

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Návrh výměníku tepla

(deskový výměník z grafitových kompozitů - typ sůl – sůl, vstupní teplota 720°C)

Autor: **Jan JÍLEK**

Vedoucí práce: **Ing. Václav Valenta, CSc.**

Akademický rok 2011/2012  
**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Katedra energetických strojů a zařízení**  
**2011/2012**

**Akad. rok:**

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Jméno a příjmení: Jan Jílek  
Rodné číslo: 870701/1467  
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: Stavba energetických strojů a zařízení

### **Téma bakalářské práce:**

**Návrh výměníku tepla (deskový výměník z grafitových kompozitů), (typ sůl – sůl, vstupní teplota 720°C)**

### **Osnova bakalářské práce:**

- 1) Seznámit se s materiálovými vlastnostmi C-C a LSI C-C kompozitů
- 2) Určit materiálové vlastnosti fluoridových solí
- 3) Provést návrh výměníku a jeho výpočty
- 4) Zpracovat výkresovou dokumentaci a popis zařízení spolu s výpočty

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Jílek	Jméno Jan	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	Stavba energetických strojů a zařízení		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Valenta, CSc.	Jméno Václav	
<b>PRACOVÍŠTĚ</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Návrh výměníku tepla (deskový výměník z grafitových kompozitů – typ sůl – sůl, vstupní teplota 720°C)		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2012
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	59	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	57	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	2
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Bakalářská práce obsahuje soupis používaných LSI C/C kompozitů a jejich vlastností. Podobně je toto provedeno s potenciálními médii ve výměníku. Z těchto nabytých znalostí je určen typ materiálu pro konstrukci výměníku a látka pro médium ve výměníku. Následuje návrh deskového výměníku pro zadané hodnoty.</p>
<p><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>Grafitový kompozit, LSI C/C, uhlíkové vlákno, roztavená sůl, fluoridová sůl, FLiBe, výměník, teplo, tepelný výkon, tepelná vodivost</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Jílek	Name Jan	
<b>FIELD OF STUDY</b>	Design of Power Machines and Equipment		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Valenta, CSc	Name Václav	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Graphite composite heat exchanger design (type – salt –salt, inlet 720°C)		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KKE	<b>SUBMITTED IN</b>	2012
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	59	<b>TEXT PART</b>	57	<b>GRAPHICAL PART</b>	2
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>  <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This work deals with the properties of the liquid silicon infiltrated graphite composite, with the properties of molten salts. Obtained knowledges lead to the choice of the materials for design the heat exchanger.
<b>KEY WORDS</b>	Graphite composite, LSI C/C, karbon fibre, molten salt, florine salt, FLiBe, exchanger, heat, thermal conductivity

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Kompozitní materiály.....</b>	<b>9</b>
<b>2.0</b>	<b>Požadavky na materiál pro výměníky.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1</b>	<b>Podstat, použití, historie.....</b>	<b>10</b>
2.1.1	Podstata.....	10
2.1.2	Historie, použití.....	10
<b>2.2</b>	<b>Materiály C/C a LSI C/C.....</b>	<b>11</b>
2.2.1	Uhlíková vlákna.....	12
2.2.2	Výroba C/C a LSI C/C kompozitu.....	13
2.2.3	Některé typy C/C a LSI C/C kompozitů a jejich vlastnosti.....	15
<b>3</b>	<b>Materiálové vlastnosti fluoridových solí.....</b>	<b>21</b>
<b>3.0</b>	<b>Požadavky na chladicí média.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1</b>	<b>Roztavené soli.....</b>	<b>22</b>
3.1.1	Použití roztavených solí.....	22
3.1.2	Výhody roztavených solí.....	23
<b>3.2</b>	<b>Roztavené fluoridové soli.....</b>	<b>24</b>
3.2.1	Přehled.....	24
3.2.2	Termofyzikální vlastnosti směsi FLiBe.....	25
<b>4</b>	<b>Návrh tepelného výměníku.....</b>	<b>30</b>
<b>4.1</b>	<b>Návrhový výpočet výměníku.....</b>	<b>31</b>
4.1.0	Úvod, zadání.....	32
4.1.1	Numerický výpočet.....	32
4.1.2	Plochy výměníku, počet a průřezy kanálů.....	33
4.1.3	Objemové průtoky v kanálech obou proudů a rychlosti proudů.....	35
4.1.4	Určení podobnostních kritérií pro výpočet součinitele přestupu tepla.....	35
4.1.5	Účinnost jednotlivých ploch a žebrování.....	41
4.1.6	Tepelný výpočet výměníku.....	45
<b>4.2</b>	<b>Výstup z numerického řešení.....</b>	<b>47</b>
<b>4.3</b>	<b>Výpočet tlakové ztráty výměníku.....</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>51</b>
<b>6</b>	<b>Přílohy.....</b>	<b>52</b>
<b>7</b>	<b>Použitá literatura.....</b>	<b>53</b>



## Použité symboly a zkratky:

A	[m <sup>2</sup> ]	plocha
c <sub>p</sub>	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	měrná tepelná kapacita
Bi	[-]	Biotovo kritérium
d	[m]	průměr, rozměr
C	[-]	poměr tepelných kapacit
D	[m]	charakteristický rozměr
g	[m.s <sup>-2</sup> ]	gravitační zrychlení
Gz	[-]	Graetzovo kritérium
H	[m]	délka
k <sub>n</sub>	[-]	korekční součinitel pro nekruhový průřez
k	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	součinitel prostupu tepla
L	[m]	délka kanálu
$\dot{m}$	[kg.s <sup>-1</sup> ]	hmotnostní průtok
N	[-]	celkový počet žeber
Nu	[-]	Nusseltovo kritérium
NTU	[-]	počet převodových jednotek
O	[m]	obvod
p	[Pa]	statický tlak
p <sub>z</sub>	[Pa]	ztrátový tlak
Pr	[-]	Prandtlovo kritérium
q	[W.m <sup>-2</sup> ]	měrný tepelný tok
Q	[Q]	tepelný výkon
r	[m <sup>2</sup> .K.W <sup>-1</sup> ]	tepelný odpor
R	[m <sup>2</sup> .K.W <sup>-1</sup> ]	tepelný odpor
Re	[-]	Reynoldstovo kritérium
S	[m]	šířka
t	[m]	tloušťka
T	[K]	teplota
V	[m]	výška
$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	objemový průtok
w	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost proudění
W	[W.K <sup>-1</sup> ]	tepelná kapacita



$\alpha$	[W.m <sup>2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	součinitel přestupu tepla
$\varepsilon$	[-]	účinnost výměníku
$\rho$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota
$\eta$	[-]	účinnost
$\eta$	[N.s.m <sup>-2</sup> ]	dynamická viskozita
$\lambda$	[-]	součinitel tření
$\lambda$	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	součinitel tepelné vodivosti
$\zeta$	[-]	ztrátový součinitel
$\mu$	[kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ]	součinitel dynamické viskozity
$\nu$	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	kinematická viskozita
$\Delta$	[-]	rozdíl

## Seznam obrázků:

- 1 Generace jaderných reaktorů v běhu času
- 2 Struktura grafitu po karbonizaci a grafitizaci
- 3 Detail struktury spoje v kompozitu před a po LSI procesu
- 4 Struktury materiálu LSI C/C opatřeného ochrannou vrstvou
- 5 Průmyslově vyráběné komponenty za materiálu LSI C/C
- 6 Závislost tepelné vodivosti kompozitu C/SiC
- 7 Tepelná vodivost pyrolytického grafitu ve směru podélném s lamelami
- 8 Tepelná vodivost pyrolytického grafitu ve směru kolmém na lamely
- 9 Tepelná vodivost SiC
- 10 Binární diagram LiF-BeF<sub>2</sub>
- 11 Binární diagram směsi LiF – UF<sub>4</sub> [24]
- 12 Binární diagram směsi LiF – ThF<sub>4</sub>
- 13 Průběh tlaku syté páry na teplotě LiF-BeF<sub>2</sub>
- 14 Závislost hustoty směsi LiF-BeF<sub>2</sub> na teplotě
- 15 Závislost dynamické viskozity na teplotě
- 16 Deskový výměník Tetra-Laval
- 17 Závislost teploty proudů na teplotě v protiproudém výměníku
- 18 Schéma jádra výměníku
- 19 Schéma symetrického elementu pro výpočet součinitele prostupu tepla k

- 20 Význam teplosměnných ploch a výšky žebra při výpočtu
- 21 Průběh teplot proudů ve výměníku
- 22 Průběh součinitele prostupu tepla k
- 23 Výměník

# 1 Úvod

## Energetické potřeby lidstva

V době psaní této práce je veřejné a politické mínění o využití jaderných elektráren silně ovlivněno událostmi na jaderných reaktorech v Japonsku, které byly zasaženy zemětřesením a následnou vlnou tsunami. V reakci na tyto události byly velice záhy v některých zemích odsouhlaseny návrhy na uzavření jaderných elektráren nebo omezení jejich životnosti, na něž navazují podněty pro náročné testy. S tímto jdou ruku v ruce názory a návrhy na opuštění cíle rozvoje a modernizace jaderné energetiky, a to jak u politiků, tak ve společnosti, za výrazné podpory médií. Avšak i přes tyto problémy lze předpokládat, že časem hysterie utichne, návrhy budou dalšími vládami zrušeny a společnost se nevyhnutelně vrátí k renesanci jaderných technologií pro zajištění energetické bezpečnosti.

Energetické potřeby lidstva jako celku nerostou úměrně s rychle rostoucím počtem obyvatel planety. Rostou podstatně rychleji z důvodu prudce rostoucí technologické vyspělosti právě v zemích s nejvyšší porodností. Jmenujme Čínu nebo Indii, kde je technologický pokrok posledních deseti let demonstratelný například na produkci automobilů. V Číně bylo v roce 2011 vyprodukováno téměř 18x více automobilů než v roce 2001. Právě automobilový průmysl často bývá velmi dobrým ukazatelem kondice celkové ekonomiky státu. Avšak mimo tisíců nových firem a dílen stoupá i kvalita života zaměstnanců – tedy obyvatel, jejichž zvyšující se koupěschopnost je uspokojována pořizováním elektrických spotřebičů či dalších druhů zboží, jež podléhají postupně se rozvíjejícím módním trendům. Tyto okolnosti mění zmiňovanou uměru počtu obyvatel a energetické potřeby z přímky na ostře rostoucí parabolu.

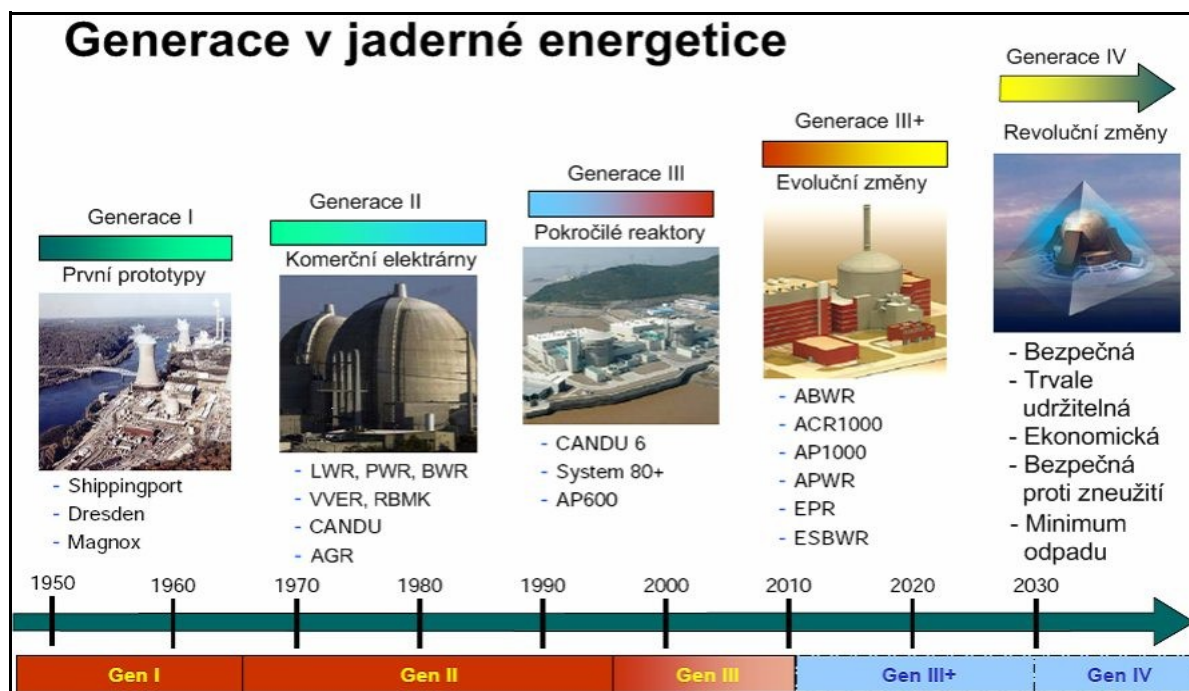
Tyto jevy se samozřejmě dají v menší míře pozorovat i v ostatních částech světa, avšak ve zmíněných lokalitách bude zřejmě inovace a rozšíření energetické infrastruktury nejpotřebnější. Vzhledem ke ztenčujícím se zásobám fosilních paliv a velkému nerostému bohatství velkých zemí je zaostřeno právě na jadernou energetiku. A to především na pokročilé vývojové řady reaktorů III+ a IV, které by měly být schopny operovat s materiály, jejichž výskyt není tak vzácný, jak je tomu u reaktorů II. generace. V tomto ohledu hovoříme především o velkých zásobách thoria v Indii či v Austrálii a možnostech využití transuranů v rychlých reaktorech.

## Generace reaktorů

Celý vývoj jaderných reaktorů (komerčních) se obvykle shrnuje do čtyř generací. V první generaci jsou obsaženy prototypové reaktory, jež měly především ověřit možnosti získávání elektrické energie ze štěpné reakce. Tyto reaktory byly stavěny v padesátých letech na obou

stranách Železné opony. Tyto principy a zkušenosti byly aplikovány pro reaktory druhé generace, které se již stavěly ač jednotlivě, tak v sériích, kdy na sebe jednotlivé reaktory navazovaly. Do II. generace zahrnujeme například tlakovodní reaktory VVER-440 řady 230 nebo pozdější 213, či VVER-1000, stejně jako varné reaktory BWR. Většina momentálně pracujících reaktorů náleží právě ke II. generaci reaktorů. Následují reaktory III. generace, které technologicky vycházejí z generace předchozí, avšak je u nich podstatně více dbáno na bezpečnostní vlastnosti, a to především na prvky pasivní bezpečnosti. Zároveň se počítá s lepším využitím paliva a posunutím životnosti. Velmi pěkně ukazuje rozdělení a povahu reaktorů podle generací obrázek 1. [17]

Obrázek 1.



Ve fázi výstavby jsou již dva reaktory EPR (European Pressurized Reactor) ve Finsku v elektrárně Olkiluoto a ve Francii ve Flamanville, jež spadají do III+ generace, pro niž je charakteristická možnost celkového odstavení reaktoru bez zapojení činnosti aktivních prvků. Provozovatelé jaderných elektráren mají samozřejmě k dispozici více projektů, než je EPR vyvíjený francouzskou Arevou a Siemens AG. Z dalších projektů reaktorů generace III+ jmenujme americký AP-1000, ruský VVER-1000 V-392, německý SWR-1000 nebo japonský ABWR/ESBWR.

Reaktory IV. generace, se kterými se počítá pro 20. až 30. léta tohoto století, se budou opírat o jiné koncepce a principy než stávající reaktory. Důvodem tohoto je, že hlavní snahou je dosažení schopnosti reaktorů pracovat a využívat mimo obvyklých izotopů i další transurany, například  $^{238}\text{U}$  nebo  $^{232}\text{Th}$  pro výrobu energie či pro přepracovávání transuranů na zpracovatelné izotopy. Toto vše samozřejmě za tvrdých bezpečnostních kritérií a minimalizace bezpečnostních a ekologických rizik.

Tyto vlastnosti by měly být přejaty z generace III+ a případně vylepšeny.

V roce 2001 vzniklo Mezinárodní fórum pro IV. generaci reaktorů (*The Generation IV International Forum*)[19], které zprostředkovává efektivní vývoj této technologie na mezinárodní úrovni. Členem není z významných technologických velmocí pouze Indie, která disponuje vlastní koncepcí vývoje pokročilých reaktorů, jež je orientována především na využití thoria, jímž Indie velmi bohatě disponuje. Tato organizace představila souhrn požadavků na reaktory IV. generace a zároveň předkládá šest možných reaktorů pro jejich splnění. Mezi požadavky patří bezpečnost a minimalizace nebezpečí zneužití jaderného materiálu, co nejlepší ekonomika výstavby a provozu, prodloužení životnosti reaktorů, snížení provozních nákladů a větší efektivita, zapojení vodíkového hospodářství, uzavření palivového cyklu a využití potenciálu veškerého štěpitelného materiálu.

### Šest typů navržených reaktorů

- Reaktor s roztavenými solemi MSR (*Molten Salt Reactor*)
- Sodíkem chlazený rychlý reaktor SFR (*Sodium cooled Fast Reactor*)
- Olovem chlazený rychlý reaktor LFR (*Lead cooled Fast Reactor*)
- Plynem chlazený rychlý reaktor GFR (*Gas cooled Fast Reactor*)
- Vysokoteplotní reaktor VHTR (*Very High Temperature Reactor*)
- Superkritickou vodou chlazený reaktor SCWR (*Supercritical Water cooled Reactor*)

Velký důraz se klade především na rychlé, případně množivé, reaktory, které jsou dnes v energetice využívány minimálně. V Rusku, v Bělojarsku, běží množivý reaktor BN-600 bez problémů a počítá se s jeho nahrazením další vývojovou řadou BN-800. V dalších zemích běží pouze testovací nebo vojenské rychlé reaktory, jako například ve Francii reaktor Phoenix, který funguje spíše v testovacím režimu, avšak díky tomu dodává odborné veřejnosti důležité poznatky o rychlých reaktorech. Rychlý reaktor v Monju v Japonsku je po havárii v roce 1995, kdy vznikl požár po úniku sodíku na sekundárním okruhu, je stále v rekonstrukci. Uvažíme-li však momentální situaci v Japonsku a vůli pro rozvoj jaderné energetiky, cítíme, že nad budoucností tohoto a případných dalších rychlých reaktorů se stahují mraky.

### Rychlé reaktory

Výhodou rychlých reaktorů je možnost zpracovávat  $^{238}\text{U}$  na  $^{239}\text{U}$ , který se beta-rozpadem přeměňuje na  $^{239}\text{Pu}$ , které je použitelné jako palivo v klasických i rychlých reaktorech. Právě izotop  $^{238}\text{U}$  je v přírodě obsažen v uranové rudě z 99%, zatímco palivo ve VVER a dalších klasických

reaktorech –  $^{235}\text{U}$  – pouze v množství asi 0,7%. Hlavní výhodou rychlých reaktorů je tedy efektivní zpracování transuranů, tím pádem i „vyhořelého“ paliva ze stávajících jaderných elektráren. Technologie spočívá ve štěpení pomocí nemoderovaných (nezpomalených) neutronů, u nichž se však kvůli tomu snižuje pravděpodobnost zachytu na  $^{235}\text{U}$ , tedy i štěpení. Z tohoto důvodu musí být použito mnohem více neutronů, stejně tak jako obohacení  $^{235}\text{U}$ . Obohacení u rychlých reaktorů se pohybuje nad 20%, oproti 3 – 4% u reaktorů tlakovodních nebo varných. Pokud je reaktor správně nakonfigurován, je možné produkovat více  $^{239}\text{Pu}$  než je v reaktoru spotřebováno. Takový reaktor se nazývá množivým. [20]

Následkem zvýšení těchto parametrů však vzniká i podstatně více tepla, jehož odvádění je poměrně problematické, a jež bylo i původcem havárie v japonském Monju. Vzhledem k tomu, že rychlé reaktory jsou v relaci s klasickými reaktory kompaktnější, musí být jejich ochlazování mnohem efektivnější. Z tohoto důvodu bývá realizováno pomocí tekutých kovů – sodíkem nebo olovem, které mají podstatně vyšší objemovou tepelnou kapacitu za běžného tlaku než voda, resp. pára. Právě pro tyto aplikace zdají být ideálními i fluoridové soli. Protože i operační teplota podstatně vyšší, je nutné se zbývat i vhodnými materiály pro výměníky, potrubí a podobné. Zde přicházejí v úvahu ocelové slitiny jako Hastelloy nebo MoNiCr, grafitové materiály typu Nuclear Grade nebo Toyo Tanso, případně právě grafitové kompozity s infitrovaným tekutým křemíkem.

## 2 Kompozitní materiály

### 2.0 Požadavky na materiál pro výměníky

Tato část práce specifikuje nutné vlastnosti, jimiž by měl materiál použitý pro konstrukci výměníku s roztavenými solemi disponovat. Materiál bude vystaven vysokým teplotám, a to až nad 1000°C. V těchto řádech již běžně používané materiály nevyhovují kvůli změnám na molekulární úrovni, které mohou být natolik významné, že materiál, nebo jeho součásti, mohou měnit fáze, či dokonce skupenství. Samozřejmostí je přímý kontakt materiálu s vysoce reaktivními a radioaktivními solemi, jejichž možná míra agresivity vůči vnějšímu prostředí narůstá se stoupající teplotou. Konvenční materiály jsou vůči tomuto mixu neodolné. Výměník sice nebude vystaven vysokým tlakům, ale jeho dlouhodobější mechanické vlastnosti budou důležitým ukazatelem při výběru vhodného materiálu. Tento požadavek je umocněn potřebou stability těchto vlastností za změněných podmínek – chemických, radiačních a především teplotních. V podobných aplikacích musíme předpokládat také dlouhou životnost.

#### Hlavní požadavky na materiál:

- Chemická odolnost
- Vysoká tepelná vodivost
- Korozivzdornost
- Stabilita fyzikálních, chemických a tepelných vlastností za vysokých teplot
- Neprodyšnost
- Pevnost v tahu a tlaku
- Nízká teplotní roztažnost
- Odolnost materiálu v radioaktivním prostředí
- Životnost a bezpečnost

Podle dosavadních zkušeností a experimentů s materiály vyhovujícími těmto podmínkám a použití je doporučováno několik typů materiálů [3]:

- **Vysokoteplotní Ni-Mo slitiny – Hastelloy N**

V experimentu provedeném SVÚM a Škodou Výzkum [8] dosahoval tento materiál velice příznivých hodnot v případě korozní odolnosti i ve velmi agresivním prostředí fluoridových solí. Bohužel u něj bylo zaznamenáno radiační zkřehnutí za vysokých teplot, jež bylo redukováno modifikací titanem a niobem. Materiál rovněž vykazuje vysokou mechanickou pevnost za vysokých teplot, s níž ovšem souvisí obtížná tvařitelnost.

- **Vysokoteplotní feritické oceli**

Schopné odolávat ionizujícímu záření do teplot okolo 750°C, možné užití RFS (roztavených fluoritových solí) a kyselin

- **Grafitové materiály**

Za zástupce čistě grafitových materiálů pro námi uvažované aplikace jsou považovány dva vyvinuté materiály – Toyo Tanso IG-11 a Nuclear Grade 2020.

- **C/C a LSI C/C SiC kompozity**

Schopné pracovat při teplotě okolo 1000°C. Odolné vůči roztaveným fluoridovým solem (RFS) a ionizujícímu záření, kdy se mechanické a fyzikální vlastnosti nemění. Možné použití pro výrobu vodíku.

## **2.1 Podstata, použití, historie**

### **2.1.1 Podstata**

Kompozitními materiály chápeme materiály složené ze dvou nebo více heterogenních materiálů, jež se významně liší svými vlastnostmi. Výsledný materiál disponuje vlastnostmi, které původní substance samy o sobě postrádají. Platí zde tzv. „pravidlo synergie“, které je reprezentováno vztahem  $1 + 1 > 2$ . Tento jednoduchý vztah popisuje zlepšení vlastností výsledného materiálu oproti prostému součtu vlastností materiálů původních. Je obvyklé, že použité materiály (spojitá část – matrice, nespojitá část – výztuž) mají rozdílné mechanické, fyzikální nebo chemické vlastnosti, v závislosti na požadavku na konečný materiál. Například v případě požadavku na pevnost materiálu obvykle bývá pevnostní charakteristika matrice významně vylepšena přidanou výztuží. Typů kompozitních materiálů je celá řada, počínaje překližkami přes polymery a termosety až ke grafitovým hi-tech materiálům. Dělí se obvykle podle použité matrice a výztuže. Matrice mohou být kovové, polymerní nebo keramické, výztuže vláknové nebo vrstevnaté.

### **2.1.2 Historie, použití**

Počátek užívání kompozitních materiálů můžeme nalézt již 6000 před naším letopočtem, kdy se při stavbách obydlí používaly pletené proutěné stěny pomazané hlínou [10]. I tento primitivní postup je možné zahrnout mezi kompozitní materiál, protože výsledný materiál disponoval vlastnostmi, které oba původní materiály samostatně neměly. Pevnost zprostředkovala pletená „výztuž“ a tvar a nepropustnost zajišťovala matrice z mazlavé hlíny. Mezi další jednoduché, ačkoliv postupem času podstatně vylepšené, technologie výroby kompozitu můžeme zahrnout například výrobu vepřovicových cihel z nepálené hlíny a organické složky – slámy nebo chlěvské mrvy.



Novějším a pravděpodobně nejrozšířenějším kompozitem je cementový hydraulický beton. Jeho první použití s hydraulickými sádrami spadá do období antiky. Zde tvoří složky plnivo a pojivo, obvykle kamenivo a cement. Kompozitní materiál lze vyrobit i ze dřeva, příkladem jsou překližky. Zde se na sebe křížně skládají dýhy a poddyžky různých tloušťek a lepí se k sobě kličem.

Největší rozmach ve vývoji kompozitních materiálů začíná v období II.světové války, kdy se poprvé začínají používat reaktoplasty a pryskyřice. Již v této době je zaznamenáno první použití grafitového kompozitního materiálu pro řídicí křídélka německých raket V2, kde na koncových tryskách motorů bylo dosahováno tak vysokých teplot, že konvenční slitinové materiály byly jejich vlivem roztaveny. Následný rozmach chemie, ropného průmyslu a technologií dal prostor výzkumu pokročilých materiálů na bázi polymerních a keramických kompozitů. Uveďme například paraaramidové vlákno známé jako Kevlar, které bylo v 70.letech původně vyvíjeno jako výztuž do pneumatik. Následně se však díky vysoké pevnosti a vyjímečným tepelným vlastnostem proniklo do mnoha dalších odvětví, počínaje díly raketoplánů a brzdových kotoučů (kde tvoří náhradu problematického azbestu), sportovním vybavením konče.

## 2.2 Materiály C/C a LSI C/C

Materiály velice atraktivní pro použití v konstrukcích jaderných elektráren IV. generace, potažmo jejich komponent v odvětví vysokoteplotního odvodu teple. Kromě jejich schopnosti pracovat za minimálně změněných mechanických vlastností při teplotách až 1400°C, možnosti pracovat v kontaktu s roztavenými fluoridovými solemi, kyselinami a heliem, je zde zajímavá i ekonomická dostupnost, již zajišťuje snadné formování do požadovaných tvarů, avšak zároveň prodražuje potřeba po delší čas exponovat polotovary vysokým teplotám. Zkratka LSI C/C znamená *Liquid Silicon Infiltrated Carbon/Carbon*, což v překladu znamená „kompozit typu uhlík/uhlík infiltrovaný tekutým křemíkem“. Pod pojmem „infiltrace“ zde rozumíme pomalé vsakování tekutiny do porézního materiálu. [5]

Materiály C/C byly vyvíjeny v German Aerospace Center DLR, z nichž vycházejí materiály LSI C/C (C/SiC), které vznikly na základě požadavku na větší houževnatost původních C/C monolitů. U materiálů LSI C/SiC tvoří výztuž nasekaná grafitová vlákna různých délek, která jsou následně LSI procesem upevněna v SiC matici [2]. Tyto materiály byly původně vyvíjeny pro kosmonautiku, následně se však rozšířily do dalších odvětví.

### 2.2.1 Uhlíková vlákna

Výrobní postup se sestává ze třech základních částí, které obsahují další operace [6]:

- výroba základního C/C polotovaru v požadovaném tvaru
- vytvoření matrice pyrolýzou
- proces infiltrace tekutého křemíku

V těchto materiálech hrají největší roli uhlíková vlákna. Jedná se o dlouhý, tenký pramen o průměru okolo 5-8  $\mu\text{m}$  složený z atomů uhlíku, které jsou spojeny v mikroskopické krystaly. [11] Tato vlákna obvykle mívají tloušťku v řádu rednotek mikrometrů, což je několikrát méně než lidský vlas, který má mezi 20 – 150 mikrometry.

Postup výroby uhlíkového vlákna [11]:

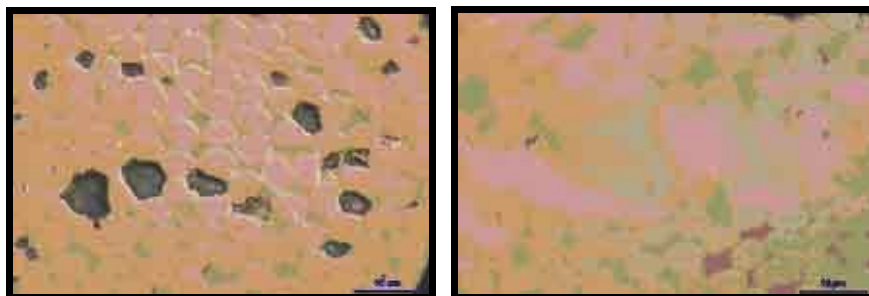
- **Příprava prekurzoru** – úprava výchozího materiálu (polyakrylu) zvlákněním na požadovanou jemnost
- **Stabilizace** – z dlouhých vláken vzniká teplotně stabilní zesítěná struktura. Provádí se na vzduchu zahřátím na teploty 200 – 450°C na dobu 20 – 30 minut. Ze vzduchu vlákno vstřebává kyslíkové molekuly a dochází k přerovnání atomové struktury vlákna.
- **Karbonizace** – převod prekurzoru na uhlíková vlákna, provádí se v interní atmosféře při teplotách mezi 1000 – 2000°C. Inertní atmosféra zajišťuje nehořlavost materiálu. Většina neuhlíkových atomů je odstraněna. Výsledné vlákno obsahuje 85 - 95% uhlíku.
- **Grafitizace** – vznikají grafitová vlákna v inertní atmosféře při teplotách 2400 – 3000°C. Dochází ke zvýšení obsahu uhlíku přibližně na 99% a více. Vzniká vrstevnatá struktura. Nemusí se provádět, případně se provádí až během procesu výroby C/C kompozitu.
- **Povrchová úprava** – povrch se mírně oxiduje z důvodu lepší vaznosti epoxidů, což je výhodné při výrobě kompozitových materiálů. Oxidace způsobí zhrubnutí povrchu a tím lepší přílnavost dalších látek, případně mechanické spojení. Okysličuje se vzduchem, oxidem uhličitým, ozonem, nebo ponořením do různých kapalin, např. Chlornanu sodného nebo kyseliny dusičné.

### 2.2.2 Výroba C/C a LSI C/C kompozitu

Výroba začíná u základního **C/C polotovaru**. Použijí se uhlíková vlákna, jejichž výroba byla popsána v kapitole 1.2.1, a vhodná pryskřice, obvykle fenolové. Polotovar se vytvaruje lisováním do vhodného tvaru. Tvar se odvíjí již od potřeby konečného tvaru a je opatřen pouze technologickými přídávky nebo přídávky pro případné obrábění. Po homogenizaci směsi se přistupuje k lisování, které může být dvojího typu – buď isostatické nebo jednosměrné. Podle typu lisování je použita jeho technologie – v autoklávu ve vakuovém vaku, resp. v uzavřených nebo otevřených ocelových formách. Lisování probíhá při tlaku 20 bar a teplotě dosahující 250°C.

Dalším krokem je **pyrolýza**, při které probíhá karbonizace, případně grafitizace pojiva. Při karbonizaci se vylučují přebytečné atomy nepotřebných látek, a z fenolových pryskyřic tak vylučuje grafit s různým výtěžkem. S rostoucím výtěžkem grafitu klesá pórovitost základního materiálu. Proces karbonizace probíhá v podstatě při identických podmínkách jako u výroby uhlíkových vláken, tedy při teplotách okolo 1000°C. Obdobně probíhá grafitizace, která slouží pro vyšší výtěžek grafitu a pro upravení struktury materiálu. Ta probíhá při teplotách 2000 – 2600°C. Na obrázku 2. můžeme vidět porovnání struktury kopozitu po karbonizaci (a) a po grafitizaci (b).

Obrázek. 2: Struktura grafitu po karbonizaci a po grafitizaci

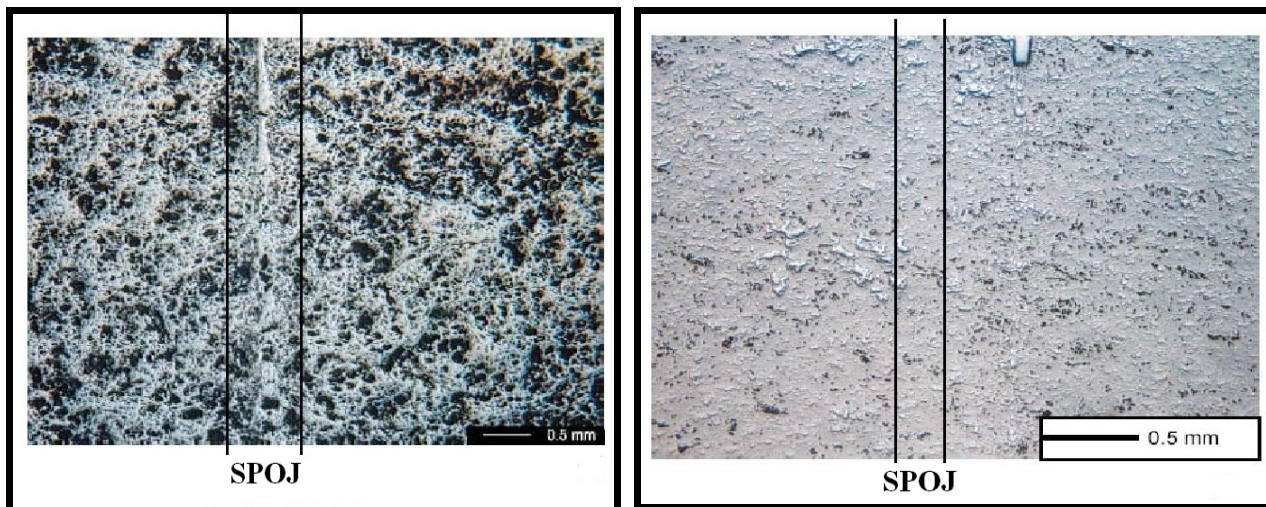


a)

b)

Po pyrolýze je možné materiál **obrábět** do požadovaného tvaru. Plochy, které jsou určeny pro spojování s dalšími částmi se obrábí s vyšší přesností  $\pm 0,2$  mm [6]. **Spojování jednotlivých součástí** se následně provádí pomocí fenolových pryskyřic, podobných jako u základního materiálu. Samotné spojení se opět provádí pyrolýzou, kdy se z pryskyřice vylučuje grafit, ne jehož výtěžnosti z pryskyřice závisí poréznost a tím i nepropustnost spoje. Pevností charakteristiky spojů vykazují takřka identické hodnoty jako původní materiál. [6] Na obrázku 3 si můžeme povšimnout, že spoje jsou v materiálu vizuálně velmi málo patrné.

Obrázek. 3: Detail struktury spoje v kompozitu před a po LSI procesu



Následuje LSI proces, kterému může předcházet nástřik materiálu pyrolytickým karbonem (CVI metoda) (*Chemical Vapour Infiltration*). Při **infiltraci tekutého křemíku (LSI)** [5] dochází k naplnění pórů pospojovaného materiálu tekutým křemíkem. Ten při teplotách okolo 1600°C vytváří spolu s grafitem keramickou fází SiC. Při nestechiometrickém poměru C a Si vzniká volný křemík, který se vylučuje do pórů materiálu. Infiltrace se provádí v inertní atmosféře nebo ve vakuu, protože samotný uhlík snadno oxiduje již při 400°C.

Zároveň musejí být C-SiC součásti chráněny proti difuzi kyslíku do materiálu a zároveň difuzi uhlíku z materiálu. Tyto jevy minimalizují **nástřiky povrchových vrstev**, jež mají nízkou úroveň difuze. Keramický substrát SiC musí být zároveň chráněn před oxidací a korozí v prostředí vysokoteplotních cyklů. Je také zapotřebí ustavit jistou bariéru mezi kompozitem a médiem, například vodní párou nebo RFS, které svou agresivitou při vyšších teplotách vodní páru značně překonávají. Degradace kompozitu se umocňuje při práci v prostředí, kde se často teplota mění a pohybuje se okolo 1200°C a výše.

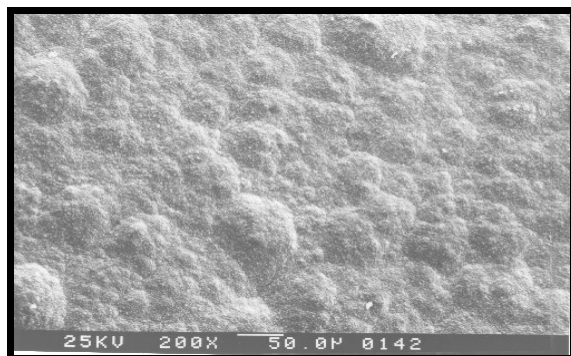
Povlakování může být realizováno například usazováním chemických odparů CVD (*Chemical Vapour Deposition*) nebo technologií VPS (*vacuum plasma spraying*), které jsou již prozkoumány, nebo zvažovány k použití. Některé zmiňované metody v použití s různými materiály vidíme v tabulce 1.

Tabulka 1: Metody úpravy povrchových vrstev

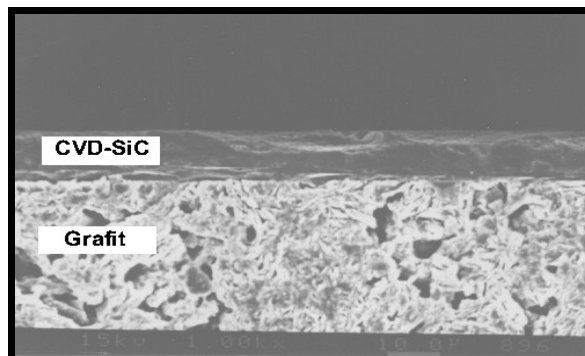
<i>SiC: CVD-SiC</i>	Tloušťka 50 – 200 μm, mikrotrhliny jsou naplněny oxidem křemičitým, čímž je zabráněno kontaktu s kyslíkem, funkční i při teplotách nad 1100°.
<i>BoraSiC: Multilayer CVD- BoraSiC</i>	Třívrstvé obalení LSI kompozitu sloučeninou SiC-B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiC, který zajišťuje „samoobdravný“ mechanismus díky tvorbě karbidů boru okolo teploty 900°C.
<i>Yttrium silicates</i>	Silikáty yttria jsou vhodné z důvodu nízkého koeficientu teplotní roztažnosti, nanášená tloušťka je v mezích 40-150 μm pomocí technologie VPS.
<i>Cordierite</i>	Minerál skupiny cyklosilikátů (2MgO*2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *3SiO <sub>2</sub> ) zajišťuje vynikající ochranu jak oxidativních atmosférách, tak v korozně agresivních prostředích. Možné nanášet vrstvu pomocí VPS v tlouškách 50-400 μm.
<i>Pyrocarbon</i>	Pyrolitický uhlík je primárně používán k těsnění povrchů C/C polotovarů a grafitových materiálů. Vykazuje vysoce izotropickou a jednotně orientovanou strukturu. Použití pro LSI zatím není ověřeno. Vynikající odolnost vůči roztaveným solem, díky jeho nízké smáčivosti.

Na obrázku 4a a 4b můžeme vidět strukturu materiálu opatřeného ochrannou vrstvou metodou CVD. Na obrázku 5 některé průmyslově vyráběné komponenty z LSI C/C kompozitu.

Obrázek 4:



a)



b)

Obrázek 5:



### 2.2.3 Některé typy LSI C/C kompozitů a jejich vlastnosti

Tato podkapitola překládá informace o různých LSI kompozitech vyvinutých v German Aerospace Center. [5]

- **XB kompozit** - ve struktuře se zde objevují vlákna s vysokou houževnatostí a tekutá fenolová pryskyřice. 2D zpracování jsou užívána bez dalších modifikací, kromě sušení při 100°C po dobu jedné hodiny. Toto se provádí kvůli odstranění absorbované vlhkosti. Tyto kompozity mohou být (podobně jako následující XT, XD a XG) přednostně zpracovávány RTM (*Resine Transfer Molding*) nebo v autoklávech.
- **XD kompozit** - pokud je úprava vlákna provedena před CFRP (*Carbon-fiber-reinforced polymer*) zpracováním na zvýšených teplotách, mikrostruktura C/C – SiC může být významně změněna. S rostoucí teplotou, při níž probíhá prvotní úprava (řádově od 600°C do 1700°C), seskupení hustých C/C segmentů je bržděno vlivem silnějších chemických vazeb mezi vlákny a uhlíkovou maticí. Následkem tohoto je během pyrolýzy vytvořeno více a více náhodně orientovaných prasklin, jež umožňují vstup většího objemu tekutého křemíku do materiálu a tím snížení namáhání uhlíkových vláken.
- **XT kompozit** - použití přiměřených teplot pro prvotní úpravu vláken v kombinaci s středním rozměrem vláken, hodnoty mechanického namáhání mohou být významně vyšší než u XB kompozitů.
- **XG kompozit** - jsou zde kombinovány předem upravené 2D fabrikáty ve dvou různých rovinách v symetrickém rozložení uvnitř jednoho kompozitu. Čím vyšší bude teplota prvotní úpravy vlákna, tím vyšší bude přestupní koeficient vláken do kompozitu během konečné infiltrace křemíkem.
- **SF kompozit** - pro dosažení tohoto kompozitu jsou používána levná krátká uhlíková vlákna s rozdílnými délkami (5 - 40 mm) a jsou smíchána s fenolovou pryskyřicí, která může být v podobě prášku nebo tekutá, v homogenní sloučenině. Tato sloučenina je poté tvářena osovým stlačováním. Tato technika je preferována z důvodu možnosti vytvoření většího množství součástí ve tvaru sítě (podobně jako součástky v modelářství), což má v sériové výrobě nízké finanční náklady. Sériová produkce automobilových brzdových kotoučů užívá právě tohoto kompozitu
- **B1 kompozity** – atypický kvaziizotropický kompozit, jehož finální vlastnosti nejsou determinovány uhlíkovými vlákny, může být proveden jako směs velmi krátkých uhlíkových vláken (<1 mm) a prachu z fenolových pryskyřic nebo prachu z levného

dřeva. Tato směs může být formována do desek o tloušťce až 60 mm nebo přímo to požadovaných tvarů. Desky jsou vzduchotěsné díky struktuře bez defektů a mikrotrhlin. Oproti ostatním uvedeným kompozitům obsahuje pouze 20 – 30% uhlíkových vláken. Na druhou stranu však také značný obsah křemíku a jeho karbidů, což může vést ke zvýšené křehkosti částí. Zároveň však vykazuje i vysoký Youngův modul a pevnost, díky čemuž je tento materiál použitelný pro odlehčené součásti s vysokou tuhostí.

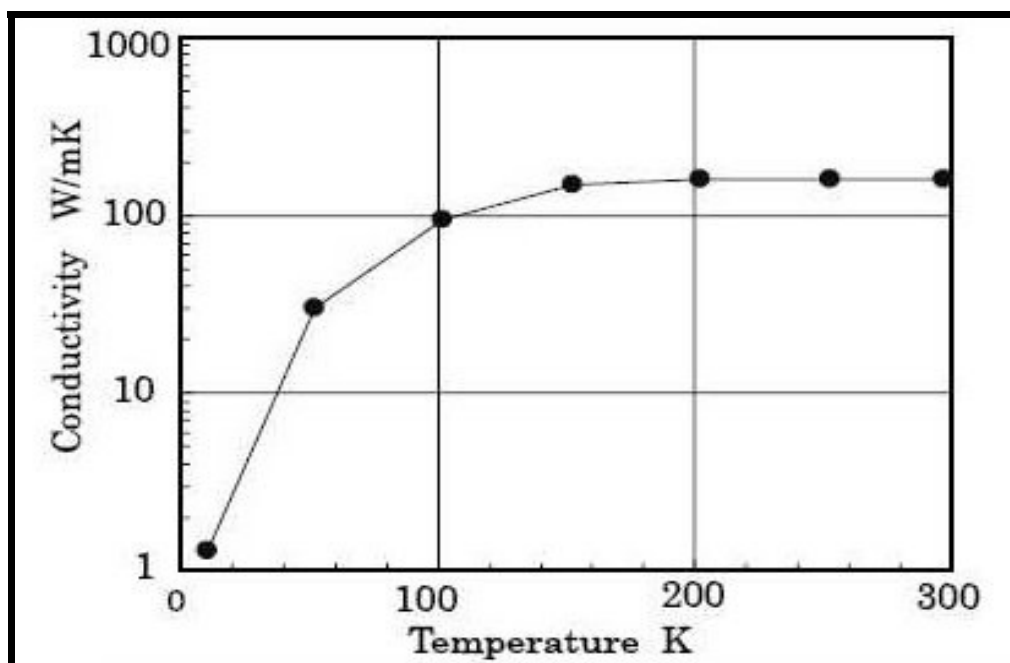
V tabulce 2 jsou uvedeny mechanické a fyzikální hodnoty výše zmíněných materiálů.

Tabulka 2 – porovnání vlastností různých typů SiC kompozitů

	Jednotky	XB	XD	XT	XG	SF	B1
Hustota	g/cm <sup>3</sup>	1,9	2,3	1,9	2,1	2,1-2,3	2,8
Pórovitost	% obj.	3,5	2,8	3,7	<5	1.3.2012	<1
Pevnost - ohyb	MPa	160	80	300	65-80	90-140	185
Pevnost - tah	MPa	80	30	190	31	N	N
Zátěž do porušení ( $\varepsilon$ )	-	0,15	0,04	0,35	0,15-0,2	N	N
Youngův modul	GPa	60	100	60	41	50-70	294
Tepelná vodivost	W/mK	10	19	13	19	25-30	45
Koeficient tepelné roztažnosti	10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	2,5-6,5	4,5	2,5	N	1,0-4,0	2,6
Obsah Si	% mol	6	2	5	3	4	33
Obsah SiC	% mol	33	61	31	47	44	59
Obsah C	% mol	61	37	64	50	52	8

Tyto hodnoty pocházejí z práce [5], nejsou u nich však specifikovány teploty, při nichž byly získány. Toto jejich výpovědní hodnotu poněkud poníží, avšak komparací s dalšími statěmi, jež se zabývají podobnými materiály, je možné získat alespoň řádově neznámou teplotu. Avšak přistoupíme-li k porovnání, zjistíme, že tyto uvedené typy kompozitů mají především u tepelné vodivosti velice nízké hodnoty. Jedním z mála grafů závislosti teploty C/SiC kompozitu na jeho tepelné vodivosti je obrázek 6, který pochází z práce U. Papenburga [13], který odkazuje na práci T. Ozakiho o materiálu pro vesmírný teleskop SPICA. Některé poznatky z této práce jsou shrnuty v [14].

Obrázek 6: Závislost tepelné vodivosti kompozitu C/SiC na jeho teplotě podle [13]



Na obrázku 6 vidíme strmý vzestup vodivosti s teplotou od absolutní nuly do cca 100-150K. Kde další závislost ukazuje přímku. I při této teplotě, odpovídající cca  $-150^{\circ}\text{C}$ , ukazuje graf hodnoty tepelné vodivosti rozmezí 150 – 180 W/mK.

Práce [14] udává u C/SiC kompozitu při pokojové teplotě 125 W/mK, práce [12] hodnotu 135 W/mK. Tyto hodnoty velice značně nekorrespondují s hodnotami v tabulce 2. Můžeme ovšem předpokládat, že materiály ve výše uvedeném seznamu jsou jiného druhu, než hi-tech materiál SPICA. Přesto jsou tyto rozdíly zarážející, avšak Peterson v práci [6] uvádí rozsah od 20 – 135 W/mK, takže se opravdu s největší pravděpodobností jedná o široký rozsah fyzikálně-tepelných vlastností těchto materiálů.

Lepší náhled na tepelné vlastnosti těchto materiálů předkládá výzkum Centra pro energetický výzkum při univerzitě v San Diegu, Kalifornii (*Center for Energy Research, University of California, San Diego*) v programu Advanced Energy Technology Group. V tomto programu se zabývají mnoha materiály použitelnými v pokročilých reaktorech, včetně grafitu [15] a SiC [16]. Bohužel nikoliv jejich kombinací LSI C/C. Hodnoty tepelných vodivostí jsou uvedeny v tabulkách 3 a 4 a následně vyneseny do grafů na obrázcích 7 a 8. U těchto hodnot je zapotřebí dávat dobrý pozor na směr, ve kterém jsou hodnoty měřeny. Může být kolmý, či rovnoběžný s uhlíkovými vlákny.



Tabulka 3: Fyzikální a tepelné vlastnosti pyrolytického grafitu [15]

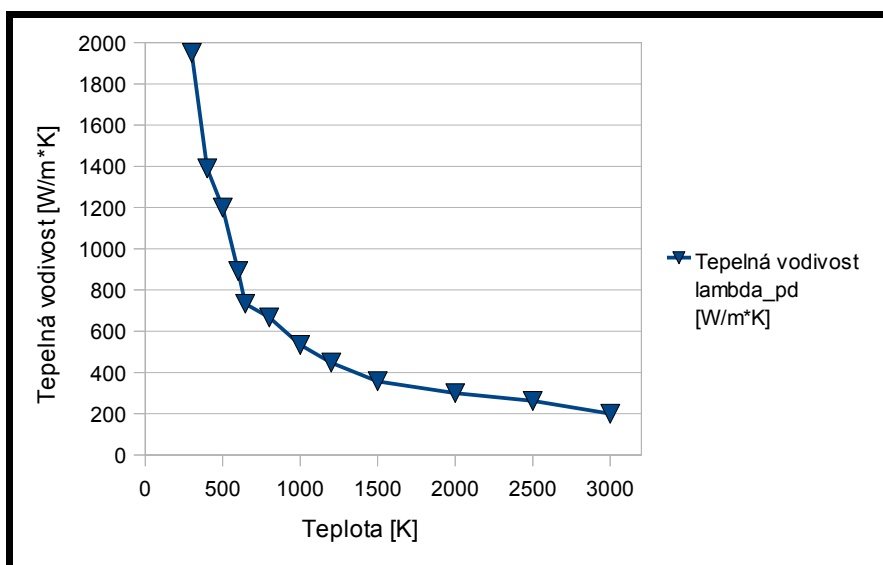
Teplota [K]	Youngův modul [GPa]	Tepelná vodivost $\lambda_{pf}$ [W/m*K]	Tepelná vodivost $\lambda_{pd}$ [W/m*K]	Měrná tepelná kapacita C [J/kg*K]
300	5,35	5,7	1950	709
400	5,37	4,09	1390	992
500	5,4	3,49	1200	1215,2
600	5,45	2,68	892	1406
645	5,48	2,45	733,3	1485,2
800	5,6	2,01	667	1650
1000	5,8	1,6	534	1793
1200	6,04	1,34	448	1890
1500	6,5	1,08	357	1974
2000	7,5	0,11	300	2130
2500	8,7	0,81	262	2190
3000	10,08	0,7	200	2230

Tabulka 4: Fyzikální a tepelné vlastnosti SiC [16]

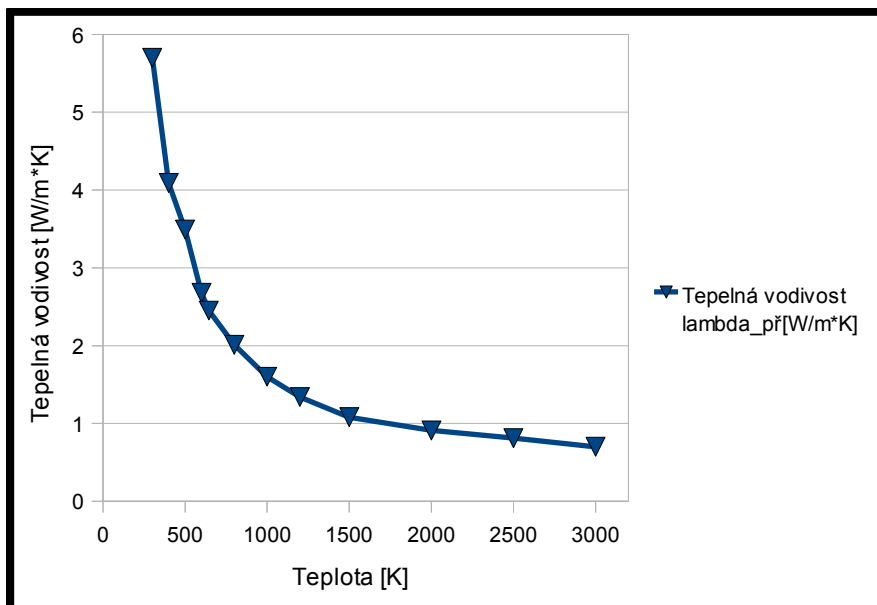
Teplota [K]	Youngův modul [GPa]	Tepelná vodivost $\lambda$ [W/m*K]	Měrná tepelná kapacita C [J/kg*K]
300	569,98	490	675,4
400	471,16	252,32	808,32
500	416,44	186,71	965
600	393,27	160,29	1043
700	391,43	140,2	1100
800	389,11	119,27	1144
900	387,68	102,11	1179
1000	365,32	86,21	1208
1100	311,82	70,73	1232
1200	214,63	57,75	1253
1300	61,21	43,04	1271
1400	10,08	0,7	2230
1500	lq	35,15	1300
1600	lq	21,76	1313
1700	lq	16,74	1324

V tabulce 3 pro grafit jsou uvedeny dvě hodnoty pro tepelnou vodivost  $\lambda$ . Jedna se týká směru kolmého na orientaci grafitových vláken ( $\lambda_{př}$ ), druhá ( $\lambda_{pd}$ ) na směr podélný s vlákny. Pohledem na rozdílnost obou hodnot můžeme posoudit důležitost tohoto hlediska. Hodnoty se liší o několik řádů. V praxi bychom tedy velice uvítali, kdyby se přestup tepla realizoval právě ve směru uhlíkových vláken, na což je nutné dbát a zdůraznit při výrobě součástí. Pohledem na tabulky můžeme obecně usoudit, že v LSI C/C kompozitu bude SiC matrice koeficient vedení tepla  $\lambda$  snižovat, avšak v porovnání s případnými nedostatky v orientaci grafitových vláken je toto zanedbatelné.

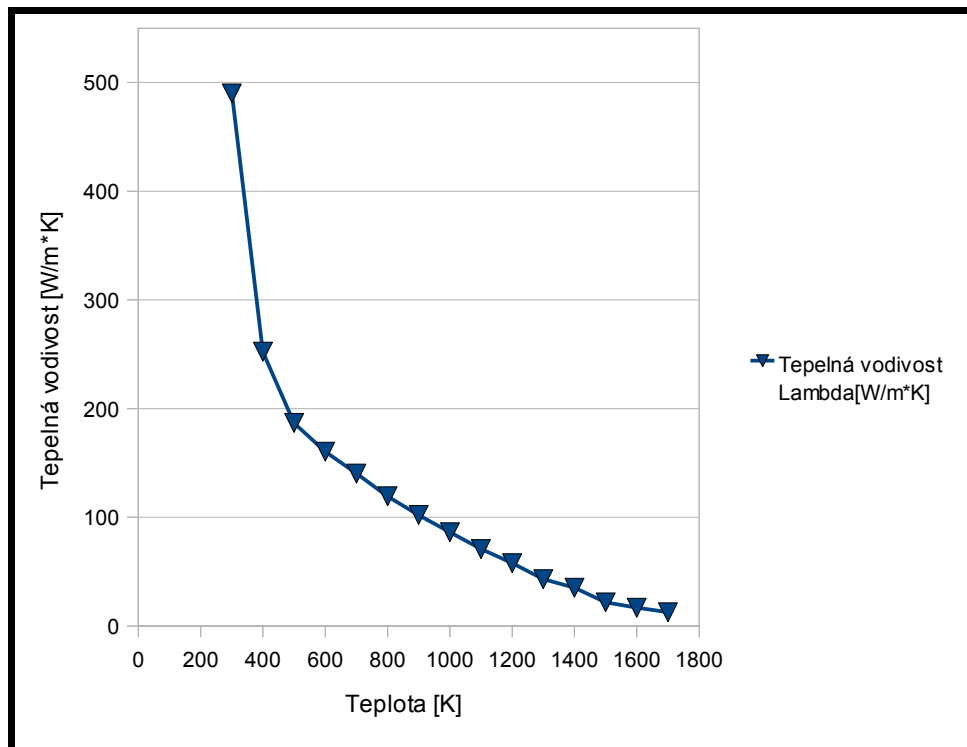
Obrázek 7: Tepelná vodivost pyrolytického grafitu ve směru podélném s lamelami



Obrázek 8: Tepelná vodivost pyrolytického grafitu ve směru kolmém na lamely



Obrázek 9: Tepelná vodivost SiC



Předběžně bychom mohli pro naši potřebu usuzovat z teploty 1000K, která přibližně odpovídá 720°C. Na této teplotě ukazuje grafitový materiál hodnotu  $\lambda = 534 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  v podélném směru a  $\lambda = 1,6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ . Hodnota pro 1000K u SiC je  $\lambda = 86,21 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ . Budeme uvažovat předpoklad, že přestup tepla bude realizován právě ve směru podélném s lamelami grafitu. Jednoduchou úvahou o složení LSI C/C kompozitu, které je uvedeno v tabulce 2, můžeme stanovit hmotnostní poměr materiálů v kompozitu. Obvyklý poměr grafitu a SiC je přibližně 61:33. Prostým přenásobením hmotnostních poměrů materiálů a jejich tepelných vodivostí dostaneme výslednou tepelnou vodivost kompozitu (podle vzorce 1).

Vzorec 1: Přepočítání tepelné vodivosti výsledného kompozitu

$$\lambda_{komp} = \frac{\lambda_{Gpd} \cdot m_G + \lambda_{SiC} \cdot m_{SiC}}{m_G + m_{SiC}} = \frac{534 \cdot 61 + 86,21 \cdot 33}{61 + 33} = 376,8 \doteq 377 \frac{W}{mK}$$

Tento jednoduchý přepočítání samozřejmě počítá s přímou úměrností a nezohledňuje zmíněné pravidlo synergie u kompozitního materiálu. Poskytuje nám však alespoň orientační nástin hodnoty, s níž je možné dále pracovat. V případě realizace při tvorbě modelu by bylo nezbytné pořízení vzorků materiálů a určení jejich tepelných vlastností experimentálně.

## 3 Materiálové vlastnosti fluoridových solí

### 3.0 Požadavky na chladicí média

Vývoj reaktorů IV. generace přináší vysoké nároky jak na materiály, z nichž budou zařízení konstruována, tak na materiály pracovních médií. Šest typů v úvodu zmíněných reaktorů je orientováno na rozdílná pracovní média, což je možné odvodit z názvů. Podle jejich funkčních principů se odvozují požadavky na média, a to od schopnosti moderace neutronů, přes možnosti rozpouštění paliva v médiu, až po toxicitu či bezpečný provoz medií v konstrukcích z různých materiálů. Obecné požadavky pro všechny reaktory lze shrnout do několika bodů:

Tabulka 4: Požadavky na pracovní média

<b>Fyzikální vlastnosti:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• vysoká tepelná kapacita</li><li>• nízká teplota tavení</li><li>• vysoká teplota varu</li><li>• hustota látky</li><li>• vazkost látky</li></ul>	<b>Fyzika aktivní zóny:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• reaktivita pracovního média</li><li>• schopnost moderace</li><li>• stabilita v radioaktivním prostředí</li><li>• malý účinný absorbnční průřez</li><li>• nízká aktivace od toku neutronů</li></ul>
<b>Ekonomičnost:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• cena</li><li>• možnosti údržby</li><li>• dostupnost zdrojů</li><li>• kompatibilita s dostupnými materiály</li><li>• životnost</li></ul>	<b>Bezpečnost:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• zbytková reaktivita</li><li>• toxicita</li><li>• optické vlastnosti</li><li>• možnost kontroly při odstávkách</li></ul>
<b>Chemické vlastnosti:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• chemická stálost</li><li>• reaktivita (s vodou, se vzduchem, s konstrukčními materiály)</li><li>• korozní agresivita</li><li>• rozpustnost aktinoidů</li></ul>	

### 3.1 Roztavené soli

#### 3.1.1 Použití roztavených solí

V současné době se pro koncepty nových reaktorů počítá s využitím sodíku, hélia, olova, nadkritické vody a rozpuštěných solí. V aplikacích s rozpuštěným palivem v pracovním médiu se počítá pouze s fluoridovými solemi. Pro koncepty s pevným palivem je možné také použití dusičnanů či chloridů. Poté rozlišujeme použití solí jako paliva nebo jako chladiva. Samozřejmě, že v případě paliva se bude jednat o roztok fluoridové soli a fluoridu thoria, uranu, či jiných vhodných transuranů. Při využívání fluoridů mohou být složkami těchto solných směsí fluorid lithný (LiF), fluorid berylnatý (BeF<sub>2</sub>), fluorid sodný (NaF), fluorid draselný (KF) nebo fluorid rubidný (RbF) [20]. Roztavené soli je možné použít nejen u MSR projektů, u dalších konceptů mohou fungovat jako pracovní média v meziokruhu či v sekundárním okruhu, jak uvádí tabulka 5 [4]:

Tabulka 5: Použití solí v různých konceptech:

Typ reaktoru	Spektrum neutronů	palivo	Palivový cyklus	Koncept	Typ soli
MSR - množivý	Tepelné	tekuté	<sup>233</sup> U/Th	Primární chladivo	LiF-BeF <sub>2</sub> -(HN)F <sub>4</sub>
				Sekundární chladivo	LiF-BeF <sub>2</sub> -(HN)F <sub>4</sub>
MSR - množivý	Rychlé	tekuté	<sup>233</sup> U/Th	Primární chladivo	LiF-(HN)F <sub>4</sub>
				Sekundární chladivo	---
MSR - transmutor	Rychlé	tekuté	Pu-MA	Primární chladivo	NaF-LiF-BeF <sub>2</sub> -(HN)F <sub>3</sub>
				Sekundární chladivo	NaBF <sub>4</sub> -NaF
MSR - transmutor	Rychlé	tekuté	MA	Primární chladivo	LiF-NaF-KF-(HN)F <sub>3</sub>
				Sekundární chladivo	NaBF <sub>4</sub> -NaF
AHTR	Tepelné	pevné	U/Pu	Primární chladivo	BeF <sub>2</sub> soli, NaF soli
VHTR	Tepelné	pevné		Mezichladivo	LiCl-KCl-MgCl <sub>2</sub> , KFKBF <sub>4</sub> , FLiNaK
SFR	Rychlé	pevné	U/Pu	Primární chladivo	NaF-KF-ZrF <sub>4</sub>
				Sekundární chladivo	Dusičnany, chloridy?, hydroxidy?

Tabulka 5 nám ukazuje, že využití solí je univerzální. Mohou pracovat ve třech funkcích, a to jako chladivo v primárním okruhu, chladivo v primárním okruhu s roztaveným palivem nebo jako chladivo v dalších okruzích.

### 3.1.1 Výhody roztavených solí

Můžeme pozorovat, že lze použít velké množství směsí solí. Jejich konkrétní složení je dáno právě potřebami toho či onoho reaktoru. Jednosložkové soli se nepoužívají kvůli jejich vyšším teplotám tavení oproti dvou a vícesložkovým solím. Výhody roztavených solí oproti ostatním zmiňovaným chladivům lze obecně shrnout do čtyř bodů:

- **Vysoká objemová měrná tepelná kapacita** – tato veličina je obecným ukazatelem vhodnosti chladiva z hlediska jeho tepelných vlastností. Vyjadřuje množství tepla, jež je jednotkový objem chladiva (látky) schopen pojmout při zvýšení teploty o jeden stupeň Celsia (resp. Kelvin). Při vysokých hodnotách tohoto kritéria je možné přenášet vysoké tepelné výkony při nižších hmotnostních průtocích a teplotních spádech v relaci například s vodou. Konkrétní hodnoty sledovaných chladiv jsou uvedeny v tabulce 6 [2].
- **Vysoká teplota varu** – u reaktorů IV. generace se počítá s řádově vyššími teplotami v aktivní zóně reaktoru, jež jsou nutné pro zlepšení využití paliv a účinnosti. Zároveň se počítá se zapojením vodíkového hospodářství, pro jehož průmyslovou produkci jsou vysoké teploty nutné. Var chladiva je pochopitelně nežádoucí jak kvůli efektivnímu přenosu tepla, tak kvůli celkové konstrukci reaktorů a infrastruktury. Fluoridové sole mají teplotu tavení vysoko nad přibližnou požadovanou hranicí 1000°C.
- **Nízká tenze sytých par za vysokých teplot** – použití okolo teploty tisíce stupňů je prakticky možné za atmosférického tlaku chladiva, což je velmi pozitivním faktorem jak při konstrukci aktivní zóny a infrastruktury, tak vzhledem k bezpečnosti, jež je s konstrukcí úzce spjata [2].
- **Nízká teplota tavení** – tato hodnota je důležitá kvůli stálosti vlastností chladiva v oběhu. Je přibližně stanovena rozmezí 300 – 500°C u dvousložkových solí. U jednosložkových je přibližně o 500°C vyšší. Přidáním třetí složky je možné teplotu tavení dále snížit, avšak jen přibližně o desítky stupňů. [20]

Tyto vlastnosti platí obecně pro roztavené soli, avšak je možné je „regulovat“ různým složením směsi požadovaného chladiva. V práci [2] je uveden příklad teploty tavení směsi LiF-BeF<sub>2</sub>, která je eutektickým složením 33% - 67% jen 460°C. Eutektické binární směsi však mají teploty tavení 835°C

a 555°C, což je podstatně vyšší hodnota. Teplotu tavení výsledné směsi LiF-BeF<sub>2</sub> můžeme ovlivnit vhodnou volbou koncentrace a experimentálně zjistit. Podobné je to s ostatními sledovanými hodnotami. Tímto postupem je možné dosáhnout pro naše účely nejvýhodnějších vlastností, avšak s ohledem na chemicko-fyzikální chování materiálů (možnosti rozpustnosti, atd..) a především s ohledem na prvotní funkčnost chladiva v aktivní zóně. Možnost kombinace a solí různých materiálů je velkou výhodou proti ostatním chladivům jako je sodík, či nadkritická voda. Porovnání vlastností některých sledovaných materiálů je v tabulce 6 [2].

Tabulka 6: Porovnání vlastností některých typů chladiv za podobných podmínek

Materiál	Podmínky určení	Teplota tavení [°C]	Teplota varu [°C]	Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]	Objemová tepelná kapacita $\rho \cdot C_p$ [kJ.m <sup>3</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Tepelná vodivost [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Kinematická viskozita v.10 <sup>6</sup> [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
<sup>7</sup> Li <sub>2</sub> BeF <sub>4</sub> (Flibe)	700°C	459	1430	1940	4540	1,00	2,90
0,58NaF-0,42ZrF <sub>4</sub>	700°C	500	1290	3140	3670	1,00	0,53
Sodík	700°C	98	883	790	1000	62,00	0,25
Olovo	700°C	328	1750	10540	1700	16,00	0,13
Hélium	700°C 7,5 MPa	---	---	4	20	0,29	11,00
Voda	290°C 7,5 MPa	---	---	732	4040	0,56	0,13

## 3.2 Roztavené fluoridové soli

### 3.2.1 Přehled

V této části práce se věnujeme konkrétním vlastnostem fluoridových solí. V aplikacích MSBR (*Molten Salt Breeder Reactor*) je zapotřebí užívat v primárním okruhu chladiva, které bude obsahovat v tekuté soli štěpný a množivý materiál. V tomto případě tedy sůl slouží jako chladivo i palivo. Pro tuto směs chladiva je nutnou podmínkou kvalitní rozpustnost U a Th. Naproti tomu například v konceptu AHTR (*Advanced High Temperature Reactor*) používá pevné palivo a je pro něj nutná tekutá sůl bez štěpitelných materiálů. Vlastnosti různých solí vhodných pro různé aplikace se mohou lišit.

Pro chladivo je nutné používat v chladivu prvky, které musí mít malé účinné průřezy pro záchyt neutronů (konkrétně menší než  $1 \cdot 10^{-28}$  m<sup>2</sup> [22]) z důvodu zamezení přílišné absorpce neutronů. Neutronické vlastnosti různých směsí jsou uvedeny v práci [22], stejně jako hodnocení jejich jaderných složek z hlediska moderačních poměrů a krátkodobých a dlouhodobých aktivací.

Pro použití v primárním okruhu MSBR reaktoru je velmi vhodné použití fluoridových solí lehkých prvků (Li, Be,..) pro palivo-chladicí směs právě pro jejich schopnost rozpouštět U a Th. Soli lehkých prvků jsou obecně vhodné pro použití kvůli jejich termofyzikálním a jaderným vlastnostem. Avšak právě kvůli těmto vlastnostem je zapotřebí dbát na obohacení těchto směsí vhodnými izotopy (například LiF by měl být obohacen izotopem  ${}^7\text{Li}$  na nejméně 99,9%). Bez tohoto obohacení by stávající  ${}^6\text{Li}$  ve směsi disponoval 1000x větším účinným průřezem pro záchyt neutronů, což by způsobilo problém v neutronové bilanci aktivní zóny[2]. Mnohé další informace o jaderných vlastnostech jednotlivých složek solí je možné nalézt v pracích [22] a [21].

Ke stanovení termofyzikálních vlastností solí se využívají dva přístupy – experimentální měření nebo interpolační metoda. Přesná měření jsou použitelná pro určení teploty tavení, vazkosti, hustoty nebo tlaku nasycených par. Z těchto veličin však může být uspokojivě extrapolačně určena pouze hustota. Pro naše potřeby tolik důležité hodnoty jako je tepelná kapacita nebo tepelná vodivost jsou bohužel dosud určovány jen velmi sporadicky a navíc poměrně neurčitě. Empirické odhady se ukázaly být jen málo užitečnými. Odhady pro tepelnou vodivost fluoridových solí byly prováděny například Kholokovovou korelací nebo Rao-Turnbullovou predikcí [21], avšak při porovnání s naměřenými hodnotami pro směs FliBe nedosahovaly příliš uspokojivých výsledků. Pro naše potřeby je však možné se s těmito hodnotami spokojit, předpokládáme-li alespoň řádovou přesnost hodnot.

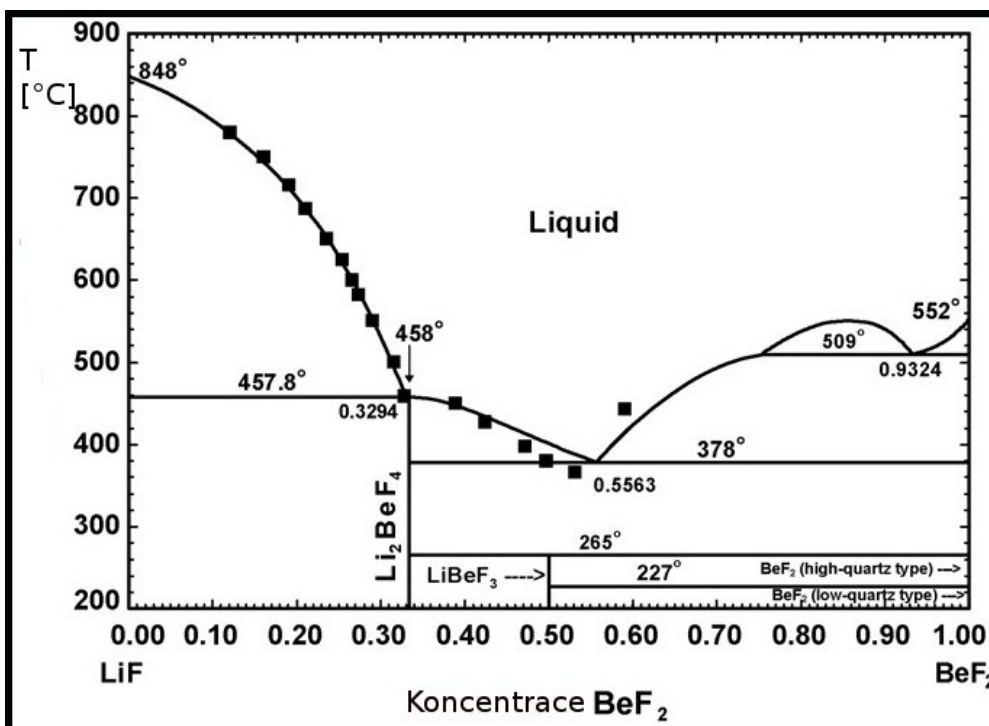
Za důležitější můžeme považovat zkušenosti z MSR projektů stran kompatibility fluoridových solí s grafitovými konstrukčními materiály, kdy byly testy prováděny při teplotě 650°C bez znaku koroze či eroze. [4]

### 3.2.2 Termofyzikální vlastnosti směsi FliBe (LiF-BeF<sub>2</sub> (67-33% mol))

Toto potenciální chladivo je nejvíce prozkoumanou směsí, byla na ní provedena řada měření, která dosáhla uspokojivých výsledků. Je schopna velmi dobře rozpouštět ThF<sub>4</sub>, PuF<sub>3</sub> i UF<sub>4</sub>. Binární diagram LiF – BeF<sub>2</sub> je zobrazen na obrázku 10. Při koncentraci BeF<sub>2</sub> stanovené na 33% můžeme odečíst **teplotu tavení** v eutektickém bodě na hodnotě 458°C [23]. Druhý eutektický bod je patrný při koncentraci přibližně 55% BeF<sub>2</sub> a jím procházející izoterma má hodnotu 378°C. Tato teplota je sice o 80°C nižší, avšak takováto změna koncentrace by měla neblahý vliv na dění v aktivní zóně kvůli markantnímu úbytku  ${}^7\text{Li}$  ve směsi. Při plánované teplotě 720°C je teplota tavení 458°C dostatečná i s bohatou rezervou, čímž je zajištěna stálost termodynamických vlastností chladiva.

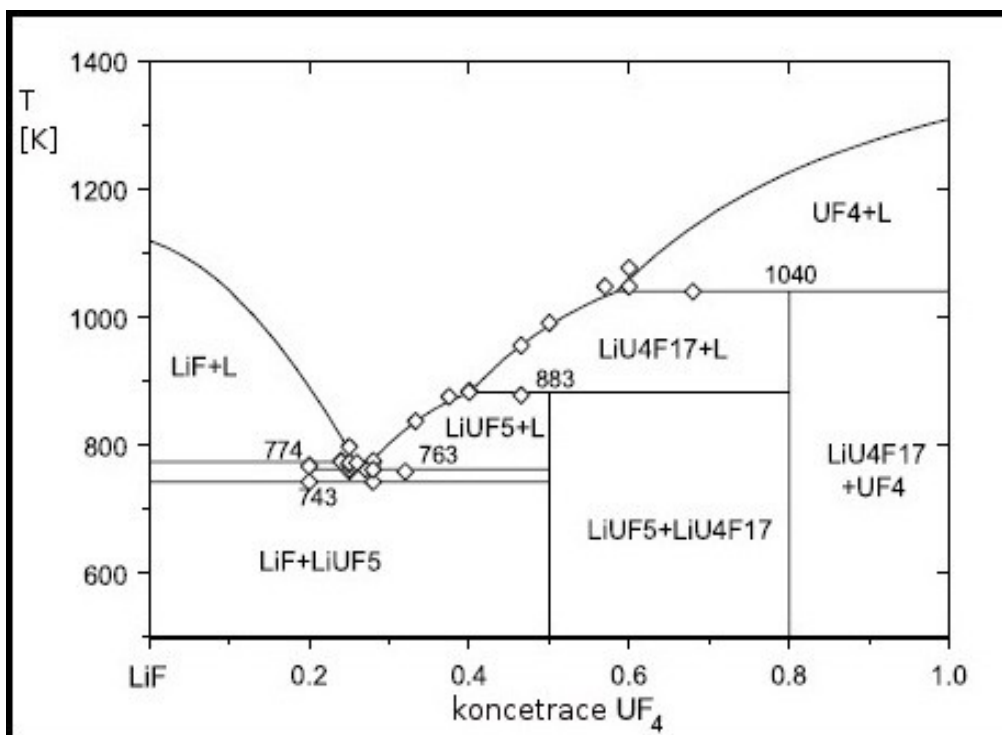


Obrázek 10: Binární diagram LiF-BeF<sub>2</sub>



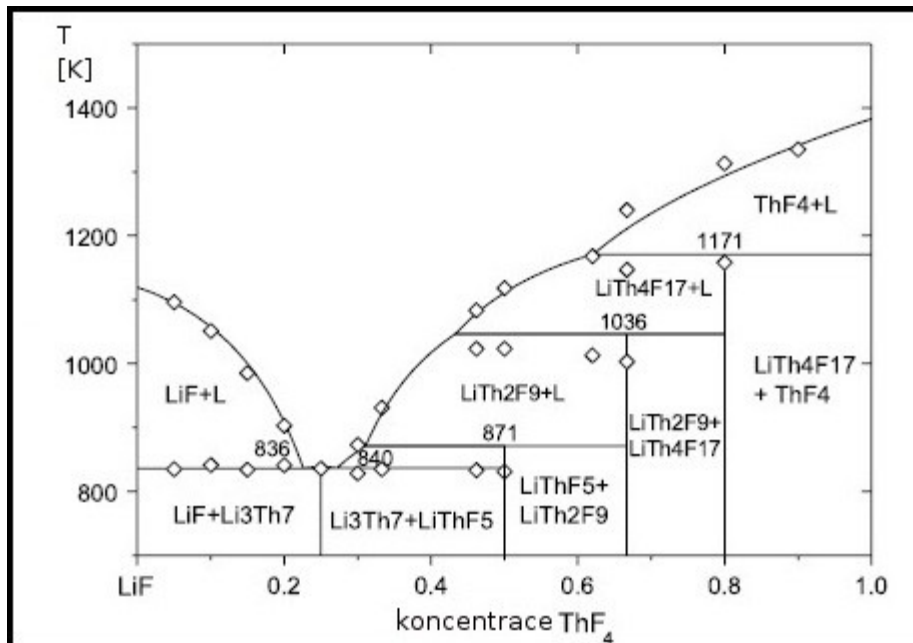
Jak již bylo zmíněno, tato sůl rozpouští další soli transuranů. Rozpustnost se přidáním další složky mění, avšak již ne tak dramaticky jako při přidání druhé složky do soli. Příklad rozpustnosti, a tudíž změny teploty tavení, při přidání UF<sub>4</sub> můžeme vidět na obrázku 11, kde zjistíme, že se teplota tavení posunula na 501°C (po přepočtení, zdroj [24] uvádí škálu teploty v Kelvinech).

Obrázek 11: Binární diagram směsi LiF – UF<sub>4</sub> [24]



Podobný posun pozorujeme i u  $\text{ThF}_4$ , kde je teplota tavení při koncentraci 25%  $\text{ThF}_4$   $563^\circ\text{C}$  (opět po přepočtení z Kelvinů). Tyto dvě sloučeniny jsou použitelné spolu v  $\text{PuF}_3$  v aplikacích, kde směs zastává funkci chladiva i paliva. Binární diagram směsi  $\text{LiF}$  a  $\text{ThF}_4$  je na obrázku 12.

Obrázek 12: Binární diagram směsi  $\text{LiF}$  –  $\text{ThF}_4$  [24]



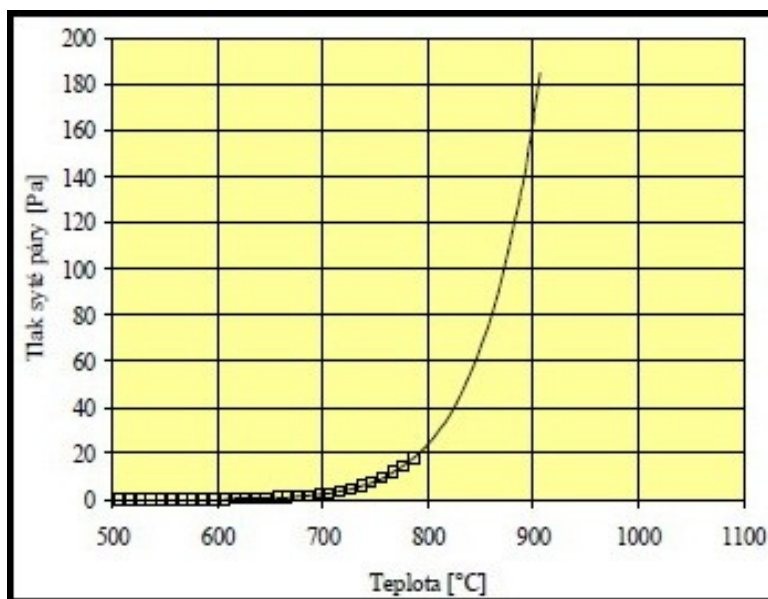
**Tlak syté páry** uvádí práce [2] z korelačního vztahu 2 a jeho průběh je zobrazen na obrázku 13. Směs  $\text{LiF}-\text{BeF}_2$  má v relaci s dalšími tekutými solemi tuto hodnotu velice příznivou. Ta je důležitá kvůli konstrukci jak aktivní zóny, tak infrastruktury. Za vysokých teplot je možné používat chladivo za téměř atmosférického tlaku.

Vztah 2: Korelační vztah pro určení tlaku syté páry  $\text{LiF}-\text{BeF}_2$  [2]

$$p_{\text{syt}} = 133,32 \cdot 10^{9,04 - \frac{10500}{T(K)}}$$

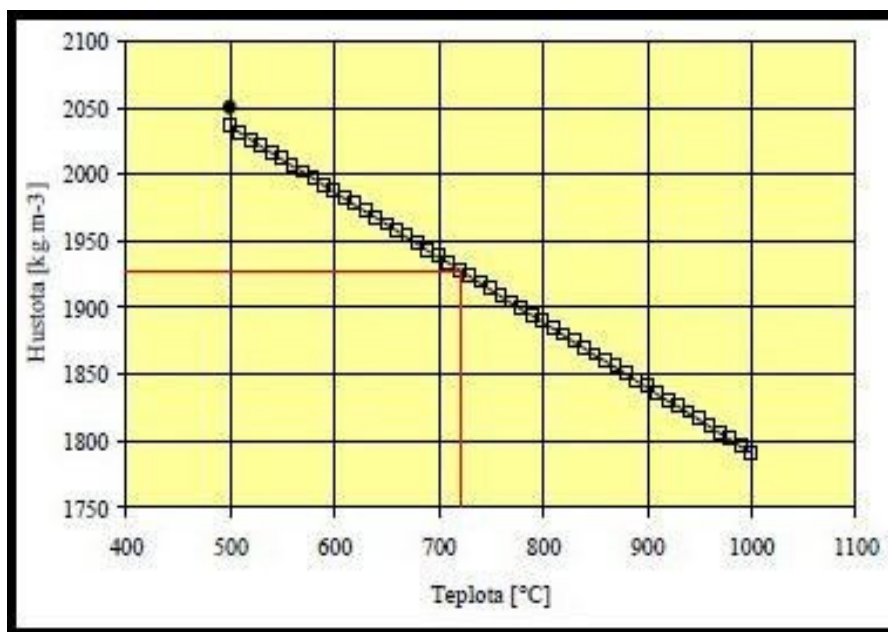
Pro teplotu  $720^\circ$  po dosazení vychází hodnota  $p_{\text{syt}} = 3,898 \text{ Pa}$ . Z grafu na obrázku 13 vyplývá, že za teploty  $720^\circ\text{C}$  je změna tlaku chladiva v podstatě zanedbatelná. Zvyšuje se v řádu několika pascalů. Avšak při teplotách vyšších, okolo  $1000^\circ\text{C}$ , by již bylo vhodné tuto změnu v návrhu zohlednit.

Obrázek 13: Průběh tlaku syté páry na teplotě LiF-BeF<sub>2</sub> [2]



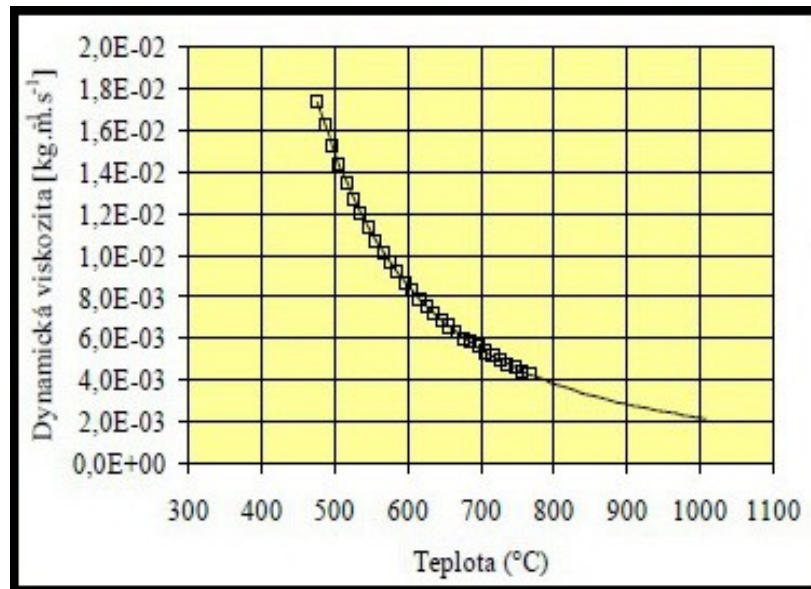
Pro určení **měrné hmotnosti** tekuté soli jsou v práci [2] opět uvedeny korelační vztahy. Podle grafu na obrázku 14 vykazuje hustota v závislosti na teplotě přímkový průběh. Pro hodnotu 720°C je určena hustota na hodnotu přibližně  $\rho=1930 \text{ kg.m}^{-3}$ .

Obrázek 14: Závislost hustoty směsi LiF-BeF<sub>2</sub> na teplotě [2]



Co se týká **dynamické viskozity**, je určena obdobně, z grafu závislosti viskozity a teploty a podle obrázku 15 a podle korelačního vztahu 3.

Obrázek 15: Závislost dynamické viskozity na teplotě



Vztah 3: Korelační vztah pro určení dynamické viskozity LiF-BeF<sub>2</sub>

$$\mu = \frac{0,0116}{100} \cdot e^{\frac{3755}{T(K)}}$$

Dosazením do korelačního vztahu získáváme hodnotu **5,09\*10<sup>-3</sup> kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>**.

Teplotní závislost **měrné tepelné kapacity** se u FliBe podle většiny zdrojů zanedbává. Při 700°C je určena na **c<sub>p</sub>= 2314 – 2340 J · kg<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>**. [2].

**Tepelná vodivost** je pro tuto směs změřena a je rovna **λ=1,0 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>** při 700°C. [22] . Hodnoty povrchového napětí FliBe jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7: Hodnoty povrchového napětí FliBe

Teplota [°C]	Povrchové napětí $\sigma \cdot 10^{-2}$ [N.m <sup>-1</sup> ]
550	1,94
600	1,88
700	1,76

Pro teplotu 720°C bude užitá hodnota povrchového napětí 1,74 N.m<sup>-1</sup>. Všechny výpočtové teploty pro různé výpočtové teploty jsou uvedeny v tabulce 8. Hodnoty pro další teploty byly získány obdobnými dosazeními jako pro teplotu 720°C.

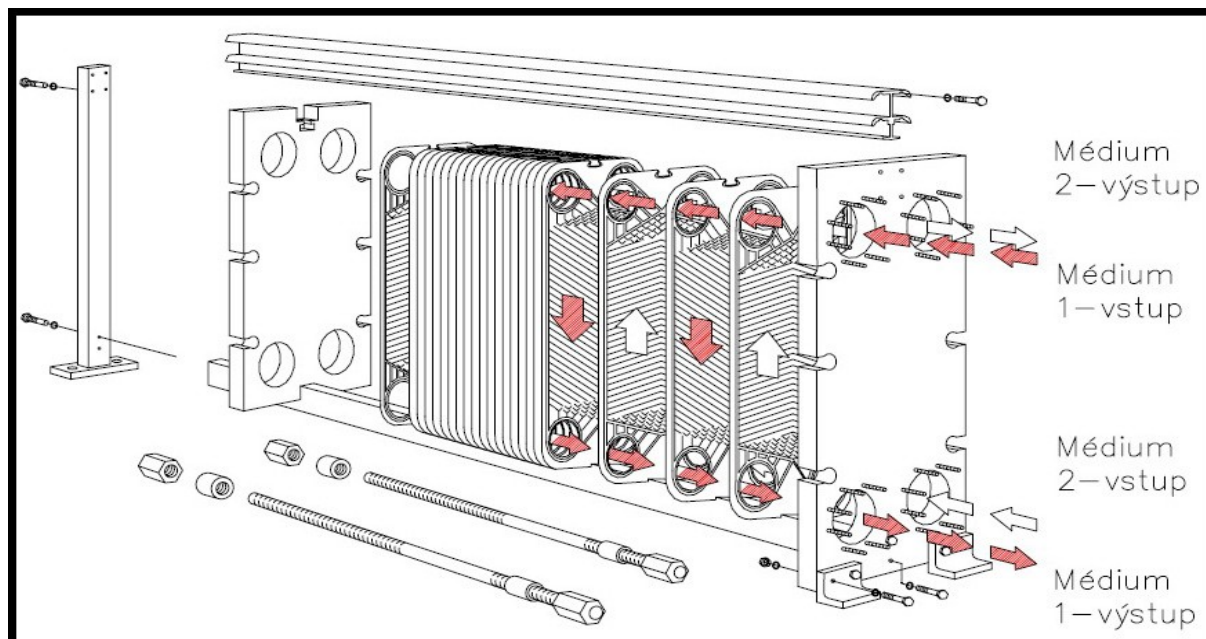
Tabulka 8: Výpočtové hodnoty směsi LiF-BeF<sub>2</sub> pro teplotu 720°C

Teplota [°C]	720°C	690°C	575°C
Teplota tavení $T_{TAV}$	458°C	458°C	458°C
Tlak syté páry $p_{syf}$	3,9 Pa	1,8 Pa	0,0606 Pa
Hustota $\rho$	1930 kg.m <sup>-3</sup>	1809 kg.m <sup>-3</sup>	1865 kg.m <sup>-3</sup>
Měrná tep. kapacita $c_p$	2330 J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	2330 J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	2340 J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Kinematická viskozita $\nu$	2,637*10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>	3,16*10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>	5,206*10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
Dynamická viskozita $\eta$	5,09*10 <sup>-3</sup> kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>	5,726*10 <sup>-3</sup> kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>	9,71*10 <sup>-3</sup> kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>
Součinitel tepelné vodivosti $\lambda_{MS}$	1,1	1,08	1,05

## 4 Návrh tepelného výměníku

V této části práce je navržen rekuperační deskový výměník z grafitového kompozitu. Výměník je typu sůl – sůl. Vstupní teplota do výměníku je  $720^{\circ}\text{C}$  a výměník je navrhovaný na termický výkon 50MW. Deskové výměníky jsou koncipovány skládáním teplosměnných desek za sebe do kompaktního obalu. Představu dává obrázek 17.

Obrázek 16: Deskový výměník Tetra-Laval [25]



Jádro těchto výměníků obvykle bývá vyrobeno z perforovaných plechů, což však našim potřebám, vzhledem k zadání práce, nevyhovuje. Rovněž jsou v nabídce deskové výměníky ALFA-LAVAL z grafitového kompozitu Diabon F, které jsou však limitovány teplotou do  $180^{\circ}\text{C}$  [25]. Častým problémem v konstrukci těchto výměníků je těsnění mezi jednotlivými deskami, obzvláště jedná-li se o agresivní média uvnitř výměníku. Tento problém v našem případě odpadá vzhledem k použité technologii konstruování z LSI C/C kompozitů, která je uvedena v kapitole 2.2.2. Další nespornou výhodou této technologie spojování jednotlivých kusů (resp. kompozitních polotovarů) je stálost spojů a prakticky nulová změna jejich mechanických, fyzikálních i chemických vlastností oproti spojovanému materiálu. Ve výpočtu tak můžeme pominout kontaktní tepelný odpor, se kterým je nutné počítat při navrhování výměníků konstruovaných klasickými způsoby – svařováním, pájením, atd.

Výměník je koncipován jako protiproudý s rovnými podélnými kanály, což je důležité pro zachování čistého protiproudu a v podstatě znamená také zjednodušení výpočtu oproti výměníkům, kde se proudy částečně či úplně kříží. Návrh výměníku je proveden podle teoretického zpracování

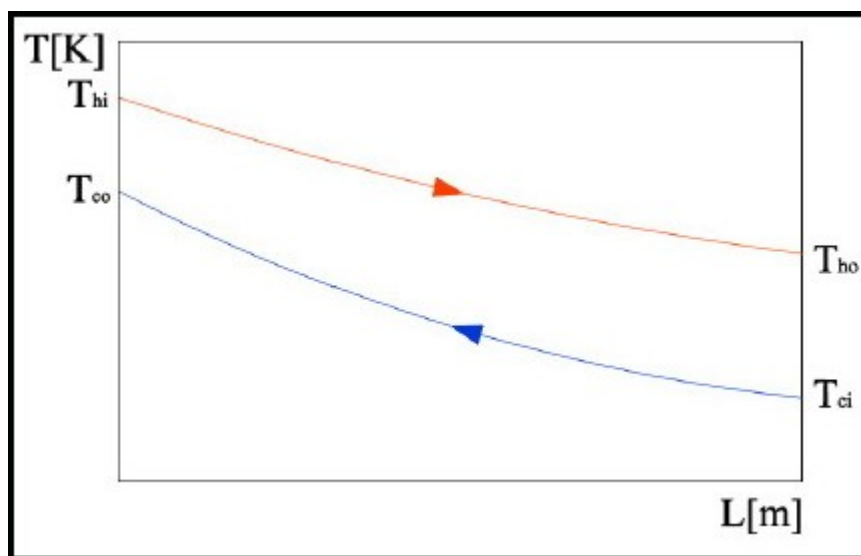
této problematiky v práci [2].

## 4.1 Návrhový výpočet výměníku

### 4.1.1 Úvod, zadání

Navrhovaný výměník je rekuperační a protiproudý. Protiproudé výměníky se používají často kvůli schopnosti zvýšit teplotu ohřivaného média na teplotu vyšší než je výstupní teplota ohřívajícího proudu, což u výměníků souproudých není možné. Závislost teplot proudů na výhřevné ploše u protiproudého výměníku ukazuje obrázek 17.

Obrázek 17.: Závislost teploty proudů na teplotě v protiproudém výměníku



Teplý proud (označený červeně) budeme označovat indexem  $H$ , studený (modrý) indexem  $C$ . Zadanou hodnotou je vstupní teplota  $T_{Hi} = 720^{\circ}\text{C}$ . Médium v obou proudech je směs roztavených solí  $\text{FliBe}$  ( $\text{LiF}-\text{BeF}_2$ ). Ohříváme látku z teploty  $500^{\circ}\text{C}$  na požadovanou teplotu  $640^{\circ}\text{C}$ . Průtoky jsou stanoveny na  $400 \text{ kg/s}$  u teplého proudu a  $160 \text{ kg/s}$  u proudu studeného. Předpokládaný tepelný výkon výměníku je  $50\text{MW}$ .

### 4.1.1 Numerický výpočet

Výpočet byl proveden v prostředí Matlab v odladěném programu, který je pro tyto účely navržen v teoretické části práce [2]. Pro výpočet bylo nutné zadat vstupní teploty obou proudů, hodnoty tepelných vlastností médií a dalších charakteristik, návrhové hodnoty rozměru kanálů a rozměrů výměníku. V dalších statích jsou tyto hodnoty určeny. Kód pro výpočet je vypsán v příloze 1.

Rovnice řešené numerickým výpočtem [2]:

Tepelné bilance pro oba proudy:

- pro horký proud:  $q = W_H \cdot dT_H = k \cdot dA(T_H - T_C)$
- pro studený proud:  $q = W_C \cdot dT_C = k \cdot dA(T_C - T_H)$

Po zavedení bezrozměrných souřadnic  $x_h$  a  $x_c$  je poté možné psát tepelnou bilanci pomocí dvou obyčejných lineárních diferenciálních rovnic:

- $\frac{dT_H}{dx_H} = T_H - T_C$
- $\frac{dT_C}{dx_C} = T_C - T_H$

Po přepsání do diferenciálního tvaru a zavedení velikosti teplosměnné plochy jednoho elementu jsou z těchto rovnic získány numerickým výpočtem závislosti:

- $\alpha_H \cdot (T_H - T_C) = \alpha_C \cdot (T_S - T_C)$ , kde  $T_S$  je vektor teploty stěny.

Z poslední rovnice vyplývá závislost:  $T_S = \frac{\alpha_H \cdot T_H + \alpha_C \cdot T_C}{\alpha_H + \alpha_C}$

Výstupem tohoto výpočtu je graf závislosti součinitele prostupu tepla  $k$  po délce výměníku, graf průběhu teplot proudů a střední teploty stěny ve výměníku.

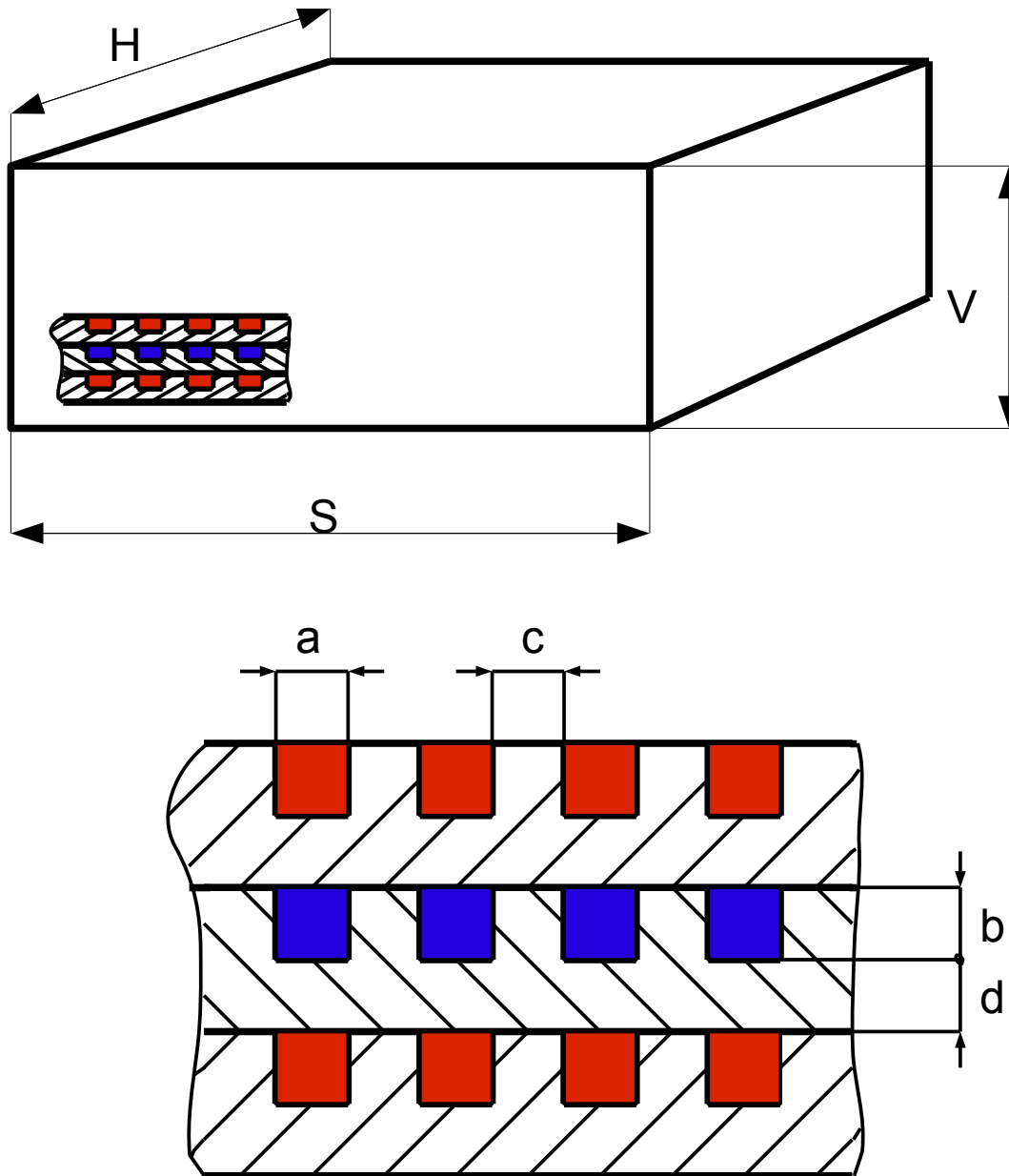
#### 4.1.2 Plochy výměníku, počet a průřezy kanálů

Na schématickém obrázku 18 vidíme rozměry jádra výměníku a rozměry kanálů ve výměníku, které jsou vypočteny, případně navrženy. Navrženými hodnotami jsou základní rozměry výměníku (výška  $V$ , délka  $H$  a šířka  $S$ ), šířka  $a$  a výška kanálu  $b$ , rozměr mezi kanály  $c$  a tloušťka desky  $d$ . Veškeré kanály budou z technologických důvodů v rohách na kontaktu s deskou opatřeny rádiusem  $R = 0,3$  mm.

**Navržené hodnoty:**  $H = 1000$  mm,  $V = 600$  mm,  $S = 800$  mm,  $a = 0,0012$  mm,  $b = 0,0012$ ,  $c = 0,0012$  mm,  $d = 0,0012$  mm. Další hodnoty jsou vypočteny.



Obrázek 18: Schéma jádra výměníku



**Plocha průřezu jednoho kanálu  $A^1$ :**

Vzorec (4.1)

$$A^1 = a \cdot b - \frac{4 \cdot R^2 - \pi \cdot R^2}{2}$$

$$A^1 = 0,0012 \cdot 0,0012 - \frac{4 \cdot 0,0003^2 - \pi \cdot 0,0003^2}{2}$$

$$A^1 = 1,40137 \cdot 10^{-6} m^2$$

### Počet kanálů na šířku výměníku S:

Vzorec (4.2)

$$m = \frac{S}{a + c}$$
$$m = \frac{0,9}{0,0012 + 0,0012}$$
$$m = 375$$

### Počet kanálů na šířku výměníku V:

Vzorec (4.3)

$$n = \frac{V}{b + d}$$
$$n = \frac{0,6}{0,0012 + 0,0012}$$
$$n = 250$$

### Celkový počet kanálů $k_c$ v celém výměníku:

Vzorec (4.4)

$$k_c = m \cdot n$$
$$k_c = 375 \cdot 250$$
$$k_c = 93750$$

**Průtočná plocha na proud:** Jednomu proudu náleží  $\frac{1}{2}$  celkového počtu kanálů.

Vzorec (4.5)

$$A^{PR} = A^1 \cdot \frac{k_c}{2}$$
$$A^{PR} = 1,40137 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{93750}{2}$$
$$A^{PR} = 0,065689m^2$$

#### 4.1.3 Objemové průtoky v kanálech obou proudů a rychlosti proudů:

Pro teplý proud (HOT – dolní index  $_H$ ) platí  $\dot{m} = 400kg/s$  a hustota  $\rho = 1809 kg/m^3$  se střední teplotou proudu  $T_H^S = 690^\circ C$ .

Pro studený proud (COLD – dolní index  $_C$ ) platí  $\dot{m} = 160kg/s$  a hustota  $\rho = 1865 kg/m^3$  se střední teplotou proudu  $T_C^S = 575^\circ C$ .

### Objemový průtok obou proudů z daných hmotnostních průtoků:

Vzorec (4.6)

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}$$
$$\dot{V}_H = \frac{400}{1809} = 0,22 \text{ m}^3 / \text{s}$$
$$\dot{V}_C = \frac{160}{1865} = 0,0858 \text{ m}^3 / \text{s}$$

### Střední rychlost obou proudů:

Vzorec (4.7)

$$w = \frac{\dot{V}}{A^{PR}}$$
$$w_H = \frac{0,22}{0,65689} = 3,349 \text{ m} / \text{s}$$
$$w_C = \frac{0,0858}{0,65689} = 1,3 \text{ m} / \text{s}$$

#### 4.1.4 Určení podobnostních kritérií nutných pro výpočet a určení součinitele přestupu tepla

V této části je nutné určit hodnoty podobnostních kritérií, která jsou nutná pro výpočet součinitele přestupu tepla  $\alpha$ . V našem případě, kdy se jedná o vnitřní proudění nucenou konvekcí je reprezentován vzorcem 3.8, který udává výpočet Nusseltova čísla.

Vzorec 4.8

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda} = f(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Gz})$$

Pro naši potřebu bude tedy nutné určit Reynoldsovo číslo, Prandtlovo číslo a Graetzovo číslo. Zároveň je nutné pracovat s pozmeněnými rozměrovými hodnotami. Součinitel přestupu tepla  $\alpha$  je neznámou, tepelnou vodivost  $\lambda$  pro média známe.

#### Ekvivalentní hydraulický průměr:

Ve vztazích pro určení podobnostních kritérií, které budou následovat, figurují rozměry kanálů, ve kterých děj probíhá. Pro nekruhové kanály jsou zavedeny tzv. ekvivalentní hydraulické průměry, které lze s používat ve výpočtech. Ekvivalentní hydraulický průměr  $D_H$  se určuje pomocí vzorce 4.9. [1]

Vzorec 4.9

$$D_H = \frac{4 \cdot A_k}{O_k}$$

kde je:  $D_H$  ..... ekvivalentní hydraulický průměr [m]  
 $A_k$  ..... plocha smáčeného průřezu kanálu [m<sup>2</sup>]  
 $O_k$  ..... obvod smáčeného průřezu kanálu [m]

Pro náš případ dosazujeme do vzorce 4.10 průřez kanálu a obvod kanálu.

Vzorec 4.10

$$D_H = \frac{4 \cdot A^1}{O}$$
$$D_H = \frac{4 \cdot 0,0012 \cdot 0,0012}{4 \cdot 0,0012}$$
$$D_H = 0,0012 \text{ m}$$

### Reynoldsovo číslo

Toto podobnostní kritérium udává poměr setrvačných a třecích sil v proudící tekutině. Jeho hodnotu dostaneme dosazením do vzorce 4.11.

Vzorec 4.11

$$Re = \frac{w \cdot D_H}{\nu}$$

kde je:  $D_H$  ..... ekvivalentní hydraulický průměr [m]  
 $w$  ..... rychlost proudění [m.s<sup>-1</sup>]  
 $\nu$  ..... kinematická viskozita média [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>]

Z hodnoty Reynoldsova čísla určujeme režim proudění média. Rozlišujeme tři základní režimy:

- Laminární proudění .....  $Re < Re_{krit}$
- Přechodné proudění .....  $Re_{krit} < Re < 10^5$
- Turbulentní proudění .....  $Re > 10^5$


V oblasti laminárního proudění se tekutina pohybuje téměř výhradně ve směru podélné osy kanálu ve formě válcových vrstev, jež se po sobě posouvají. Náhodné fluktuace rychlosti jsou tlumeny vazkými silami. [2]

Přechodná, neboli intermitentní oblast bývá u kruhových průřezů ohraničena dolní hodnotou Reynoldsova čísla 2300. Zde není charakter proudění zcela definován. Laminární i turbulentní

proudění se zde nahodile střídají a jejich četnost se mění podle hodnoty  $Re$  – s vyšším číslem roste počet turbulentních vírů. Turbulence je možné i vynucovat tvarem kanálu nebo vibracemi. Kritické číslo pro změnu režimu je různé podle tvaru kanálu a také vstupu, jak ukazuje tabulka 9. V ní jsou uvedeny hodnoty pro pravoúhlý kanál, který nás z hlediska výpočtu zajímá.

V čisté turbulentní oblasti, která má dolní hranici na  $Re = 10^5$  převažují nad vazkými silami síly setrvačné, které způsobují s fluktuacemi rychlosti iniciaci turbulentních vírů. Díky těmto vírům v tekutině nastává značný přenos tepla, hmoty a hybnosti v kolmém směru na směr proudu.

Tabulka 9: Hodnoty  $Re_{krit}$  pro pravoúhlý kanál [2]

Pravoúhlý kanál	Poměr stran $b/a$	Vstup	$Re_{krit}$
	1:1	hladký	4300
	1:1	ostrý	2200
	3:1	hladký	6000
	5:1	hladký	7000
	5:1	ostrý	2500
	10:1	hladký	4400
	10:1	ostrý	2500

Pro výpočet  $Re$  je nutné stanovit kinematickou viskozitu média, tu určujeme ze středních teplot podle tabulky 8 a následně dosazujeme do vzorce 4.11.

Pro teplý proud platí  $v_H = 3,16 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$ , pro studený proud  $v_C = 5,206 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$ .

Vzorec 4.12

$$Re = \frac{w \cdot D_H}{\nu}$$

$$Re_H = \frac{w_H \cdot D_H}{\nu_H} = \frac{3,349 \cdot 0,0012}{3,16 \cdot 10^{-6}} = 1271$$

$$Re_C = \frac{w_C \cdot D_H}{\nu_C} = \frac{1,3 \cdot 0,0012}{5,206 \cdot 10^{-6}} = 300$$

Podle výsledné hodnoty výpočtu a porovnáním s hodnotou v tabulce 9 pro pravoúhlý kanál s poměrem stran 1:1 zjišťujeme, že obě proudění budou laminární.

### Prandtlovo číslo

Prandtlovo kritérium udává podobnost mezi rychlostním a teplotním profilem proudění. Vzorec 4.13 udává jeho definici a je vyčíslen pro náš případ. Ze vzorce plyne, že Prandtlovo číslo závisí výlučně na fyzikálních vlastnostech kapaliny. Pro představu můžeme uvést řádové hodnoty pro některé látky: plyny mají  $Pr$  mezi 0,1 a 1, voda mezi 1 a 10, vyšší číslo mají lehké organické

kapaliny a od  $Pr$  od 50 a dále mají například oleje. Prandtlovo číslo pro náš případ řeší dosazení následujících hodnot do vzorce 4.13.

Pro teplý proud platí měrná tepelná kapacita  $c_{pH} = 2330 \text{ J/kg.K}$  a tepelná vodivost  $\lambda_H = 1,08 \text{ W/m.K}$ .

Pro studený proud platí  $c_{pC} = 2340 \text{ J/kg.K}$  a  $\lambda_C = 1,05 \text{ W/m.K}$ . Tyto hodnoty jsou opět vztaženy ke středním teplotám proudů dle tabulky 8.

Vzorec 4.13

$$Pr = \frac{v \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda}$$
$$Pr = \frac{v_H \cdot \rho_H \cdot c_{pH}}{\lambda_H} = \frac{3,16 \cdot 10^{-6} \cdot 1809 \cdot 2330}{1,08} = 12,33$$
$$Pr = \frac{v_C \cdot \rho_C \cdot c_{pC}}{\lambda_C} = \frac{5,206 \cdot 10^{-6} \cdot 1865 \cdot 2340}{1,05} = 21,64$$

### Graetzovo číslo

Graetzovo číslo je nutné k určení čísla Nusseltova. Je součinem Reynoldsova a Prandtlova čísla násobeným simplexem  $D_H / H$ . Délka kanálů je u obou shodná,  $H = 1,0 \text{ m}$ . Ta je na počátku určena orientačně a následně zpřesňována. Určeno pro oba proudy ve vzorci 4.14.

Vzorec 4.14

$$Gz = Re \cdot Pr \cdot \frac{D_H}{H}$$
$$Gz_H = Re_H \cdot Pr_H \cdot \frac{D_H}{H} = 1271 \cdot 12,33 \cdot \frac{0,0012}{1} = 18,8$$
$$Gz_C = Re_C \cdot Pr_C \cdot \frac{D_H}{H} = 300 \cdot 21,64 \cdot \frac{0,0012}{1} = 7,79$$

### Nusseltovo číslo

Určování Nusseltova čísla je poměrně obtížnou záležitostí a přístupů k určení je mnoho. Nejdůležitějším prvkem při určování  $Nu$  je vyvinutost proudu, která se pro laminární proudění určuje pomocí hydrodynamických a teplotních stabilizačních délek. Mnoho informací o postupech při určování Nusseltova čísla najdeme v pracích [1] a [2]. V našem případě uvažujeme kvůli poměrně vysoké hodnotě  $Pr$  vyvinutý proud a konstatní tepelný tok na stěně. Můžeme použít vztah 4.15 [2], který lze za daných podmínek zjednodušit na vztah 4.16, který určuje  $Nu$  pro kruhový

průřez. Tuto hodnotu musíme následně korigovat na průřez čtvercový.

Vztah 4.15

$$\frac{Nu_{0-x}^q}{4,364 \left[ 1 + \left( \frac{Gz}{29,6} \right)^2 \right]^{1/6}} = \left\{ 1 + \left[ \frac{\frac{Gz}{19,04}}{\left[ 1 + \left( \frac{Pr}{0,0207} \right)^{2/3} \right]^{1/2} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{Gz}{29,6} \right)^2 \right]^{1/3}} \right]^{3/2} \right\}^{1/3}$$

U teplého proudu je proudění laminární. Nejdříve určíme Nusseltovo číslo pro kruhový průřez. O tvaru rovnice zde rozhoduje Graetzovo číslo, jehož převrácený poměr značený jako  $x_*$  určuje použitou rovnici.

Vztahy 4.16 a 4.17

$$Nu_{0-x}^q = 1,953 \cdot x_*^{-1/3} \quad \text{pro } x_* < 0,03$$

$$Nu_{0-x}^q = 4,364 + \frac{0,0722}{x_*} \quad \text{pro } x_* > 0,03$$

Určení  $x_*$  :

Vztah 4.18

$$x_* = \frac{1}{Gz_H} = \frac{1}{18,8} = 0,053$$

Hodnota  $x_*$  je vyšší než 0,03 , proto použijeme vztah 4.17 pro výpočet Nuseltova čísla.

$$Nu_{0-x}^q = 4,364 + \frac{0,0722}{x_*} = 4,364 + \frac{0,0722}{0,053} = 5,72$$

Následně je nutné opravit hodnotu pro čtvercový kanál, kde se užije konstatní hodnota pro Nusseltovo číslo na nekonečně délce u kruhového a nekruhového průřezu kanálu. Toto je provedeno ve vzorci 4.19 [2].

Úprava pro čtvercový kanál:

Vzorec 4.19

$$Nu_H = \frac{Nu_{nekon}^{nekrulh}}{Nu_{nekon}^{kruh}} \cdot Nu_{0-x}^{\circ}_H$$
$$Nu_H = \frac{3,66}{4,364} \cdot 5,72$$
$$Nu_H = 4,797$$

Protože u studeného proudu vychází rovněž proudění laminární, provedeme určení Nuseltova čísla obdobně.

Určení  $x_*$  :

$$x_* = \frac{1}{Gz_C} = \frac{1}{7,790} = 0,1284$$

Z hodnoty  $x_*$  opět vyplývá použití vzorce 4.17 pro určení Nusseltova čísla v kruhovém kanále.

$$Nu_{0-x}^{\circ}_C = 4,364 + \frac{0,0722}{x_*} = 4,364 + \frac{0,0722}{0,1284} = 4,9264$$

Úprava pro čtvercový kanál:

$$Nu_C = \frac{Nu_{nekon}^{nekrulh}}{Nu_{nekon}^{kruh}} \cdot Nu_{0-x}^{\circ}_C$$
$$Nu_C = \frac{3,66}{4,364} \cdot 4,9264$$
$$Nu_C = 4,13$$

### Součinitel přestupu tepla obou proudů

Součinitel přestupu tepla můžeme nyní určit ze vztahu pro Nusseltovo číslo (viz výše) a jeho vhodnou úpravou. Součinitel se určuje pro oba proudy pomocí dané tepelné vodivosti  $\lambda$ .

Vzorec 4.20

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_H}$$
$$\alpha_H = \frac{Nu_H \cdot \lambda_H}{D_H} = \frac{4,797 \cdot 1,08}{0,0012} = 4317 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$
$$\alpha_C = \frac{Nu_C \cdot \lambda_C}{D_H} = \frac{4,13 \cdot 1,05}{0,0012} = 3613,75 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$



#### 4.1.5 Účinnosti jednotlivých ploch a žebrování

Tyto hodnoty jsou důležité pro následné určení tepelných odporů kompozitu a určení součinitele prostupu tepla  $k$ . Právě tento součinitel má největší vliv na měrný tepelný tok, který prochází stěnou. Vztah pro určení měrného tepelného toku  $q$  uvádí vzorec 4.21.

Vzorec 4.21

$$q = k \cdot \Delta T$$

kde je:  $q$  ..... měrný tepelný tok [W.m<sup>-2</sup>]  
 $k$  ..... součinitel prostupu tepla [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>]  
 $\Delta T$  ..... rozdíl středních teplot obou proudů [K]

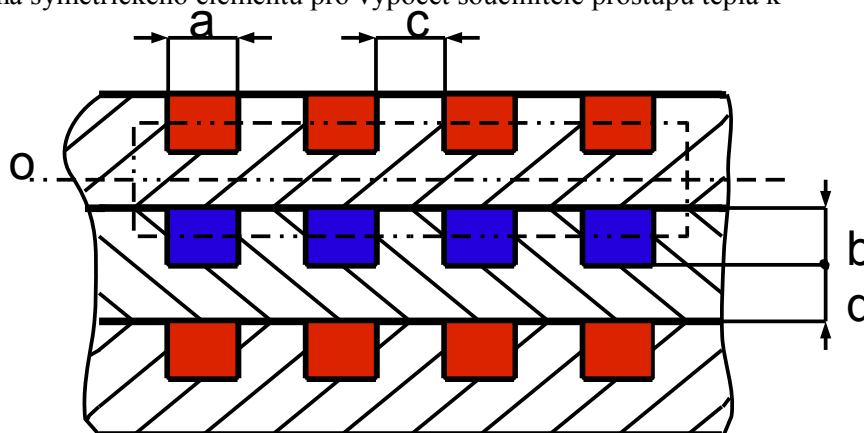
Pro náš případ, kdy lze jádro výměníku pomyslně rozdělit na symetrické (podle osy  $o$ ) oboustranně žebrované desky (obr. 19), vychází vztah pro součinitel prostupu tepla  $k$  následovně:

Vzorec 4.22

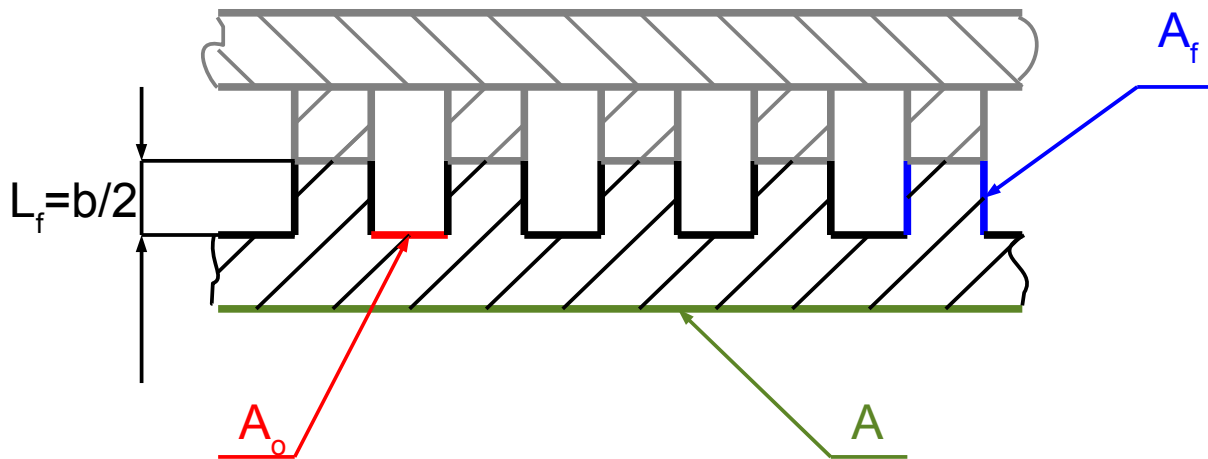
$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_H \cdot \eta_{oH}} + \frac{d}{\lambda_{comp}} \cdot \frac{A_t}{A} + \frac{1}{\alpha_C \cdot \eta_{oC}}$$

Vidíme, že ve vztahu figuruje přestup tepla konvekcí a kondukce tepla stěnou kompozitu. Zanedbán je kontaktní tepelný odpor vznikající v místě mechanického spojení dvou částí vlivem spoje, změny povrchu, kvality, atd. Ve stati 2.2.2 o výrobě a spojování materiálů z LSI C/C kompozitů je uvedeno, že spoje vykazují prakticky totožné hodnoty jako původní materiál. Zanedbán je také tepelný odpor úsad, které vznikají zachycováním částecek na materiálech, a to z důvodu nedostatku informací o míře eroze grafitového kompozitu v roztavených solích.

Obrázek 19: Schéma symetrického elementu pro výpočet součinitele prostupu tepla  $k$



Obrázek 20: Význam teplosměnných ploch a výšky žebra při výpočtu [2]



### Celková plocha všech desek bez žebrování

Vzorec 4.21

$$\begin{aligned} A &= H \cdot S \cdot n \\ A &= 1 \cdot 0,9 \cdot 250 \\ A &= 225 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

### Celková plocha všech žebrování výměníku

Vzorec 4.22

$$\begin{aligned} A_f &= b \cdot H \cdot k_c \\ A_f &= 0,0012 \cdot 1 \cdot 93750 \\ A_f &= 112,5 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

**Celková teplosměnná plocha** je tvořena součtem plochy boků žebrování  $A_f$  a plochy  $A_o$

Vzorec 4.23

$$\begin{aligned} A_t &= (a + b) \cdot H \cdot k_c \\ A_t &= (0,0012 + 0,0012) \cdot 1 \cdot 93750 \\ A_t &= 225 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

**Účinnost jednoho žebra** pro kanály obou proudů a pro tepelnou vodivost  $\lambda_{comp}=377 \text{ W/m.K}$ ,  
rozměr  $c$  představuje vzdálenost kanálů.

Vzorec 4.24

$$\eta_f = \frac{\tanh m \cdot L_f}{m \cdot L_f} \quad [-]$$

kde:

$$m \cdot L_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha}{\lambda_{comp} \cdot c}} \cdot \frac{b}{2} \quad [-]$$

Teplý proud:

$$m \cdot L_{fH} = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_H}{\lambda_{comp} \cdot c}} \cdot \frac{b}{2}$$
$$m \cdot L_{fH} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4317}{377 \cdot 0,0012}} \cdot \frac{0,0012}{2}$$
$$m \cdot L_{fH} = 0,0829$$

dosazením do 4.24 dostáváme účinnost žebra v teplém proudu

$$\eta_{fH} = \frac{\tanh m \cdot L_{fH}}{m \cdot L_{fH}}$$
$$\eta_{fH} = \frac{\tanh 0,0829}{0,0829}$$
$$\eta_{fH} = 0,9977$$

Studený proud:

$$m \cdot L_{fC} = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_C}{\lambda_{comp} \cdot c}} \cdot \frac{b}{2}$$
$$m \cdot L_{fC} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3613,75}{377 \cdot 0,0012}} \cdot \frac{0,0012}{2}$$
$$m \cdot L_{fC} = 0,07584$$

dosazením dostáváme

$$\eta_{fC} = \frac{\tanh m \cdot L_{fC}}{m \cdot L_{fC}}$$
$$\eta_{fC} = \frac{\tanh 0,07584}{0,07586}$$
$$\eta_{fC} = 0,9981$$

### Celková účinnost teplosměnné plochy

Vzorec 4.25

$$\eta_o = 1 - \frac{A_f}{A_t} \cdot (1 - \eta_f)$$

Pro teplý proud dosazením do 4.25 dostáváme

$$\eta_{oH} = 1 - \frac{A_f}{A_t} \cdot (1 - \eta_{fH})$$
$$\eta_{oH} = 1 - \frac{112,5}{225} \cdot (1 - 0,9977)$$
$$\eta_{oH} = 0,99855$$

Pro studený proud:

$$\eta_{oC} = 1 - \frac{A_f}{A_t} \cdot (1 - \eta_{fC})$$
$$\eta_{oC} = 1 - \frac{112,5}{225} \cdot (1 - 0,9981)$$
$$\eta_{oC} = 0,999$$

### Konvektivní odpor pro oba proudy

Vzorec 4.26

$$R_k = \frac{1}{\eta_o \cdot \alpha}$$

Pro teplý proud:

$$R_{kH} = \frac{1}{\eta_{oH} \cdot \alpha_H}$$
$$R_{kH} = \frac{1}{0,99885 \cdot 4317}$$
$$R_{kH} = 2,312 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot K / W$$

Pro studený proud:

$$R_{kC} = \frac{1}{\eta_{oC} \cdot \alpha_C}$$
$$R_{kC} = \frac{1}{0,999 \cdot 3613,75}$$
$$R_{kC} = 2,77 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot K / W$$

**Konduktivní tepelný odpor stěny pro  $\lambda_{comp}=377 \text{ W/m.K}$**

Vzorec 4.27

$$R_V = \frac{A_t}{A} \cdot \frac{d}{\lambda_{comp}}$$
$$R_V = \frac{225}{225} \cdot \frac{0,0012}{377}$$
$$R_V = 3,183 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot K / W$$

**Celkový součinitel prostupu tepla**

Vzorec 4.28

$$k = \frac{1}{R_{kH} + R_V + R_{kC}}$$
$$k = \frac{1}{2,312 \cdot 10^{-4} + 3,183 \cdot 10^{-6} + 2,77 \cdot 10^{-4}}$$
$$k = 1955,5 \text{ W} / m^2 K$$

#### 4.1.6 Tepelný výpočet výměníku

Tepelný výpočet výměníku je proveden metodou  $\varepsilon$ -NTU a následně zkontrolován metodou LMTD. U metody  $\varepsilon$ -NTU se stanoví poměr tepelných kapacit obou proudů a počet převodových

jednotek NTU (*Number of Transfer Units*). Následně tyto hodnoty dosazujeme do vzorce 4.32 odvozeného pro protiproudý výměník. Z tohoto vzorce dostáváme účinnost výměníku, kterou přenásobíme rovnicí pro výpočet výkonu výměníku.

### $\varepsilon$ -NTU

Tepelná kapacita obou proudů

Vzorec 4.29

$$\begin{aligned}W &= \dot{m} \cdot c_p \\W_H &= \dot{m}_H \cdot c_{pH} = 400 \cdot 2330 = 932000 \text{ W / K} \\W_C &= \dot{m}_C \cdot c_{pC} = 160 \cdot 2340 = 374400 \text{ W / K}\end{aligned}$$

Poměr tepelných kapacit proudů

Vzorec 4.30

$$C = \frac{W_{\min}}{W_{\max}} = \frac{374400}{932000} = 0,402$$

Počet převodových jednotek NTU

Vzorec 4.31

$$NTU = \frac{k \cdot A_t}{W_{\min}} = \frac{1955,96 \cdot 225}{374400} = 1,174$$

Účinnost výměníku s protiproudem

Vzorec 4.32

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{1 - e^{-NTU(1-C)}}{1 - C \cdot e^{-NTU(1-C)}} \\ \varepsilon &= \frac{1 - e^{-1,174(1-0,402)}}{1 - 0,402 \cdot e^{-1,174(1-0,402)}} \\ \varepsilon &= 0,629\end{aligned}$$

Tepelný výkon výměníku

Vzorec 4.33

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \varepsilon \cdot W_{\min} \cdot (T_{Hi} - T_{Ci}) \\ \dot{Q} &= 0,629 \cdot 374400 \cdot (720 - 500) \\ \dot{Q} &= 51809472 \text{ W}\end{aligned}$$

### Kontrola podle LMTD

Určení výstupní teploty teplého proudu ze vzorce 4.34

Vzorec 4.34

$$\dot{Q} = W_H (T_{Hi} - T_{Ho}) = W_C (T_{Co} - T_{Ci})$$

vyplývá

$$\begin{aligned}T_{Ho} &= T_{Hi} - \frac{W_C}{W_H} (T_{Co} - T_{Ci}) \\ T_{Ho} &= 720 - \frac{374400}{932000} (640 - 500) \\ T_{Ho} &= 663,7^\circ \text{C}\end{aligned}$$

Tepelný výkon obou proudů

$$\begin{aligned}\dot{Q}_H &= W_H \cdot (T_{Hi} - T_{Ho}) = 932000 \cdot (720 - 663,7) = 52\,416\,000 \text{ W} \\ \dot{Q}_C &= W_C \cdot (T_{Ci} - T_{Co}) = 374400 \cdot (640 - 500) = 52\,416\,000 \text{ W}\end{aligned}$$

Tepelné výkony podle  $\varepsilon$ -NTU a LMTD jsou **prakticky totožné**.

**Teplosměnná plocha** je vypočtena z rovnice přenosu tepla 4.35

Vzorec 4.35

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T$$

Teplotním členem se rozumí logaritmický teplotní rozdíl, který vypočteme následovně:

Vzorec 4.36

$$\Delta T = \frac{(T_{Hi} - T_{Co}) - (T_{Ho} - T_{Ci})}{\ln \frac{(T_{Hi} - T_{Co})}{(T_{Ho} - T_{Ci})}} = \frac{(720 - 640) - (663,7 - 500)}{\ln \frac{(720 - 640)}{(663,7 - 500)}} = 116,89^\circ C$$

Poté pro určení teplosměnné plochy

Vzorec 4.37

$$A = \frac{\dot{Q}}{k \cdot \Delta T} = \frac{52416000}{1953,96 \cdot 116,89} = 223,603 m^2$$

Vzhledem k původnímu určení plochy na 225 m<sup>2</sup> je tento výsledek uspokojivý. V případě, že by rozdíl byl větší, bylo by nutné plochu zmenšit, resp. zvětšit, a provést několik iterací výpočtu, protože hodnota teplosměnné plochy se objevuje v několika parametrech výpočtu. Tyto výpočty se obvykle ustálí během dvou až tří iterací.

## 4.2 Výstup z numerického řešení

Numerický výpočet byl realizován ve výpočtovém prostředí MATLAB 7.0.1.24704 SP1 na standartním osobním počítači s frekvencí procesoru 2,4GHz s operační pamětí 3GB RAM.

**Vstupní hodnoty pro numerický výpočet – tabulka 10**

Vstupní teplota teplého proudu T <sub>Hi</sub>	720 °C
Vstupní hodnota studeného proudu T <sub>Co</sub>	500 °C
Hmotnost. průtok studeného proudu ṁ <sub>C</sub>	160 kg/s
Hmotnost. průtok studeného proudu ṁ <sub>H</sub>	400 kg/s
Délka výměníku H	1 m

**Výstupní hodnoty numerického výpočtu – tabulka 11**

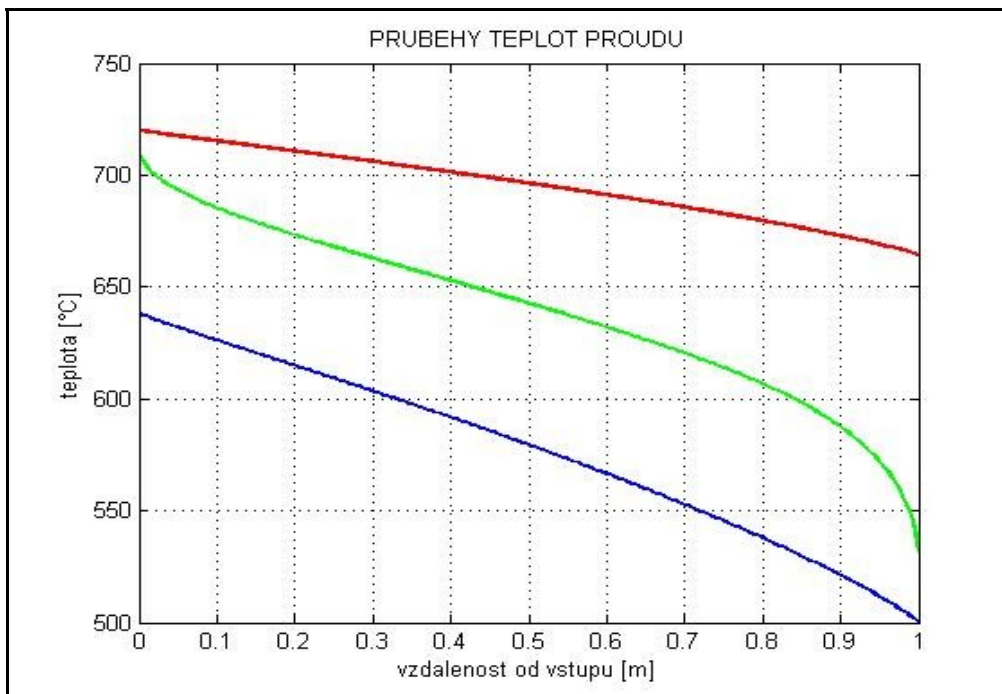
Tepelný výkon výměníku	Q = 52 109 000W
Výstupní teplota tep. proudu T <sub>Ho</sub>	663,7 °C



### Grafické výstupy

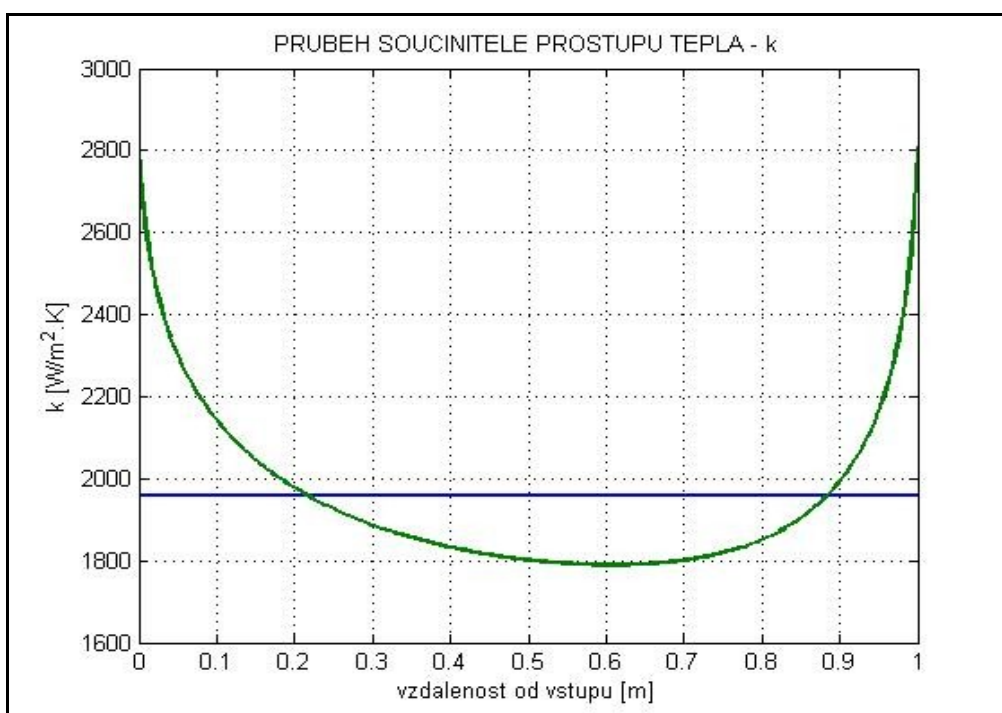
Průběh teplot proudů ve výměníku (teplý – červeně, studený – modře, střední teplota stěny – zeleně)

Obrázek 21:



Průběh součinitele prostupu tepla k

Obrázek 22:



### 4.3 Výpočet tlakové ztráty výměníku

Pro výpočet tepelné ztráty použijeme Bernoulliho rovnici, jejíž tlakový tvar se hodí se pro náš případ nevazkého, nestlačitelného proudění proudění.

Vzorec 4.38

$$\rho \cdot \frac{w^2}{2} + \rho \cdot g \cdot y + p = C$$

kde je:	$\rho$	..... hustota tekutiny	[kg.m <sup>-3</sup> ]
	$w$	..... střední rychlost proudění tekutiny	[m.s <sup>-1</sup> ]
	$g$	..... gravitační zrychlení	[m.s <sup>-2</sup> ]
	$y$	..... geografická výška	[m]
	$p$	..... statický tlak	[Pa]
	$C$	..... celkový tlak tekutiny	[Pa]

Rovnice říká, že součet dynamického, hydrostatického a statického tlaku je roven celkoovému tlaku. Rovnice je odvozena pro bezztrátové proudění a pro náš případ musí být doplněna o ztrátový člen (vzorec 4.39), kterým jsou oceněny hydraulické ztráty v kanále. Ztrátový člen je uveden rovněž ve formě tlakové.

Vzorec 4.39

$$\zeta \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \quad [Pa]$$

Vzniká rozšířená Bernoulliho rovnice ve formě tlaků

Vzorec 4.40

$$(1 + \zeta) \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} + \rho \cdot g \cdot y + p = C$$

Zanedbáme-li změnu výšky proudu a změny dynamického tlaku, získáme z Bernoulliho rovnice zapsané pro vstupní a výstupní průřez kanálu vztah pro tlakovou ztrátu kanálu, která je definována jako rozdíl vstupního a výstupního tlaku.

Vzorec 4.41

$$p_z = p_{vstup} - p_{výstup} = \zeta \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \quad [Pa]$$

Pro proudění tekutiny v kanálech se rozlišují ztráty **místní** a **třecí**. Místní ztráty jsou způsobeny náhlou změnou směru proudění a obvykle se určují experimentálně. V našem případě místní ztráty neuvažujeme. Třecí ztrátu je však nutné respektovat, protože se týká i přímých úseků kanálů. Ztrátový součinitel se počítá ze vztahu 4.42.

Vzorec 4.42

$$\zeta_T = \lambda \cdot \frac{L}{D} \quad [-]$$

kde je:	$\lambda$	..... součinitel tření	[-]
	$L$	..... délka daného úseku	[m]
	$D$	..... průměr daného úseku	[m]

Potřebujeme tedy určit součinitel tření  $\lambda$ , který určíme pro náš případ laminárního proudění určíme bez ohledu na drsnost kanálu. Při laminárním proudění výstupky spolu s vazkostí utlumí proudění a drsnost v tom případě nemá vliv na součinitel tření. Ten je pro laminární proudění stanoven jako podíl konstanty a Reynoldsova čísla, jak ukazuje vzorec 4.43. Pokud by však proudění bylo přechodové nebo turbulentní, bylo by nutné postupovat jinými kroky, o nichž je možné se více dozvědět ve skriptech [9].

Vzorec 4.43

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$$

Tento vztah se následně musí korigovat součinitelem  $k_n$  pro nekruhový kanál, který má pro pravoúhlý kanál o poměru stran 1:1 hodnotu  $k_n = 0,89$ . Součinem dostaneme hodnotu  $\lambda_N$ , kterou již můžeme ve výpočtu použít.

### **Konkrétně pro tento případ:**

Korekční součinitel na čtvercový průřez pro oba kanály:  $k = 0,89$

Součinitel tření pro kruhový průřez pro teplý proud získáme dosazením do vzorce 4.43:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}_H} = \frac{64}{1271} = 0,0503$$

Obdobně pro studený průřez:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}_c} = \frac{64}{300} = 0,213$$

Následně můžeme určit tlakovou ztrátu obou proudů podle vzorce 4.41 s dosazením podle vzorce ztrátového součinitele podle 4.42:

$$p_z = p_{\text{vstup}} - p_{\text{výstup}} = k \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \frac{H}{D_H} \cdot \frac{w^2}{2}$$

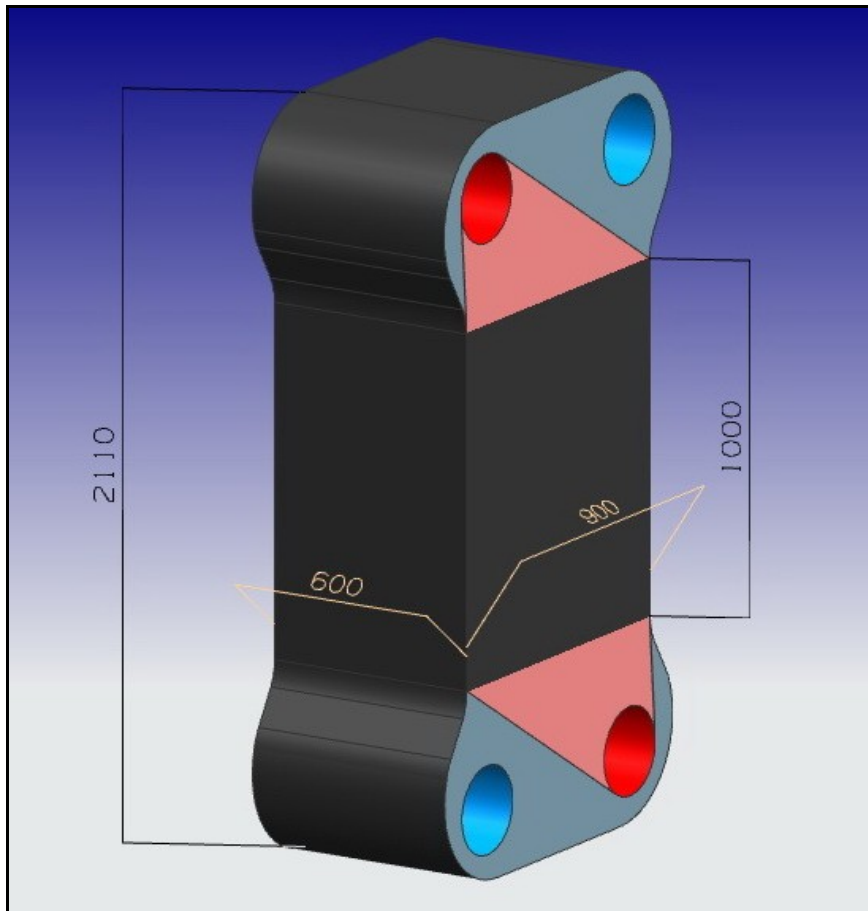
Pro teplý proud:

$$p_{zH} = p_{\text{vstup}} - p_{\text{výstup}} = k_N \cdot \lambda \cdot \rho_H \cdot \frac{H}{D_H} \cdot \frac{w_H^2}{2}$$
$$p_{zH} = 0,89 \cdot 0,0503 \cdot 1809 \cdot \frac{1}{0,0012} \cdot \frac{3,349^2}{2}$$
$$p_{zH} = 3,78 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Pro studený proud:

$$p_{zC} = p_{\text{vstup}} - p_{\text{výstup}} = k_N \cdot \lambda \cdot \rho_C \cdot \frac{H}{D_H} \cdot \frac{w_C^2}{2}$$
$$p_{zC} = 0,89 \cdot 0,213 \cdot 1865 \cdot \frac{1}{0,0012} \cdot \frac{1,3^2}{2}$$
$$p_{zC} = 2,49 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Obrázek 23: Výměník



## 5 Závěr

Tato práce je zaměřena na prozkoumání nových technologií a možností, jež s sebou přináší výzkum IV. generace jaderných reaktorů. Zadáním práce bylo prozkoumání možností speciálních grafitových kompozitů pro výrobu tepelného výměníku, který bude operovat s roztavenými solemi. Součástí práce je rešerše vlastností LSI C/C grafitových kompozitů a určení jeho parametrů pro výpočet. Toto, vzhledem k faktu, že společnosti zabývající se grafitovými kompozity, si střeží svá know-how, nebylo zcela jednoduché. Práce obsahuje popis výroby kompozitů, technologii výroby součástí z nich a fyzikální a chemické vlastnosti těchto materiálů potřebné pro následný výpočet výměníku.

Další částí práce bylo zjištění vlastností fluoridových solí pro použití v jaderných reaktorech nové generace. Pro samotný návrh výměníku byla vybrána směs FLiBe, která je jedním z nejvíce prozkoumaných zástupců fluoridových solí pro jadernou energetiku. Ve výměníku tato směs LiF a BeF<sub>2</sub> obíhá v obou prouděch, přičemž horký proud simuluje chladivo v reaktoru s roztavenými solemi, druhý proud sekundární okruh.

Hlavní statí práce je návrh tepelného výměníku. Výměník by mohl být součástí experimentálního zařízení pro další, konkrétnější, přesnější a aplikovatelnější výzkum na experimentální úrovni. V této práci je navržen deskový rekuperační protiproudý tepelný výměník z LSI C/C grafitového kompozitu, v němž se uskutečňuje tepelný přenos mezi roztavenými fluoridovými solemi LiF-BeF<sub>2</sub> (FLiBe). Hodnoty výměníku jsou shrnuty v tabulce 11.

Tabulka 11.

Požadovaný tepelný výkon	50MW
Průtočné množství teplého proudu	400 kg/s
Průtočné množství studeného proudu	160 kg/s
Vstupní teplota teplého proudu	720°C
Výstupní teplota teplého proudu	663,7 °C
Vstupní teplota studeného proudu	500 °C
Výstupní teplota studeného proudu	640 °C
Tlaková ztráta teplého proudu	378 000 Pa
Tlaková ztráta studeného proudu	249 000 Pa
Rozměry S x V x H	0,9 x 0,6 x 1 m

Výpočet byl prováděn numericky ve výpočtovém prostředí MATLAB a následně dimenzován metodou  $\varepsilon$ -NTU a LMTD. Při výpočtu je využit teoretický základ vytvořený pro toto téma v práci [2] a dalších zdrojů, které jsou uvedeny v soupisu zdrojů. Ve výpočtech není uvedena sálavost výměníku z důvodů naprosté absence informací o těchto vlastnostech LSI C/C kompozitů a zároveň kvůli konstrukčnímu návrhu výměníku, resp. rozměrům jeho jádra. Výroba výměníku je relativně jednoduchá, odmyslíme-li si technologii zpracování grafitových kompozitů s infiltrovaným křemíkem. Výroba v podstatě spočívá ve spojení desek (desky jsou v příloze 2), které jsou z perforovaného grafitu. Těchto desek je ve výměníku použito 250. Spojování součástí je popsáno v kapitole 2.2.2, které je provedené technologií, při níž se eliminuje škodlivý vliv spojů na tepelné a mechanické vlastnosti.

Naprosto zásadní pro správnou funkci tohoto zařízení je technologie výroby kompozitních polotovarů, kde je velice důležitá orientace uhlíkových vláken, s níž se dramaticky mění součinitel tepelná vodivost grafitového kompozitu. Při výrobě musí být dbáno na orientaci vláken po směru předávání tepla z proudu do proudu.

Vzhledem k tomu, že výměník pracuje s médii za takřka atmosférického tlaku, a k mechanickým vlastnostem grafitových kompozitů, je mechanické namáhání zanedbatelné a není v této práci

řešeno. Při bližším zkoumání by však bylo příhodné mechanickou stránku nezanedbat. Zároveň je nutné dodat, že v práci je řešeno jádro výměníku a následná výkresová dokumentace dokumentace desek výměníku je ilustrativní. Vtokové otvory jsou navrženy poměrně velké kvůli tlakové ztrátě, jak je zvykem. Vtoky do samotného jádra výměníku nejsou speciálně tvarovány. Pro tuto, velmi konkrétní část problému by bylo nutné použít FEM (MKP) softwarů. Toto téma je velice zajímavé a bylo by přínosné jej dále rozvádět například v diplomové práci právě za asistence MKP softwarů jako FLUENT či ANSYS. Rovněž má, dle mého osobního názoru, velkou perspektivu z hlediska budoucí orientace jaderného inženýrství.

## 6 Přílohy

1. Výpis kódu pro numerický výpočet
2. Výkresy výměníku a desek
3. Přiložené CD s elektronickou podobou bakalářské práce

## 7 Použitá literatura a internetové zdroje

- [1] BERGMAN, T., LAVIN, A. A Fundamentals of Heat and Mass Transfer. New Jersey: J. Wiley, 2007.
- [2] Makovec Jiří - Návrh výměníku tepla, Diplomová práce ZČU Plzeň 2010
- [3] Bílý Lukáš - Návrh výměníku tepla, Bakalářská práce ZČU Plzeň 2010
- [4] BENEŠ, O., CABET, C., DEPLECH, S., et all. Review report on liquid salts for various application. In Alisia-deliverable-d50\_V4, 2009.
- [5] SCHMIDT, J. Potencial Applications for Liquid Silicon Melt Infiltrated (LSI) Composites to the High-Temperature Sulfur-Iodine (S-I) Process. German Aerospace Center (DLR), Visiting Scholar at the University of California, Berkaley Department of Nuclear Engineering, 2006.
- [6] PETERSON, P. F., FORSBERG, CH. W., PICKARD, P. S. Advanced CSiC composites for high-temperature nuclear heat transport with helium, molten salt and sulfuriodine thermochemical hydrogen process fluid.
- [7] Margit Žaloudková - IMAGE ANALYSIS OF THE FIBRE VOLUME FRACTION AND THE POROSITY OF CARBON-CARBON COMPOSITE MATERIALS
- [8] Otakar Brenner - KOROZNÍ ODOLNOST NIKLOVÝCH SLITIN V PROSTŘEDÍ ROZTAVENÝCH FLUORIDOVÝCH SOLÍ, Metal 2008
- [9] Linhart, Jiří, Mechanika tekutin I , Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni 2009
- [12] ULRICH PAPENBURG - Advanced Ultra-lightweight C/SiC Mirrors and Opto-mechanical

## Structures

- [13] ULRICH PAPENBURG - Some notes on C/SiC
- [14] K. Enya, T. Nakagawa, H. Kaneda, T. Onaka, T. Ozaki, M. Kume - Microscopic surface structure of C/SiC composite mirrors for space cryogenic telescopes
- [15] Panayiotis J Karditsas, Marc-Jean Baptiste Thermal and Structural Properties of Fusion related Materials
- [21] Nishimura H., Suzuki A., Terai T. - Chemical behavior of  $\text{Li}_2\text{BeF}_4$  molten salt as a liquid tritium breeder, LHD Project, National Institute for Fusion Science, Toki-city 509-5292, Japan
- [22] D. F. Williams, L. M. Toth, K. T. Clarno - Assessment of Candidate Molten Salt Coolants for the Advanced High-Temperature Reactor (AHTR)
- [23] M.F.Simpson, G.R. Smolik - Quantitative measurement of beryllium-controlled redox of hydrogen fluoride in molten Flibe
- [24] O.Beneš, M.Beilmann, RJM Konings - Thermodynamic assessment of the  $\text{LiF-NaF-ThF}_4\text{-UF}_4$  system, Journal of Nuclear Materials
- [10] [http://en.wikipedia.org/wiki/Wattle\\_and\\_daub](http://en.wikipedia.org/wiki/Wattle_and_daub)
- [11] [http://cs.wikipedia.org/wiki/Uhlíkové\\_vlákno](http://cs.wikipedia.org/wiki/Uhlíkové_vlákno)
- [16] <http://aries.ucsd.edu/LIB/PROPS/PANOS/c.html>
- [17] <http://www.osel.cz/index.php?clanek=3568>
- [18] <http://www.osel.cz/index.php?clanek=3471>
- [19] <http://www.gen-4.org/>
- [20] <http://www.osel.cz/index.php?clanek=5094>
- [25] [http://pet.fsid.cvut.cz/tv/tps\\_ex2.pdf](http://pet.fsid.cvut.cz/tv/tps_ex2.pdf) / Podporný materiál pro FS CVUT

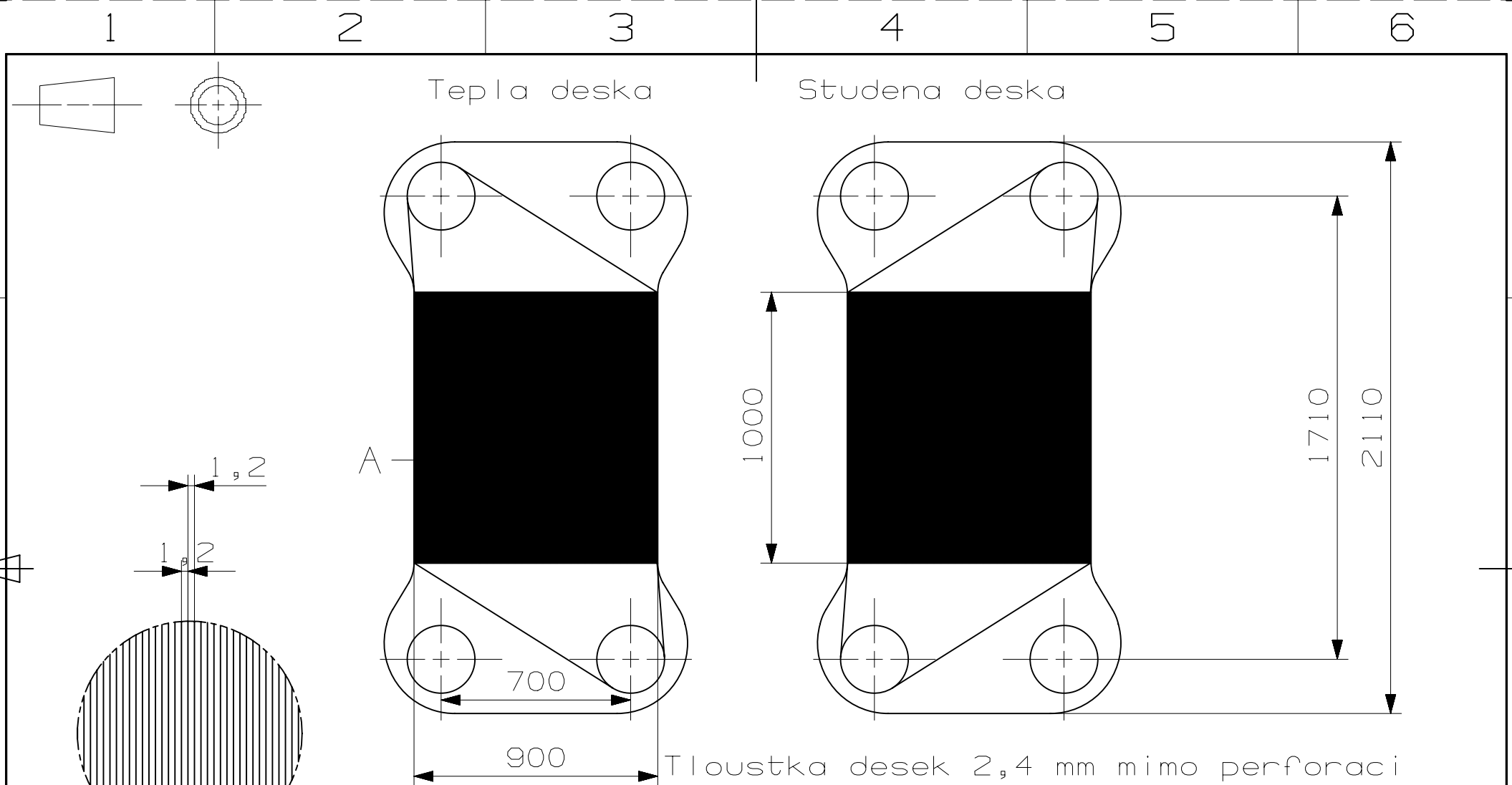


## PŘÍLOHA č. 1

### Výpis kódu pro numerický výpočet

```
%zadavane hodnoty-----  
Tvstup_h=720 %vstupni teplota horkeho proudu [°C]  
Tvstup_c=500 %vstupni teplota studeneho proudu [°C]  
delka=1 %celkova delka kanalu [m]  
n=250 %pocet elementu  
Re_h=1271 %Renoldsovo cislo horkeho proudu  
Re_c=300 %Renoldsovo cislo studeneho proudu  
Pr_h=12.33 %Prandtlovo cislo horkeho proudu  
Pr_c=21.64 %Prandtlovo cislo studeneho proudu  
a=0.0012 %sirka kanalu [m]  
b=0.0012 %vyska kanalu [m]  
c=0.0012 %tloustka kompozitové desky [m]  
d=0.0012 %tloustka zebra [m]  
pocet_kanalu=93750 %celkovy pocet kanalu  
A=200 %teplosmenna plocha desky hladke [m2]  
At=225 %teplosmenna plocha desky zebrovane [m2]  
Af=112.5 %plocha zeber samotnych [m2]  
lambda_h=1.08 %tepelna vodivost soli LiF-BeF2 [W/m.K]  
lambda_c=1.05 %tepelna vodivost soli NaF-NaBF4 [W/m.K]  
lambda_komp=377 %tepelna vodivost kompozitu [W/m.K]  
W_h=932000 %tepelna kapacita horkeho proudu [W/K]  
W_c=374400 %tepelna kapacita studeneho proudu [W/K]  
Nu_nekon=3.66 %Nuseltovo cislo ve vivinutem proudeni pravouhlehého kanalu  
%pomocne hodnoty-----  
obvod_kanalu=2*(a+b)  
D_hyd=4*a*b/(2*(a+b)) %hydraulicky prumer  
x=linspace(0,delka,n) %delkova souradnice vymeniku  
k=linspace(0,0,n) %vynulovani vektoru souc. prostupu tepla  
t_h=linspace(Tvstup_h,Tvstup_h,n) %naplneni vektoru teplot horkeho proudu  
pocatecni teplotou  
t_c=linspace(Tvstup_c,Tvstup_c,n) %naplneni vektoru teplot studeneho proudu  
pocatecni teplotou  
DS=obvod_kanalu*pocet_kanalu*(delka/n)*0.5 %plocha povrchu elementu  
t_s=linspace(0,0,n) %vynulovani vektoru teploty steny  
alfa_h=linspace(0,0,n) %vynulovani vektoru souc. prestupu tepla horkeho proudu  
alfa_c=linspace(0,0,n) %vynulovani vektoru souc. prestupu tepla horkeho proudu  
%vypocet vektoru souc. prostupu tepla-----  
for s=1:n  
if Re_h>2300  
Nu_h=0.116*((Re_h^0.66)-125)*Pr_h^0.33  
else  
Gz_h=Re_h*Pr_h*D_hyd/((delka/n)*s)  
Gzr_h=1/Gz_h  
Nu_h=((4.364*(1+(Gz_h/29.6)^2)^(1/6))* (1+((Gz_h/19.04)/((1+  
(Pr_h/0.0207)^0.667)^0.5)*(1+(Gz_h/29.6)^2)^0.333))^1.5)^0.333)*Nu_nekon/4.364  
end  
alfa_h(s)=Nu_h*lambda_h/D_hyd  
mhL_h=((2*alfa_h(s)/(lambda_komp*d))^0.5)*b*0.5  
ethaf_h=(tanh(mhL_h))/mhL_h %ucininnost jednoho zebra  
ethao_h=1-(Af/At)*(1-ethaf_h) %celkova ucinnost teplosmenne plochy  
if Re_c>2300  
Nu_c=0.116*((Re_c^0.66)-125)*Pr_c^0.33  
else  
Gz_c=Re_c*Pr_c*D_hyd/(delka-(delka/n)*(s-1))  
Gzr_c=1/Gz_c  
Nu_c=((4.364*(1+(Gz_c/29.6)^2)^(1/6))* (1+((Gz_c/19.04)/((1+  
(Pr_c/0.0207)^0.667)^0.5)*(1+(Gz_c/29.6)^2)^0.333))^1.5)^0.333)*Nu_nekon/4.364  
end
```

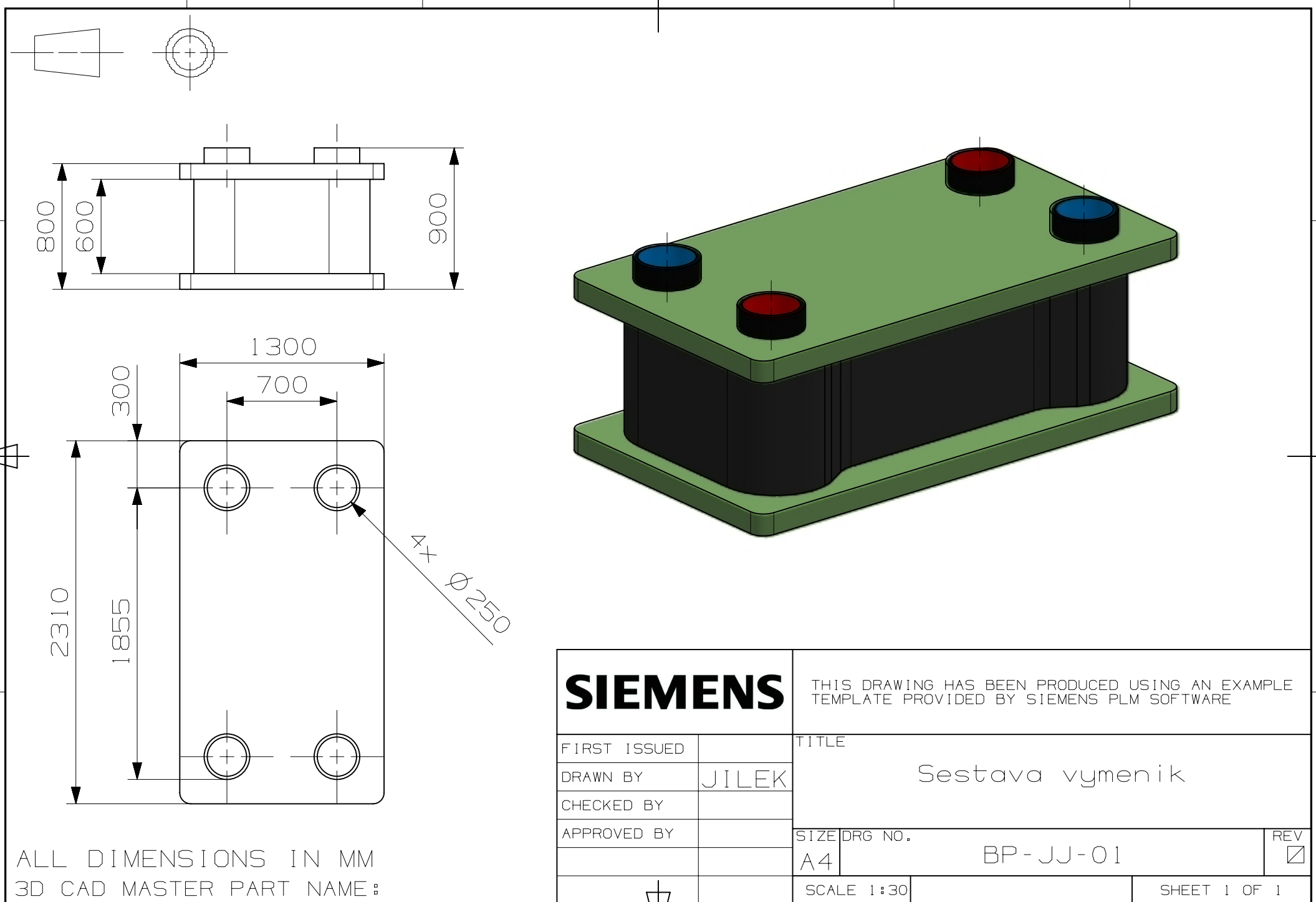
```
alfa_c(s)=Nu_c*lambda_c/D_hyd
mhL_c=((2*alfa_c(s)/(lambda_komp*d))^0.5)*b*0.5
ethaf_c=(tanh(mhL_c))/mhL_c %ucinnost jednoho zebra
ethao_c=1-(Af/At)*(1-ethaf_c) %celkova ucinnost teplosmenne plochy
k(s)=1/((1/(alfa_h(s)*ethao_h)+(c*At/(lambda_komp*A))+1/(alfa_c(s)*ethao_c)))
%soucinitel prostupu tepla
end
%vypocet vektoru teplot-----
for j=1:100 %pocet iteraci
for i=2:n
Dx_h=DS*(k(i-1)+k(i))/(2*W_h);
t_h(i)=(t_h(i-1)+Dx_h*t_c(i))/(1+Dx_h);
end
for i=n-1:-1:1
Dx_c=DS*(k(i+1)+k(i))/(2*W_c);
t_c(i)=(t_c(i+1)+Dx_c*t_h(i))/(1+Dx_c);
end
end
%vypocet tepelneho vykonu, vektoru teploty steny
%a stredni hodnoty soucinitele prostupu tepla-----
Q=0
sum=0
for z=1:n
q=k(z)*DS*(t_h(z)-t_c(z)) %tepelny vykon preneseny jednim elementem
Q=Q+q %celkovy tepelny vykon
t_s(z)=(alfa_h(z)*t_h(z)+alfa_c(z)*t_c(z))/(alfa_h(z)+alfa_c(z))
%teplota steny
sum=sum+k(z)
k_s=sum/n %stredni hodnota souc. prostupu tepla
k_sc=linspace(k_s,k_s,n) %vektor stredni hodnoty souc. prostupu tepla
end
%graficky vystup-----
figure(1)
plot(x,t_h,'r',x,t_c,'b',x,t_s,'g','LineWidth',2)
grid on
title('PRUBEHY TEPLIT PROUDU')
xlabel('vzdalenost od vstupu [m]')
ylabel('teplota [°C]')
figure(2)
plot(x,k_sc,x,k,'LineWidth',2)
grid on
title('PRUBEH SOUCINITELE PROSTUPU TEPLA - k')
xlabel('vzdalenost od vstupu [m]')
ylabel('k [W/m^2.K]')
```



Tloušťka desek 2,4 mm mimo perforaci

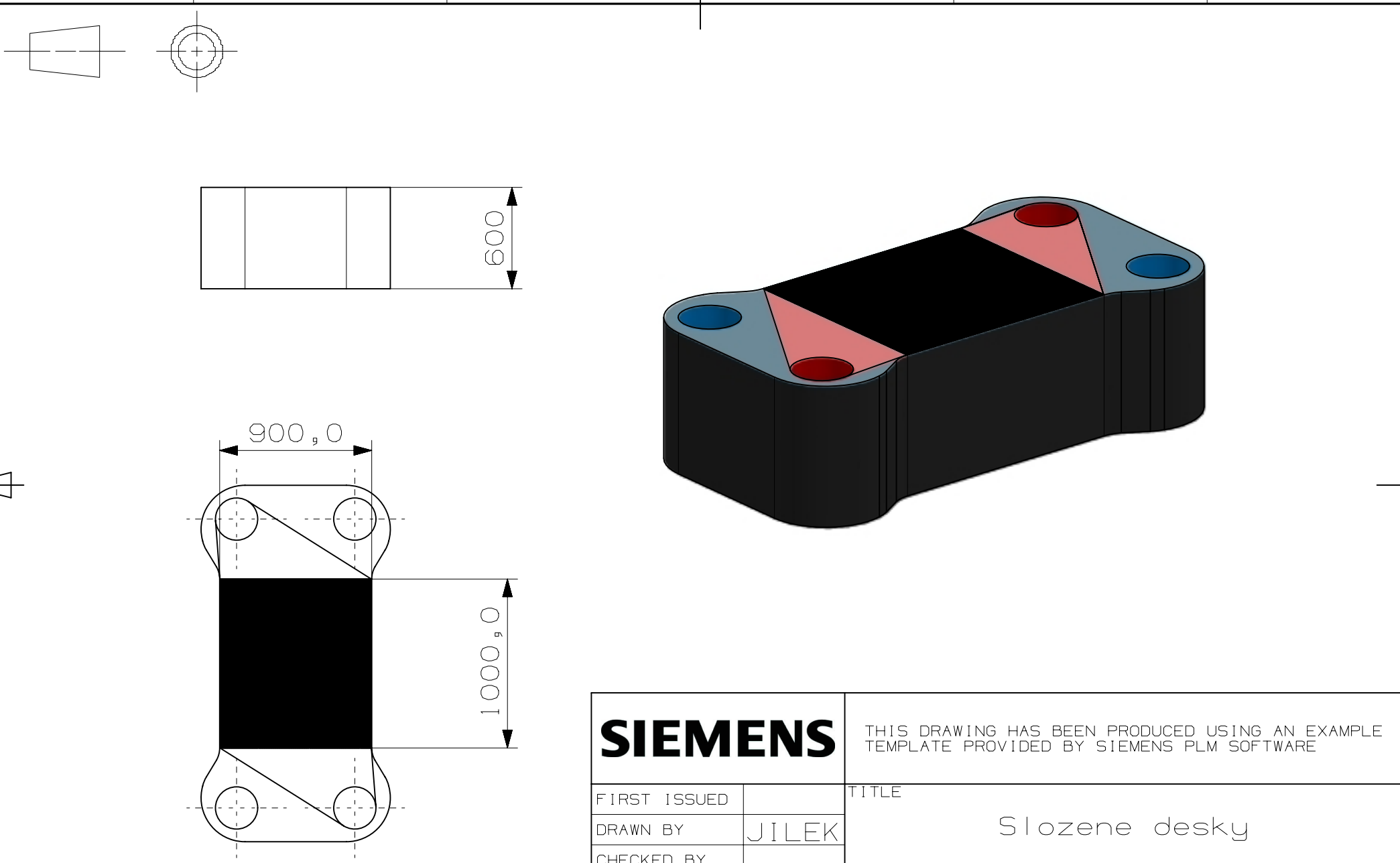
<b>SIEMENS</b>		THIS DRAWING HAS BEEN PRODUCED USING AN EXAMPLE TEMPLATE PROVIDED BY SIEMENS PLM SOFTWARE	
FIRST ISSUED		TITLE	
DRAWN BY	JILEK	Desky vymeniku	
CHECKED BY			
APPROVED BY		SIZE	DRG NO.
		A4	BP-JJ-02
		SCALE 1:20	REV <input checked="" type="checkbox"/>
			SHEET 1 OF 1

ALL DIMENSIONS IN MM  
3D CAD MASTER PART NAME :



ALL DIMENSIONS IN MM  
 3D CAD MASTER PART NAME :

<b>SIEMENS</b>		THIS DRAWING HAS BEEN PRODUCED USING AN EXAMPLE TEMPLATE PROVIDED BY SIEMENS PLM SOFTWARE		
FIRST ISSUED		TITLE		
DRAWN BY	JILEK	Sestava vymenik		
CHECKED BY				
APPROVED BY		SIZE	DRG NO.	REV
		A4	BP-JJ-01	<input checked="" type="checkbox"/>
		SCALE 1:30		SHEET 1 OF 1



ALL DIMENSIONS IN MM  
 3D CAD MASTER PART NAME :

<b>SIEMENS</b>		THIS DRAWING HAS BEEN PRODUCED USING AN EXAMPLE TEMPLATE PROVIDED BY SIEMENS PLM SOFTWARE	
FIRST ISSUED		TITLE	
DRAWN BY	JILEK	Slozene desky	
CHECKED BY			
APPROVED BY		SIZE	DRG NO.
		A4	BP-JJ-01
		SCALE 1:30	REV <input checked="" type="checkbox"/>
			SHEET 1 OF 1