

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLOVÉHO
VLASTNICTVÍ

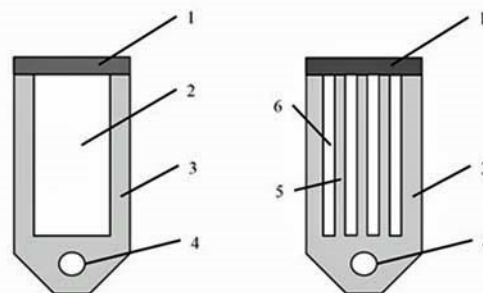
(21) Číslo přihlášky: **2020-717**
(22) Přihlášeno: **23.12.2020**
(40) Zveřejněno: **16.02.2022**
(Věstník č. 7/2022)
(47) Uděleno: **06.01.2022**
(24) Oznámení o udělení ve věstníku: **16.02.2022**
(Věstník č. 7/2022)

(56) Relevantní dokumenty:
CZ 2013-178 A3; JP S61185303 A; GB 876399 A; JP S5458610 A; CZ 25626 U1.

(73) Majitel patentu:
Centrum výzkumu Řež s.r.o., Husinec, Řež, CZ
Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., Praha 8,
Libeň, CZ

(72) Původce:
Ing. Karel Samec, Řevnice, CZ
Ing. Monika Vilémová, Ph.D., Karviná, Mizerov,
CZ
Dr. Renaud Dejarnac, Praha 2, Vinohrady, CZ

(74) Zástupce:
NEOLEGAL – advokátní a patentová kancelář, Ing.
Jaroslav Novotný, Římská 2135/45, 120 00 Praha 2,
Vinohrady



(54) Název vynálezu:
**Způsob chlazení stěn fúzních reaktorů a
zařízení k provádění tohoto způsobu**

(57) Anotace:
Způsob chlazení stěn fúzních reaktorů spočívá v tom, že se provede absorpce krátkých přechodných energetických odchylek z inherentních nestabilit plazmatu pomocí roztavení kovu uvnitř uzavřené struktury pro absorpci tepla při teplotě stoupající pomaleji než v homogenním kovu pomocí skupenského tepla tání, přičemž se pomocí skupenského tepla tání absorbuje tepelný tok z energetického výkyvu po omezenou dobu v řádu do 5 sekund prostřednictvím fázové změny z pevné látky na kapalinu, kdy se vnitřek obvodové struktury (3) naplní kovem s nízkou teplotou tání v tekuté formě. Zařízení k provádění uvedeného způsobu sestává z obvodové struktury (3), do které je umístěn porézní skelet (2) nebo dutá mřížková struktura (5), kdy dutiny v porézním skeletu (2) nebo dutiny mřížkové struktury (5) jsou naplněné kovem s nízkým bodem tání. Obvodová struktura (3) je s výhodou opatřena na protilehlé straně povlaku (1) upevňovacím prvkem (4).

Způsob chlazení stěn fúzních reaktorů a zařízení k provádění tohoto způsobu

Oblast techniky

5

Vynález se týká způsobu chlazení stěn fúzních reaktorů a zařízení k provádění tohoto způsobu. Výroba energie probíhá prostřednictvím fúzních reaktorů, v nichž je plazma omezeno magnetickými silami za účelem dosažení fúze. Vyzařované teplo z fúzní reakce představuje zdroj tepla, který lze převést na elektrickou energii pomocí generátoru na základě tepelného cyklu. Konkrétněji lze tento vynález aplikovat na aktuálně zkoumaná zařízení, což jsou fúzní reaktory, v nichž je plazma uzavřeno ve vakuové komoře. Plazma se zahřívá na teploty přesahující sto milionů Kelvinů, aby bylo dosaženo fúze lehkých prvků, jako je například vodík, deuterium nebo tritium, a jejich kombinací. Praktická realizace fúzní energie závisí na využití tepla, které je emitováno plazmatem ve vakuové nádobě. Konkrétněji, tento vynález umožňuje absorpci tepla uvolněného z plazmatu ve stěnách vakuové komory, bez poškození stěn, které jsou za tímto účelem lemovány tzv. Plasma Facing Components, dále PFC komponenty, speciálně navrženými tak, aby odolávaly extrémní povrchové tepelné zátěži.

20

Dosavadní stav techniky

Stávající zařízení, tj. PFC komponenty byly vyvinuty s využitím různých technik pro ochranu stěny reaktoru před žářem plazmatu. Způsoby chlazení využívají chladicími kanály proudící tekutiny, jako je voda v různých skupenstvích, tekutý kov či plyn o vysokém tlaku. Materiály, které se používají ve stávajících PFC pro odolnost vysokým teplotám zahrnují wolfram, uhlík, zirconel, molybden, wolfram-zirkonium-molybden. Geometrie chladicího kanálu byly optimalizovány tak, aby se zvýšil odvod tepla. Současné PFC komponenty jsou omezeny na tepelné toky do 10 MW/m²; vyšší tepelné toky vedou k poškození povrchu, protože měrná tepelná vodivost daného kovového materiálu, popř. materiálů omezuje evakuaci tepla do chladicích trubek.

30

PFC komponenty čelí výzvám z důvodu extrémních podmínek, dosahovaných ve fúzním reaktoru, neboť nestability plazmatu mohou způsobit ohrožující, náhlé a přechodně lokalizované energetické toky na vnitřní stěně vakuové nádoby, mající za následek narušení výroby elektrické energie či dokonce poškození stěny fúzního reaktoru. Odolnost proti takovému poškození je klíčovou funkcí pro budoucí využití fúzní energie.

35

Některé v současnosti vyvíjené PFC komponenty využívají smáčení porézní struktury roztaveným kovem, sublimujícím z PFC, pokud je překročena návrhová úroveň tepelného toku. Přitom je plazma znečištěno prvkem s vysokým atomovým číslem, což vede ke zhasnutí termojaderné fúzní reakce.

40

Podstata vynálezu

Uvedené nedostatky odstraňuje způsob chlazení stěn fúzních reaktorů a zařízení k provádění tohoto způsobu, podle tohoto vynálezu, jehož podstata spočívá v tom, že se provede absorpce krátkých přechodných energetických odchylek z inherentních nestabilit plazmatu pomocí roztavení kovu uvnitř uzavřené struktury, čímž se absorbuje teplo při téměř konstantní teplotě pomocí skupenského tepla tání. Skupenské teplo tání absorbuje tepelný tok z energetického výkyvu po omezenou dobu prostřednictvím fázové změny z pevné látky na kapalinu. Vynález pomocí uvedeného způsobu chlazení tudíž po krátkou dobu, nepřekračující několik sekund, brání poškození vnitřní stěny fúzního reaktoru, a to v závislosti na míře zvýšení povrchového tepelného toku. Po roztavení zůstane kov v uzavřené struktuře odolné vysoké teplotě, aniž by docházelo k povrchovému úniku roztaveného kovu.

55

Účelem vynálezu je absorbovat přechodné výkyvy energie při velmi vysokém tepelném toku, které je nemožné absorbovat bez poškození pomocí stávajících PFC komponentů.

5 Krátkodobá absorpce přechodných vysokých odchylek tepelného toku umožňuje ochránit konvenční chladicí systém během přechodu maxima, neboť tento vynález chrání strukturu po omezený, avšak klíčový časový interval. Tento dodatečný časový interval rovněž může v extrémních případech zajistit více času pro aktivaci blokovacích systémů k odstavení reaktoru z důvodu jeho ochrany, což je potřebné pro úspěšnou implementaci navržených ochranných systémů, jejichž automatická intervence vyžaduje čas. Tímto způsobem jsou dávky vysokého tepelného toku v důsledku nestability v plazmě lépe zvládnuty a vnitřní stěnu fúzního reaktoru tak lze účinně ochránit proti trvalému poškození, což je klíčovou funkcí zařízení.

U komponentu lze předpokládat dva typy uspořádání. U reaktorů pracujících v ustáleném stavu může být komponent uspořádán tak, aby zakrýval chladicí systémy první stěny, které slouží k evakuaci tepla v ustáleném režimu. Tímto způsobem bude komponent absorbovat teplo a fungovat v širší oblasti a po delší dobu překročí extrémní toky způsobené nestabilitou. U reaktorů pracujících v pulzním režimu, jako jsou výzkumné reaktory, může komponent pracovat samostatně, absorbovat puls a poté šířit teplo vedením do struktury vakuové komory, která je chlazená jiným způsobem.

20 Zařízení k provádění uvedeného způsobu sestává z odolné porézní struktury či duté mřížkové struktury, např. z wolframu, který je zapouzdřený ve struktuře, jež je odolná vůči vysokým teplotám a zadržuje strukturou naplněné kovy s nízkým bodem tání, jako je například, měď, nebo ve struktuře se nachází obvodová struktura, odolná vysokým teplotám a tato je schopna pojmout a uchovat kov s nízkým bodem tání, aniž by docházelo k jeho úniku z obvodové struktury. Jakmile dochází k tavení, mohou být vysoké tepelné toky absorbovány tímto kovem s nízkým bodem tání, jenž díky své vyšší tepelné vodivosti rozvádí teplo do obvodové, uzavřené, vysokým teplotám odolné struktury, čímž snižuje tepelné zatížení, a následně umožňuje ztuhnutí roztaveného vnitřního kovu po odeznění náhlého vysokého tepelného toku a následné odvedení tepla do chladicího okruhu fúzního reaktoru. Na straně odvrácené plazmatu je na komponentě umístěn upevňovací bod, který odolá silným elektromagnetickým silám, jimž jsou PFC komponenty v důsledku nestabilit plazmatu vystaveny. Komponent vystavený plazmatu může mít povlak nanesený pomocí techniky PVD či CVD (Physical Vapour Deposition či Chemical Vapour Deposition). Komponent vystavený plazmatu může být vyroben pomocí 3D tisku nebo může mít odolnou dutou mřížkovou strukturu vyrobenou metodou práškové metalurgie.

Objasnění výkresů

40 Vynález bude dále vysvětlen pomocí výkresů, ve kterých: obr. 1 schematicky zobrazuje průřez jedné z možných realizací vynálezu, založené na porézní, pevné a vysokým teplotám odolné struktuře, vyplněné kovem s nízkým bodem tání. Obr. 2 schematicky znázorňuje průřez další možnou realizací, v níž je pravidelná dutá mřížková struktura, z vysokým teplotám odolné struktury, vyplněna kovem s nízkým bodem tání. Obr. 3a je třídimensionální ilustrací navržené realizace, vysokým teplotám odolné šestihhrané strukturované mřížky, vyplněné kovem s nízkým bodem tání. Obr. 3b představuje realizaci koncepce pro reaktor pracující v ustáleném režimu, kde dochází ke kontinuálnímu odvodu tepla prostřednictvím chladicích kanálů. Obr. 4 a 5 ukazují vývoj teploty na povrchu PFC komponentu realizované z čistého wolframu a současně PFC komponentu podle tohoto vynálezu realizovaného z wolframové struktury naplněné mědí.

50

Příklady uskutečnění vynálezu

55 Nyní podrobněji s odkazem na vynález, na obr. 1 je znázorněno schéma průřezu navrhovaného PFC komponentu, znázorňující vysokým teplotám odolnou konstrukci, sestávající z kovového

porézního pevného skeletu 2, který je vyrobený z wolframu. Skelet 2 je tvořen otevřenými buňkami a je vyplněn kovem s nízkým bodem tání, jako je měď. Wolframový porézní pevný skelet 2 napuštěný mědí je v současnosti nejlepší dostupnou technologií.

- 5 Vyplněný porézní skelet 2 na obr. 1 je zapouzdřen ve vysokým teplotám odolné obvodové struktury 3. Obě části jsou vyrobeny tak, aby vytvořily souvislou strukturu, která zajišťuje dobrý tepelný kontakt a vysokou pevnost.

10 Kovový porézní skelet 2 a obvodová struktura 3 na obr. 1 jsou následně na straně vystavené plazmatu uzavřeny povlakem 1 z vysokým teplotám odolné vrstvy, méně než milimetr tlusté, vyrobené z wolframu.

15 Obvodová struktura 3 na obr. 1 je poté na protilehlé straně povlaku 1 opatřena upevňovacím bodem 4 vyrobeným, z wolframu.

20 Nyní podrobněji s odkazem na vynález, na obr. 2 je zobrazeno alternativní schéma k návrhu, znázorněnému na obr. 1, ukazující vysokým teplotám odolnou strukturu, sestávající z kovové pravidelné duté mřížkové struktury 5, která je vyrobena z wolframu. Mřížková struktura 5 sestává z buněk 6 orientovaných kolmo ke straně vystavené plazmatu a v dutinách je vyplněna kovem s nízkým bodem tání, jako je měď.

Vyplněná otevřená mřížková struktura 5 na obr. 2 je zapouzdřena v obvodové struktury 3 odolávající vysokým teplotám, s níž je v tepelném kontaktu.

- 25 Dutá mřížková struktura 5 a obvodová struktura 3 na obr. 2 jsou následně na straně vystavené plazmatu uzavřeny povlakem 1 z vysokým teplotám odolného materiálu, vyrobeným, z wolframu.

30 Obvodová struktura 3 na obr. 2 je poté, na protilehlé straně povlaku 1 opatřena upevňovacím prvkem 4 vyrobeným z wolframu.

Druhá varianta je výhodná v tom, že může zadržet více mědi než kovový porézní skelet 2 ve variantě 1, který nemůže absorbovat více než 40 procent mědi, protože jinak je pevnost wolframové houby (porézního skeletu 2) příliš nízká.

- 35 Mezi výhody tohoto vynálezu patří mimo jiné větší schopnost absorbovat rychle vznikající vysoké tepelné toky, schopnost účinně šířit teplo, čímž snižuje teplotní gradienty, a tudíž i termomechanické zatížení uvnitř komponentu vystaveného plazmatu a to reverzibilně, takže se PFC po nenadálém nárůstu tepelného toku vrátí do původního stavu bez trvalého poškození.

40 Konkrétní možná realizace je znázorněna na obr. 3a. Je složena, z vysokým teplotám odolných hexagonálních buněk duté mřížkové struktury 5, sestavených do jednotkové PFC komponenty, kterou lze připevnit ke stěně vakuové nádoby reaktoru pomocí kteréhokoli z upevňovacích prvků 4 na zadní straně komponenty. Hexagonální buňky jsou vyplněné kovem s nízkým bodem tání, jako je měď, přes kterou se aplikuje tenký povlak 1 za účelem potlačení úniku tekutého kovu do vakuové nádoby fúzního reaktoru, jakmile vysoký tepelný tok zasáhne povrch povlaku 1, roztaví kovovou výplň s nízkým bodem tání uvnitř duté mřížkové struktury 5.

50 Analýza teploty, kterou lze při takovéto konkrétní realizaci očekávat, byla provedena pomocí numerických výpočtů a výsledky na obr. 4 a 5 ukazují vývoj teploty na povrchu PFC komponentu realizované z čistého wolframu a současně PFC komponentu podle tohoto vynálezu realizovaného z wolframové struktury naplněné mědí. Porovnáním obrázků je patrný pokles rychlosti ohřevu z důvodu absorpce skupenského tepla tání mědi v navrhovaném PFC komponentu. Pokles způsobí prodloužení doby, po kterou může konstrukce setrvat pod kritickou teplotou 2000 °C, což se považuje za maximální provozní mez pro takovéto komponenty vyrobené z wolframu.

55

Vynález pomocí uvedeného způsobu chlazení tudíž po krátkou dobu, nepřekračující několik sekund, brání poškození vnitřní stěny fúzního reaktoru, a to v závislosti na míře zvýšení povrchového toku. Po roztavení zůstane kov v uzavřené struktuře odolné vysoké teplotě, aniž by docházelo k povrchovému úniku roztaveného kovu.

5

Účelem vynálezu je absorbovat přechodné výkyvy energie při velmi vysokém tepelném toku, které je nemožné absorbovat bez poškození pomocí stávajících PFC komponentů.

10 Krátkodobá absorpce přechodných vysokých odchylek tepelného toku umožňuje ochránit konvenční chladicí systém během přechodu maxima, neboť tento vynález chrání strukturu po omezený, avšak klíčový časový interval. Tento dodatečný časový interval rovněž může v extrémních případech zajistit více času pro aktivaci blokovacích systémů k odstavení reaktoru z důvodu jeho ochrany, což je potřebné pro úspěšnou implementaci navržených ochranných systémů, jejichž automatická intervence vyžaduje čas. Tímto způsobem jsou dávky vysokého tepelného toku v důsledku nestability v plazmě lépe zvládnuty a vnitřní stěnu fúzního reaktoru tak lze účinně ochránit proti trvalému poškození, což je klíčovou funkcí tohoto zařízení.

20 Zařízení k provádění uvedeného způsobu sestává z odolného porézního skeletu 2 či duté mřížkové struktury 5 z wolframu, které jsou zapouzdřeny v obvodové struktuře 3, jež je odolná vůči vysokým teplotám a tato je schopna pojmout a uchovat kov s nízkým bodem tání, aniž by docházelo k jeho úniku z obvodové struktury 3. Jakmile dochází k tavení, mohou být vysoké tepelné toky absorbovány tímto kovem s nízkým bodem tání, jenž díky své vyšší tepelné vodivosti rozvádí teplo do obvodové, uzavřené a vysokým teplotám odolné struktury 3, nebo do duté mřížkové struktury 5, čímž snižuje tepelné zatížení, a následně umožňuje ztuhnutí roztaveného vnitřního kovu po odeznění náhlého vysokého tepelného toku a následné odvedení tepla do chladicího okruhu fúzního reaktoru. Na straně odvrácené plazmatu, tj. na protilehlé straně obvodové struktury 3 s povlakem 1, je umístěn upevňovací prvek 4, který odolá silným elektromagnetickým silám, jímž jsou PFC komponenty v důsledku nestabilit plazmatu vystaveny. Komponent vystavený plazmatu může mít povlak naneseným technikou PVD či CVD (Physical Vapour Deposition či Chemical Vapour Deposition). Komponent vystavený plazmatu může být vyroben pomocí 3D tisku nebo může mít odolnou dutou mřížkovou strukturu 5 vyrobenou metodou práškové metalurgie. Existují i jiné možnosti materiálů: vysokým teplotám odolná struktura může být vyrobena z molybdenu nebo slitiny Ti-Zr-Mo (tzv. TZM), a měď může být nahrazena stříbrem, které má také vysokou tepelnou vodivost.

30

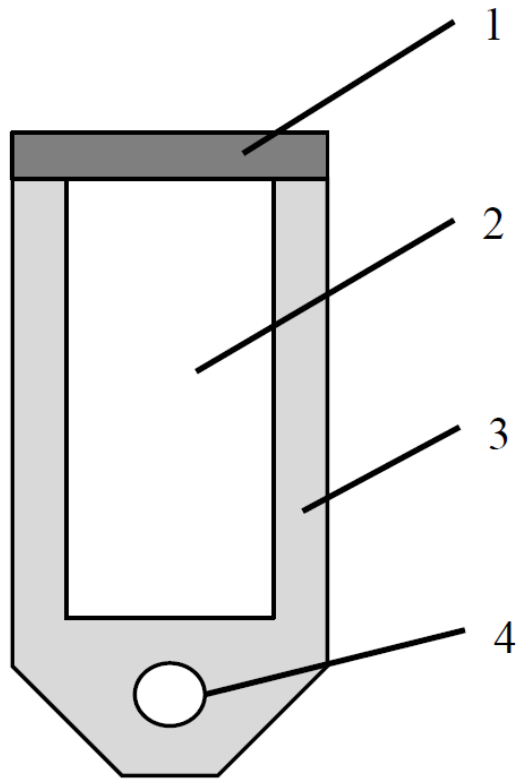
PATENTOVÉ NÁROKY

1. Způsob chlazení stěn fúzních reaktorů, **vyznačující se tím**, že se provede absorpce krátkých
5 přechodných energetických odchylek z inherentních nestabilit plazmatu pomocí roztavení kovu
uvnitř uzavřené struktury pro absorpci tepla při teplotě stoupající pomaleji než v homogenním kovu
pomocí skupenského tepla tání, přičemž se pomocí skupenského tepla tání absorbuje tepelný tok
z energetického výkyvu po omezenou dobu v řádu do pěti sekund prostřednictvím fázové změny
10 z pevné látky na kapalinu, kdy se vnitřek obvodové struktury (3) naplní kovem s nízkou teplotou
tání v tekuté formě.
2. Způsob podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že se po dobu až pěti sekund brání poškození
fúzního reaktoru, a to v závislosti na míře zvýšení povrchového toku, který může dosáhnout faktoru
15 100 pro interval milisekund nebo dvojnásobek pro interval pěti sekund, kdy po roztavení zůstane
kov v uzavřené struktuře odolné vysoké teplotě, aniž by docházelo k povrchovému úniku
roztaveného kovu.
3. Zařízení k provádění uvedeného způsobu, **vyznačující se tím**, že sestává z obvodové
20 struktury (3), do které je umístěn porézní skelet (2) nebo dutá mřížková struktura (5), kdy dutiny
v porézním skeletu (2) nebo dutiny mřížkové struktury (5) jsou naplněny kovem s nízkým bodem
tání.
4. Zařízení podle nároku 3, **vyznačující se tím**, že obvodová struktura (3) je opatřena na
25 protilehlé straně povlaku (1) upevňovacím prvkem (4).

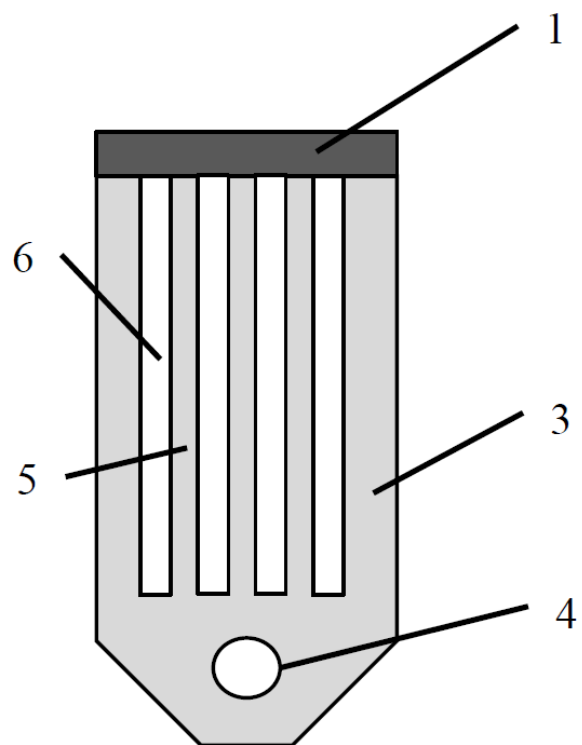
6 výkresů

Seznam vztahových značek

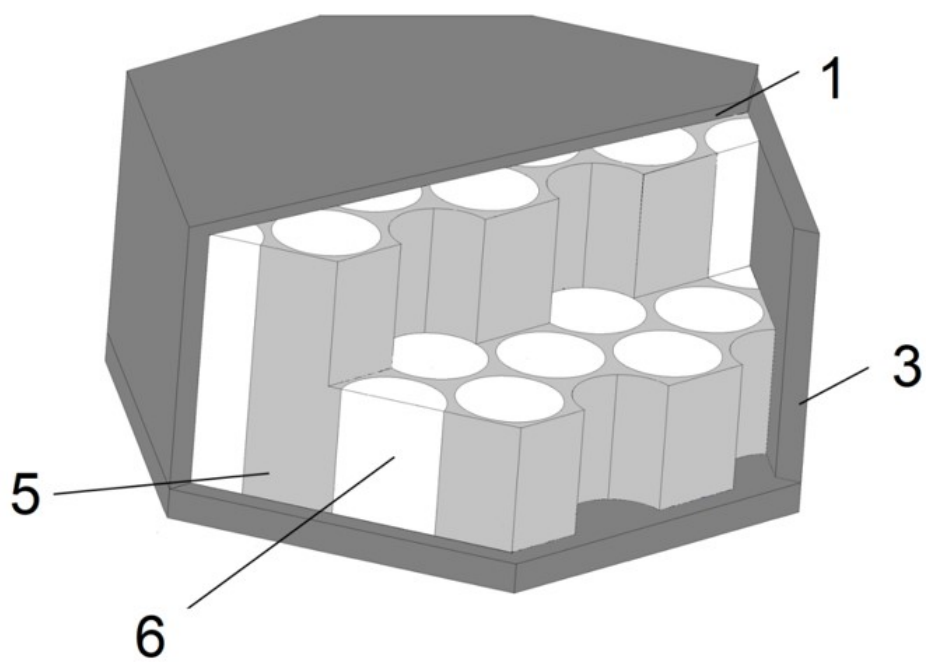
- 1 povlak na straně vystavené plazmatu
- 2 porézní skelet
- 3 obvodová struktura
- 4 upevňovací prvek
- 5 dutá, mřížková struktura
- 6 buňka



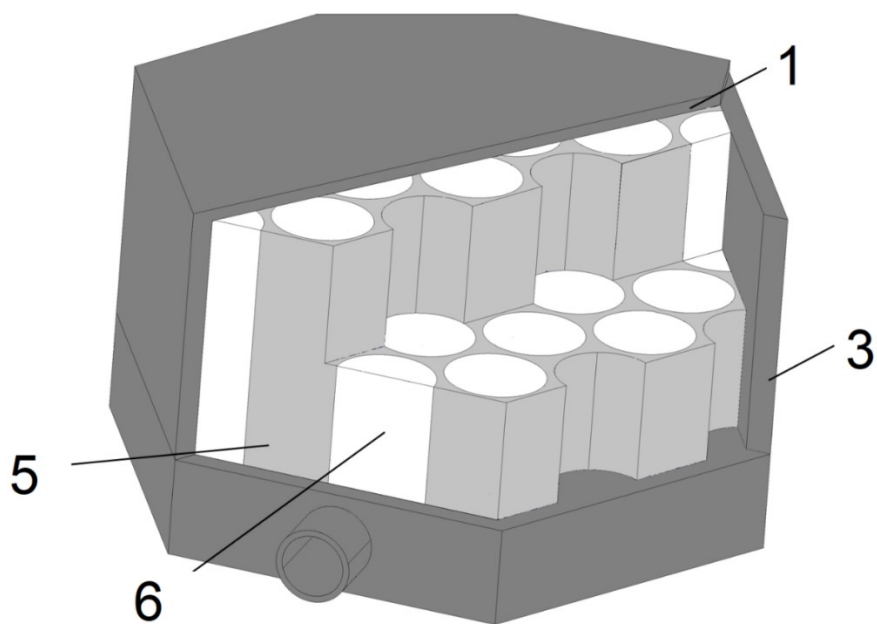
Obr. 1



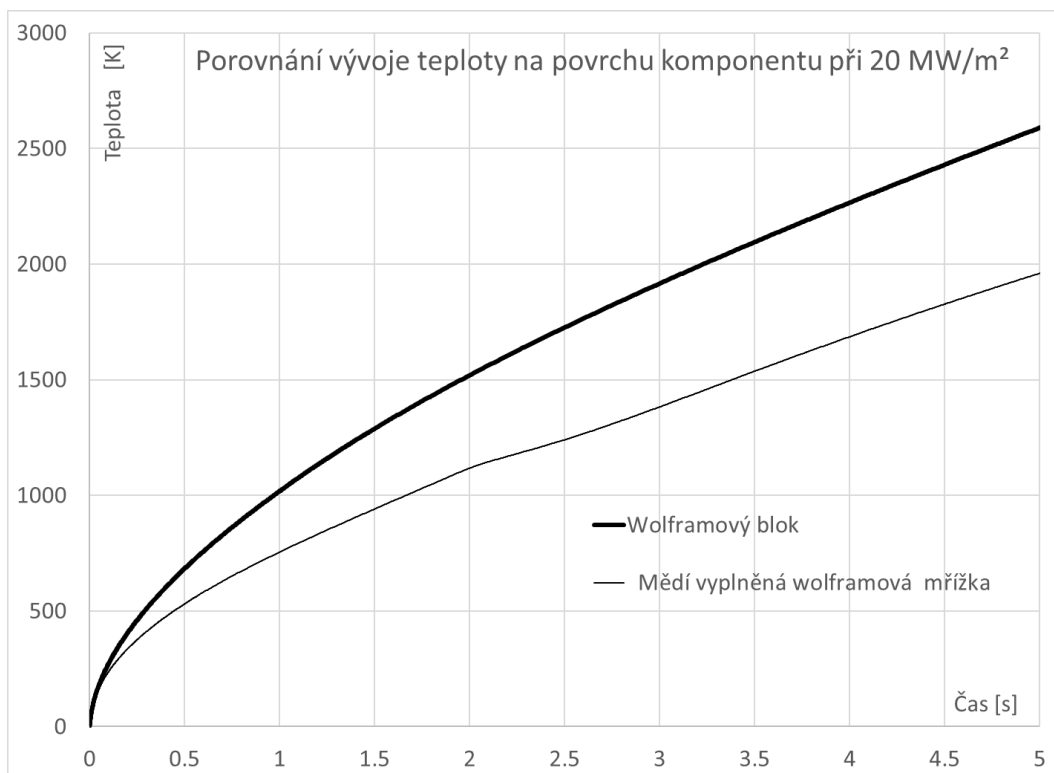
Obr. 2



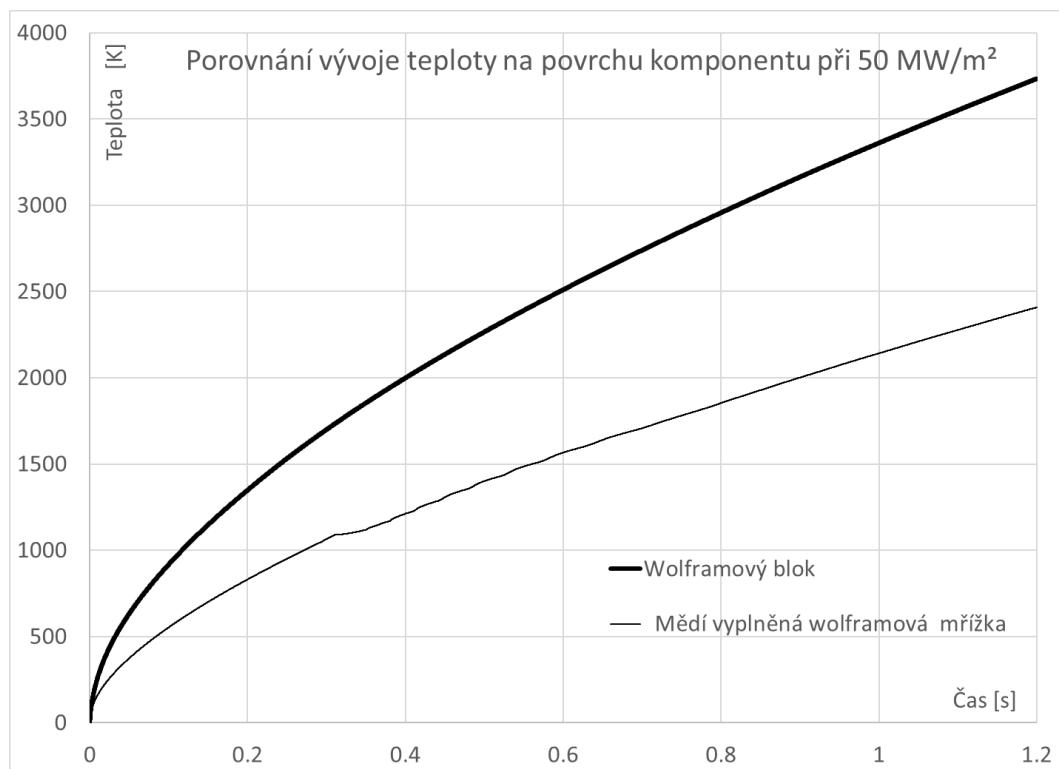
Obr. 3a



Obr. 3b



Obr. 4



Obr. 5