ta sama bude vyrobena třecím/explozivním svařováním a následným obráběním, její přibližná podoba viz obr. 6.)

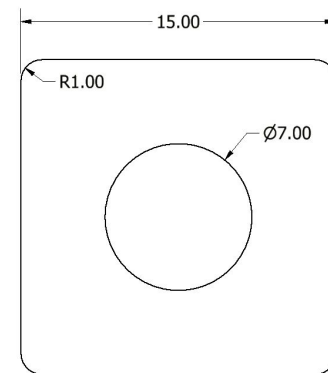
## Požadavky na pájený spoj:

- Magnetické cívky i přechodky budou vyrobeny z bezkyslíkaté mědi  $\text{CuAg}_{0.1}$ .
  - Použitá pájka musí tuto slitinu **dobře smáčet**.
- Ve vodiči magnetické cívky bude vnitřní kanál pro chladivo (Helium, nominální tlak 20 bar)
  - Pájený spoj musí být **absolutně těsný** (maximální dovolená netěsnost  $10^{-10}$  Pa.m<sup>3</sup>/s).
  - Při pájení **nesmí dojít k zatečení pájky** do vnitřního kanálu.
- V moment pájení bude cívka již navinutá a omotaná izolací.
  - Při pájení **musí být použita tepelná kotva**, která zabrání proniknutí tepla do cívky, tak aby nedošlo k poškození kaptonové izolace (maximální teplota ~ 250 °C).
- Cívka bude při provozu aktivně chlazena na -190 °C.
  - Použitá pájka **nesmí při této teplotě zkréhnout!**
- Pájený spoj bude umístěn ve vakuu
  - Tudíž při pájení **nesmí vzniknout žádné mrtvé prostory, kapiláry, póry** nebo oxidy zabudované v pájce.
  - Zároveň pájka **nesmí obsahovat kovy o vysokém tlaku nasycených par**, které se mohou ve vakuu odpařovat (zinek, kadmium...)

Pokud bude při pájení použito tavidlo, musí být ověřena jeho kyselost (kvůli použitému epoxidu při závěrečné laminaci cívky) a vakuová kompatibilita.



Obr. 6.: Sestava vývodu cívky včetně pájeného spoje



Obr. 5.: Průřez měděného vodiče

Obr. 7.: Schematický výkres celé cívky

# **Měkké pájení měděných chladících trubek do drážky v závitu měděných TF cívek**

TF cívky jsou magnetické cívky, vyrobené z plně vytvrzené (H04) bezkyslíkaté slitiny mědi (CuAg0.1 nebo CuZr0.1). V každém závitě cívky jsou vyfrézované 3 drážky pro napájení chladícího kanálu (viz obrázky na dalším slidu). Jednotlivé závity jsou od sebe odděleny skelnou tkaninou a vakuově tlakově impregnovány.

V centrální části je drážka (vybrání) kruhového průřezu. V ramenech cívky je vybrání čtvercového průřezu. Do drážek je třeba **měkce zapájet** chladicí trubičky. Po jejich zapájení dojde k vložení skelné tkaniny, poskládání závitů cívky a vakuové tlakové impregnaci.

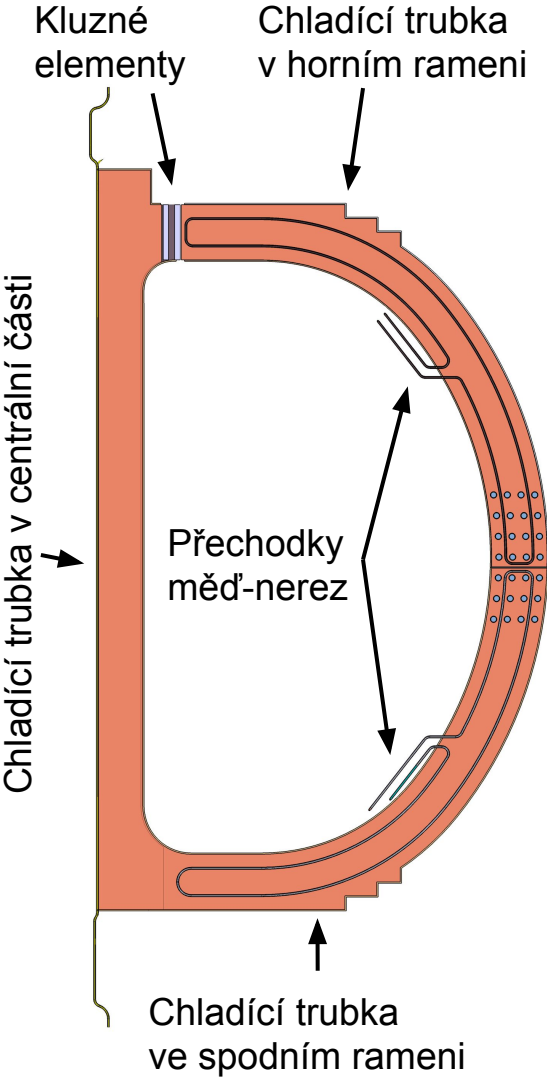
## Požadavky na pájený spoj:

- Magnetické cívky i chladicí trubky budou vyrobeny z bezkyslíkaté slitiny mědi (CuAg0.1 nebo CuZr0.1).
  - Použitá pájka musí tuto slitinu **dobře smáčet**.
- Cívky budou vyrobeny z plně vytvrzené mědi. Pájením se materiál nesmí vyžíhat.
  - **Teplota pájení by měla být co nejnižší.**
- Cívka bude při provozu aktivně chlazena na  $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
  - Přestože jsou chladicí trubičky uloženy mezi závity (případně obaleny skelnou tkaninou) a nemohou vypadnout. Použitá pájka **by měla mechanicky vydržet smyková napětí  $\sim 30\text{ MPa}$  a zajistit dobrý tepelný kontakt mezi trubičkou a cívkou.**
- Pájený spoj bude umístěn ve vakuu
  - Tudíž při pájení **nesmí vzniknout žádné mrtvé prostory, kapiláry, póry** nebo oxidy zabudované v pájce.
  - Zároveň pájka **nesmí obsahovat kovy o vysokém tlaku nasycených par**, které se mohou ve vakuu odpařovat (zinek, kadmium...)

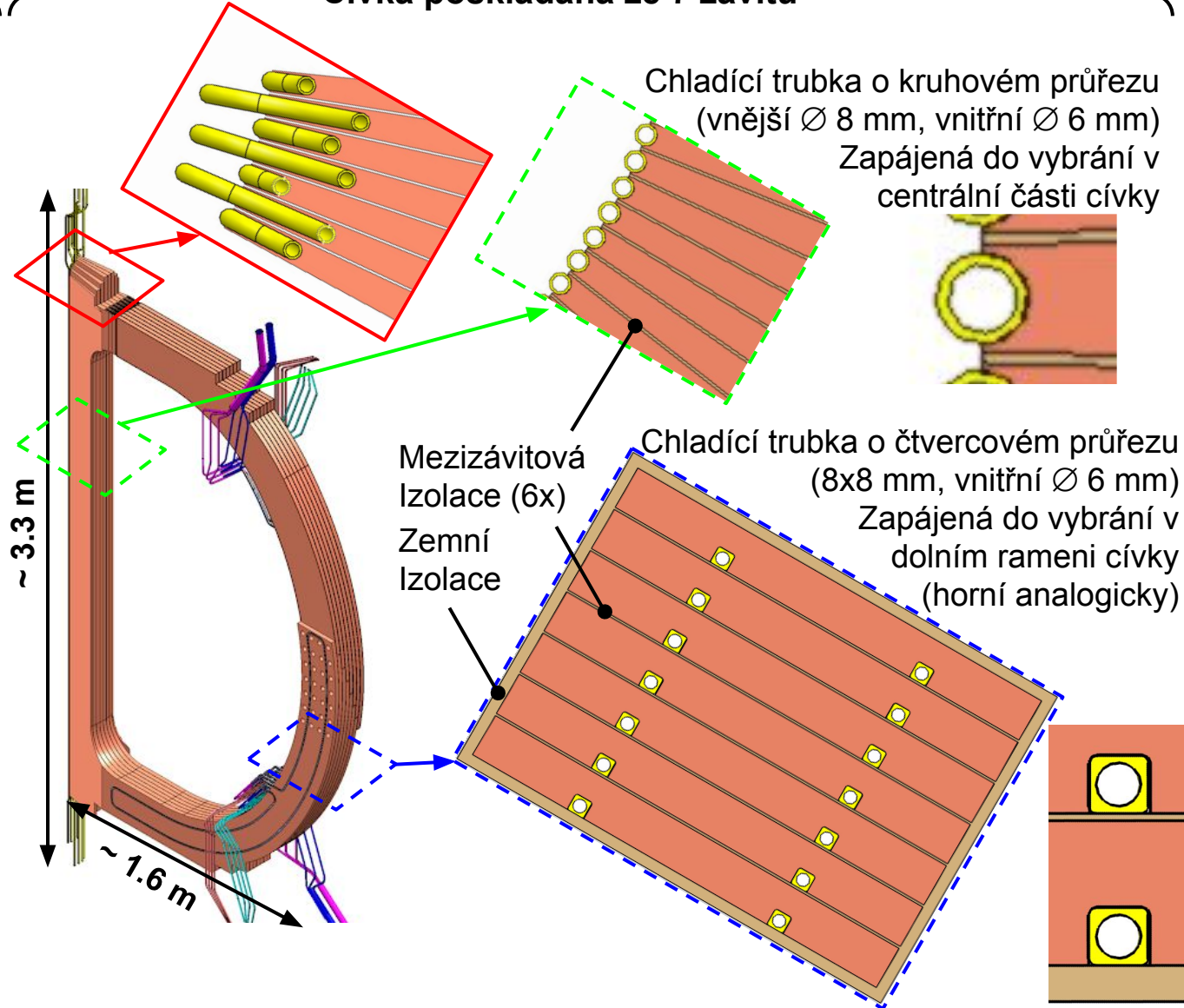
Pokud bude při pájení použito tavidlo, musí být ověřena jeho kyselost (kvůli použitému epoxidu při závěrečné laminaci cívky) a vakuová kompatibilita.



## Závit TF cívky



## Cívka poskládaná ze 7 závitů





# **Měkké pájení postříbřených měděných kluzných elementů k závitu měděné TF cívky**

Na horní rameno cívek toroidálního pole z bezkyslíkaté slitiny mědi (CuAg0.1 nebo CuZr0.1) je třeba **měkce napájet** kluzné elementy (kontaktní plocha jak cívky tak kluzného elementu je postříbřená měď - stříbro bez rozjasňovačů)

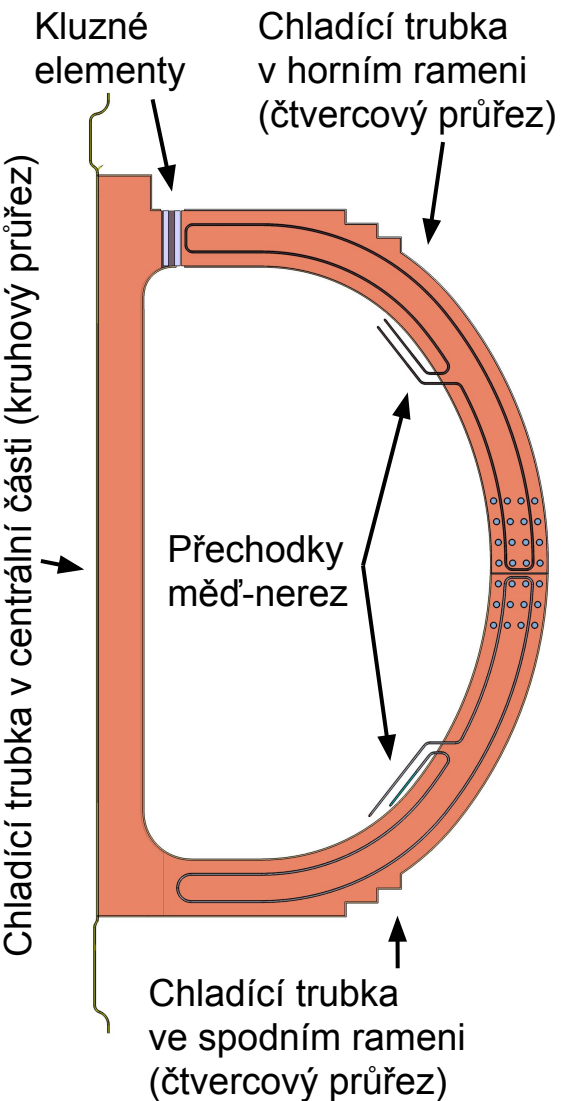
## Požadavky na pájený spoj:

- Cívka i kluzný element budou v oblasti pájení postříbřené.
  - Použitá pájka musí tuto slitinu **dobře smáčet**.
- Cívka bude při provozu aktivně chlazena na  $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
  - Použitá pájka **by měla mechanicky vydržet smyková napětí  $\sim 30\text{ MPa}$  a zajistit dobrý tepelný a elektrický kontakt mezi kluzným elementem a cívkou**.
- Pájený spoj bude umístěn ve vakuu
  - Tudíž při pájení **nesmí vzniknout žádné mrtvé prostory, kapiláry, póry** nebo oxidy zabudované v pájce.
  - Zároveň pájka **nesmí obsahovat kovy o vysokém tlaku nasycených par**, které se mohou ve vakuu odpařovat (zinek, kadmium...)
- V moment pájení bude cívka již navinutá a omotaná izolací.
  - Při pájení **musí být použita tepelná kotva**, která zabrání proniknutí tepla do cívky, tak aby nedošlo k poškození epoxidu **sklolaminátové izolace** (maximální teplota  $\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).
- Kluzné elementy budou vyměňovány při odstávkách
  - Pájený spoj by tudíž měl být proveditelný přímo na tokamaku na kompletním jádře toroidálních cívek

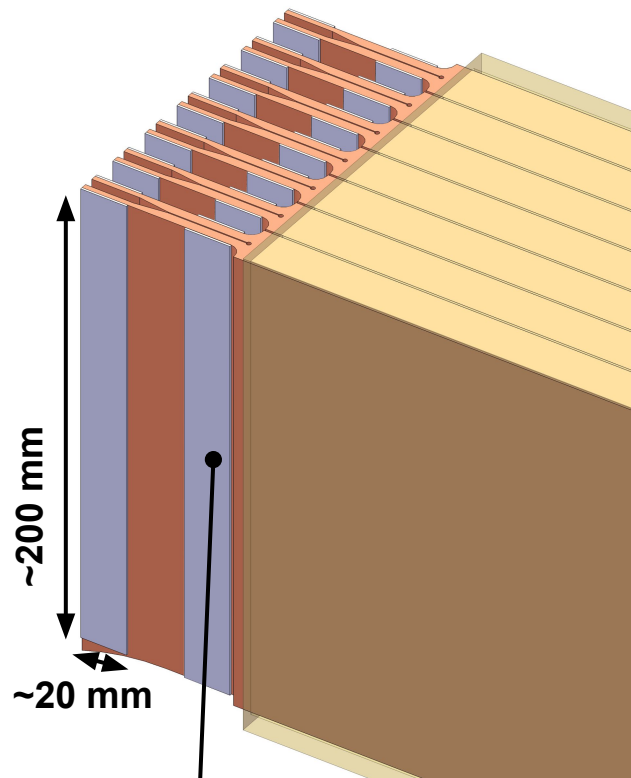
Pokud bude při pájení použito tavidlo, musí být ověřena jeho kyselost (kvůli použitému epoxidu při závěrečné laminaci cívky) a vakuová kompatibilita.

## Závit toroidální cívky

## Kluzný kontakt



## Rameno cívky



Kluzný element (4x na závit). Všechny kluzné elementy mají přibližně stejné rozměry.

# **Tvrdé pájení měděných chladičích trubek k měděné části přechodky měď'-nerez**

Na vývody chladících trubek TF cívek je třeba **tvrdě zapájet** přechodku na nerezové šroubení (ta sama bude vyrobena třecím/explozivním svařováním a následným obráběním)

Tento pájený spoj je (technologicky) podobný, jako pájený spoj vývodů poloidálních cívek ze strany 11.

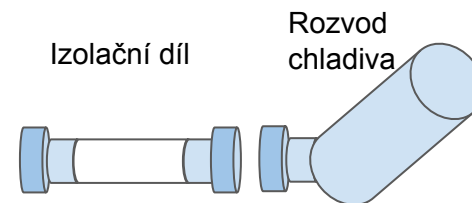
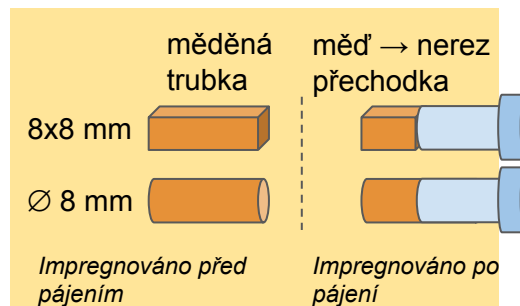
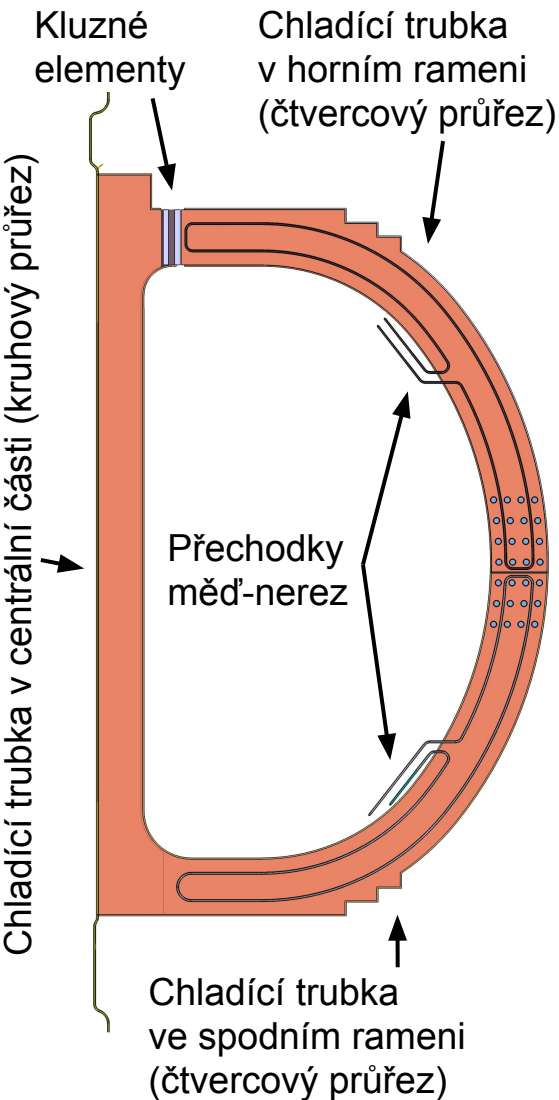
## Požadavky na pájený spoj:

- Chladící trubky i přechodky budou vyrobeny z bezkyslíkaté slitiny mědi (CuAg0.1 nebo CuZr0.1).
  - Použitá pájka musí tuto slitinu **dobře smáčet**.
- Ve vodiči magnetické cívky bude vnitřní kanál pro chladivo (Helium, nominální tlak 20 bar)
  - Pájený spoj musí být **absolutně těsný** (maximální dovolená netěsnost  $10^{-10}$  Pa.m<sup>3</sup>/s).
  - Při pájení **nesmí dojít k zatečení pájky** do vnitřního kanálu.
- V moment pájení bude cívka již navinutá a omotaná izolací.
  - Při pájení **musí být použita tepelná kotva**, která zabrání proniknutí tepla do cívky, tak aby nedošlo k poškození epoxidu **sklolaminátové izolace** (maximální **teplota ~ 120 °C**).
- Cívka bude při provozu aktivně chlazena na -190 °C.
  - Použitá pájka **nesmí při této teplotě zkřehnout!**
- Pájený spoj bude umístěn ve vakuu
  - Tudíž při pájení **nesmí vzniknout žádné mrtvé prostory, kapiláry, póry** nebo oxidy zabudované v pájce.
  - Zároveň pájka **nesmí obsahovat kovy o vysokém tlaku nasycených par**, které se mohou ve vakuu odpařovat (zinek, kadmium...)

Pokud bude při pájení použito tavidlo, musí být ověřena jeho kyselost (kvůli použitému epoxidu při závěrečné laminaci cívky) a vakuová kompatibilita.

## Závit toroidální cívky

## Připojení k chladicímu rozvodu



# Měkké/tvrdé pájení elektrického přívodu TF cívky k závitu cívky

Na prvním závit TF cívky je ohyb ve tvaru “S” umožňující připojení elektrického přívodu TF cívek. Tento ohyb neumožňuje vyrobit tento závit z jednoho kusu materiálu a je třeba tuto část připájet. V tuto chvíli není rozhodnuto o finálním řešení napojení (materiál, proces pájení, geometrie spoje). Bude se odvíjet od možností pájení, které je opět limitováno následujícími požadavky:

## Požadavky na pájený spoj:

- Tupý spoj pravděpodobně nebude mechanicky vyhovovat.
  - Tvar spoje by měl mechanicky vydržet tahová napětí v závit. Průměrné tahové napětí je  $\sim 60$  MPa.
- Závit bude z bezkyslíkaté slitiny mědi (CuAg0.1 nebo CuZr0.1).
  - Použitá pájka musí tuto slitinu **dobře smáčet**.
- Teplota pájení:
  - V případě materiálu CuAg0.1 bude cívka vyrobena z plně vytvrzené mědi. Pájení nesmí materiál vyžít.
    - **Teplota pájení by měla být co nejnižší.**
  - V případě materiálu CuZr0.1 je možné vyžít materiál nechat zestárnout (precipitačně vytvrdit)
    - **Teplota a doba pájení by měla současně sloužit k precipitačnímu vytvrzení**
- Cívka bude při provozu aktivně chlazena na  $-190$  °C.
  - Použitá pájka **nesmí při této teplotě zkřehnout!**
- Pájený spoj bude umístěn ve vakuu
  - Tudíž při pájení **nesmí vzniknout žádné mrtvé prostory, kapiláry, póry** nebo oxidy zabudované v pájce.
  - Zároveň pájka **nesmí obsahovat kovy o vysokém tlaku nasycených par**, které se mohou ve vakuu odpařovat (zinek, kadmium...)

Pokud bude při pájení použito tavidlo, musí být ověřena jeho kyselost (kvůli použitému epoxidu při závěrečné laminaci cívky) a vakuová kompatibilita.

